Colección
Ciencia y Tecnología

FÍSICA PARA TODOS

L.Landau
A.Kitaigorodski

UACM
Universidad Autónoma
de la Ciudad de México
Nada humano me es ajeno

Universidad Autónoma de la Ciudad de México

FÍSICA PARA TODOS

L. LANDAU
A. KITAIGORODSKI

UACM
Universidad Autónoma de la Ciudad de México
Nada humano me es ajeno

Biblioteca del Estudiante

Título: *Física Para Todos*

Traducción: Emiliano Aparicio Bernardo
Editorial MIR, Moscú

Fray Servando Teresa de Mier 99, Col. Centro,
Delegación Cuauhtémoc, C.P. 06080, México, D.F.

Coordinación Técnica Biblioteca del Estudiante

Editor: Huitzilin Yépez Martínez

Academia de Física, UACM

Diseño de portada: Aarón Aguilar

Trazo de imágenes: Sergio Cortés Becerril

ISBN: 968572089-4

Primera reimpresión 2007

Hecho e impreso en México /Printed in Mexico

Índice

Prefacio

Física para todos, como su nombre lo indica, es una obra de divulgación científica pensada para casi cualquier tipo de lectores; desde estudiantes de nivel medio y medio superior, hasta universitarios y profesionistas. Sin embargo, y a diferencia de la mayoría de los libros de divulgación a los que estamos acostumbrados, el objetivo de Física para todos no es el de explicar el último descubrimiento científico o desarrollar conceptualmente la teoría de moda. Y aunque no podemos negar que muchos de estos materiales son excelentes –incluso algunos logran ventas impresionantes en las librerías–, con frecuencia dejan al lector con una falsa sensación de satisfacción. Por ejemplo, es cierto que una teoría de supercuerdas en once dimensiones o el evaporamiento de los hoyos negros se pueden «explicar» y «comprender» en unas cuantas páginas, pero siempre y cuando estemos dispuestos a renunciar a «cierto número de detalles».

Afortunadamente, el libro que ahora presentamos no es de esta naturaleza, por el contrario; sus páginas, al leerlas, nos remiten no al conocimiento destinado a los enterados sino a las enseñanzas recibidas durante nuestra formación elemental. Es más, los autores no desarrollan temas que escapan a nuestra comprensión, más bien se enfocan en aquellos que el lector pudo considerar incluso «aburridos» en algún momento de su educación. Y es aquí, justamente, en donde podemos apreciar en toda su dimensión la visión, la genialidad de Landau. Despojados de toda pedantería, y armados al mismo tiempo con un extremado rigor intelectual, los autores de esta obra nos «explican» y «aclaran», recurriendo a ejemplos de la vida cotidiana, todos esos conceptos que los profesores de secundaria y preparatoria se habían empeñado en hacernos «memorizar» –quizá por no comprenderlos del todo ellos mismos–.

No se trata, sin embargo, de una exposición más de temas elementales. Ya que desde los primeros capítulos los autores introducen conceptos «avanzados» como el principio de equivalencia. Pero los colocan justo donde deben estar, es decir, no por orden de aparición histórica, sino privilegiando su articulación con los demás conceptos de una rama, formando así un todo coherente.

De esta manera, Landau y Kitaigorodski navegan a contracorriente tanto frente a aquellos libros de texto que favorecen una visión pragmática, instrumental, de la física: enseñar sólo lo que pueda ser de utilidad inmediata a un ingeniero; como de los textos que insisten en un pedante «desarrollo histórico» que hace abstracción de lo fundamental, a saber: del entramado conceptual sutil que articula las diversas partes de una teoría y a las distintas teorías de la física entre sí. Ésta es una de las grandes aportaciones del libro: dejar en claro la unidad subyacente de todas las ramas de la física.

En el primer capítulo, entre otras cosas, los autores introducen el concepto de la velocidad como vector; en el capítulo II discuten sobre la relatividad galileana del movimiento y en el tercer capítulo distinguen [1] los sistemas de referencia inerciales de los no inerciales; el capítulo IV está dedicado a las leyes de conservación y el capítulo v a las oscilaciones[2]. En los tres capítulos subsiguientes se desarrollan los conceptos elementales de la mecánica del cuerpo rígido y del medio material; en el capítulo IX se exponen, de forma elemental, los de la mecánica estadística y los de la termodinámica; y en el capítulo XIII los de la físico–química. El capítulo XIV, dedicado al rozamiento, es especialmente interesante por dos razones: por el concepto de turbulencia –que, recordémoslo, era considerado por Heisenberg como uno de los más complicados problemas a los que se enfrenta la física– y por la exposición elemental que en este apartado se hace del comportamiento supefluido del helio líquido, fenómeno cuya explicación le valió a Landau el premio Nobel en 1962. Y el último capítulo, en donde se introduce el concepto de entropía, está fundamentalmente dedicado a aplicaciones en ingeniería, lo cual no hace sino aumentar el interés del libro y, con esto, su potencial círculo de lectores.

Al final del libro, Landau y Kitaigorodski se despiden con las siguientes palabras: «Tenemos esperanzas de encontrarnos con el lector en el futuro y tratar sobre las correcciones que es necesario hacer en los enunciados anteriores de las leyes de la naturaleza para que se puedan aplicar, en unos casos, al mundo microscópico y, en otros, a todo el universo.» Con ellas, los autores dejaban constancia por escrito de su propósito de publicar sendas obras de divulgación sobre la relatividad general y la mecánica cuántica. El primero de estos libros es una realidad y se titula Relatividad para todos, no obstante, el segundo permanece desconocido para el que esto escribe. Debemos resaltar también la manera desenfadada con la que los autores nos dan a entender el carácter de la física como una ciencia siempre en construcción: «...las correcciones que es necesario hacer en los enunciados anteriores...» ¡Ojalá muchos profesores estuvieran dispuestos a aceptar las «correcciones» siempre «necesarias» en cualquier teoría!

El lenguaje sencillo y el desarrollo claro y metódico con los que esta obra nos introduce en temas generalmente considerados complicados o tediosos, constituyen un excelente ejemplo de lo que debe ser una exposición racional y cuyo resultado puede ser usado, con provecho, como una vacuna en contra de la vacuidad, la obscuridad y la grandilocuencia, defectos con los que suele encubrirse la pobreza intelectual en cualquier campo; esto es, precisamente, lo que hace de Física para todos un libro clásico, y aunque poco conocido, imprescindible para la formación de los estudiantes universitarios sin importar su orientación académica.

---

[1]En este capítulo Landau y Kitaigorodski explican de forma breve, pero concisa, el origen de la fuerza de Coriolis, la cual es ignorada en la mayoría de los libros de texto.

[2]Los cinco primeros capítulos del índice de Física para todos cubren, de manera esencial, un curso universitario de mecánica de la partícula material.

Es por ello que la obra de Landau y Kitaigorodski no puede ni debe faltar en el acervo bibliográfico de la Biblioteca del Estudiante de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Esbozos biográficos

Lev Davidovich Landau (1908-1968) fue un físico soviético cuyas contribuciones a la teoría de la superfluidez le valieron el premio Nobel de física en 1962. Realizó también importantes trabajos en los campos de la mecánica cuántica –teoría de la matriz de la densidad–, la teoría del diamagnetismo, la superconductividad –teoría de Ginzburg-Landau–, la física de plasmas –amortiguamiento de Landau–, la física de neutrinos y la electrodinámica cuántica –polos de Landau–. Incluso uno de los cráteres de la Luna fue bautizado en su honor. Niño prodigio, Landau se inició en la vida universitaria a los catorce años; estudió de forma simultánea en las facultades de física y de química de las que se graduaría a los diecinueve años para dos años después terminar el doctorado.

En 1929 trabajó, en Copenhague, junto a Niels Bohr, quien es considerado como uno de los padres fundadores de la mecánica cuántica. A partir de este momento, Landau se consideró discípulo de Bohr, y empezó a desarrollar una gran admiración por la visión, profunda y sencilla a la vez, del danés. Tiempo después trabajó en el Laboratorio Cavendish, de Cambridge, que era dirigido por Rutherford, el descubridor del núcleo atómico. Ahí conoció a su colega y compatriota Pyotr Kapitsa, el cual habría de proteger y estimular su carrera.

Años más tarde Landau regresaría a la Unión Soviética, concretamente a Kharkov, para dirigir el Instituto Físico–Técnico de Ucrania, y es precisamente aquí en donde tendría lugar su extraordinaria producción científica. Durante 25 años, de 1937 a 1962, se desempeño como jefe de la división teórica del Instituto de Problemas Físicos de Moscú, lugar en donde combinó la investigación con la docencia y la administración. En este último año sufrió un accidente carretero del que nunca se repuso, y que le llevó a una muerte prematura a los sesenta años de edad.

Su Curso de Física Teórica, obra que consta de diez volúmenes –algunos de ellos póstumos– y que escribiera en colaboración con Lifshitz, es hoy en día un clásico utilizado en muchos de los programas de estudio de posgrado alrededor del mundo.

Por su parte, A. Kitaigorodski realizó algunas contribuciones de cierta relevancia del estado sólido y a la física molecular. Su obra Introducción a la física –traducida a varios idiomas, incluyendo el español, el checo, el árabe y, recientemente, el inglés– comienza ahora a ser revalorada, entre otras cosas por la claridad de su exposición.

Prólogo

La primera pregunta que se hará el lector al tomar este libro en las manos será: ¿Para quién es este libro que es «para todos»? Claro que en este título hay un poco de exageración. Es suficiente que el lector conozca los fundamentos del álgebra escolar. No es menester tener conocimientos de física: éste puede ser su primer libro de física, Es posible, sin embargo, que este libro interese también a aquellos que han elegido la física como especialidad.

Hemos procurado escribirlo empleando un lenguaje claro y sencillo; a veces nos hemos permitido el placer de tomar alguna broma. Pero esto no quiere decir que nuestra «Física para todos» sea un libro fácil. Algunas de sus páginas hay que leerlas mucho tiempo y con atención; frecuentemente, para entender la física hay que pensar mucho e intensamente. En el libro se ha prestado atención principal a las leyes y conceptos fundamentales. Sin embargo, hemos procurado no olvidarnos de las ilustraciones de la vida y de la técnica; por supuesto, sin la finalidad de entrar en los detalles de las innumerables aplicaciones de la física. Un reducido número de referencias históricas están dedicadas exclusivamente a los fundamentos de la física, pero no a sus aplicaciones. Por ahora, la «Física para todos» abarca solamente la parte de la física que se refiere a los movimientos mecánico y molecular. Los siguientes libros del mismo título están dedicados a la electricidad, a la óptica y a la estructura del átomo y esperamos que el lector pueda leerlos.

L. Landau, A. Kitaigorodski

I. Conceptos fundamentales

El centímetro y el segundo

Todos tenemos la necesidad de medir longitudes, contar el tiempo y pesar diversos cuerpos. Por eso, todos sabemos bien qué es el centímetro, el segundo y el gramo. Pero, para la física, estas medidas tienen una importancia extraordinaria, puesto que son necesarias para la apreciación de la mayoría de los fenómenos físicos. Los hombres procuran medir con la mayor precisión posible las distancias, los intervalos de tiempo y el peso, llamados en la física conceptos fundamentales.

Los instrumentos modernos de la física ofrecen la posibilidad de determinar la diferencia de las longitudes de dos varillas de dos metros, incluso cuando esta diferencia sea menor de una mil millonésima parte de metro. Se pueden distinguir intervalos de tiempo que se diferencian en una millonésima parte de segundo. Una buena balanza puede pesar con gran precisión un grano de amapola.

No hace más que unos cuantos cientos de años atrás, empezó a desarrollarse la técnica de las mediciones, y no hace mucho, relativamente, que se ha convenido sobre qué segmento de longitud y el peso de qué cuerpo se deben tomar como unidades.

¿Por qué el centímetro y el segundo se han elegido tal como los conocemos? Pues está claro que no tiene importancia alguna que el centímetro o el segundo sean más largos o más cortos.

Lo único que se pide, es que la unidad de medida sea cómoda. Estaría bien, si ésta estuviese a mano. Lo más sencillo sería tomar por unidad de medida la misma mano. Precisamente así lo hicieron en los tiempos antiguos; esto lo testimonian los mismos nombres de las unidades, por ejemplo, «codo», que es la distancia desde el codo hasta los extremos de los dedos de la mano estirada; pulgada, que es el grosor del dedo pulgar en su base. También se utilizaba el pie como medida; de aquí la denominación de longitud «pie», que es la longitud de la planta del pie.

Aunque estas medidas son de gran comodidad, puesto que siempre las tenemos con nosotros, sus defectos son evidentes: mucho se diferencian unas personas de otras, para que la mano o el pie puedan servir de unidades de medida y no dé lugar a discusiones.

Con el desarrollo del comercio surgió la necesidad de llegar a un acuerdo sobre las unidades de medidas. Los patrones de longitud y de peso se establecieron, primero para un mercado, después, para una ciudad, más tarde, para todo un país y, por fin, para todo el mundo. El patrón es una medida que sirve de modelo, como la regla, la pesa, etc. El Estado guarda con mucho cuidado los patrones y otras reglas y pesas tienen que ser construidas exactamente de acuerdo al patrón.

En la Rusia zarista, las medidas principales de peso y longitud —llamadas «funt» y «arshín»— fueron fabricadas en el año 1747. En el siglo *XIX* aumentaron las necesidades de precisión de las medidas y estos patrones resultaron ser imperfectos. D. Mendeleev dirigió en los años 1893—1898 los trabajos, muy complicados y de gran responsabilidad, de la elaboración de patrones exactos. El gran químico consideraba de suma importancia el establecimiento de medidas exactas. Por iniciativa de él, a fines del siglo *XIX* se fundó la Cámara principal de medidas y pesas, en donde se guardaban los patrones y se elaboraban sus copias.

Unas distancias se expresan en unidades mayores, otras, en menores. En efecto, a nadie se le ocurrirá expresar la distancia de Moscú a Leningrado en centímetros y el peso de un tren del ferrocarril en gramos. Por eso, los hombres acordaron establecer una determinada relación entre las medidas grandes y pequeñas. Como todos saben, en el sistema de unidades que utilizamos, las unidades grandes se diferencian de las pequeñas en 10, 100, 1000, etc., veces. Tal conveniencia resulta muy cómoda y facilita los cálculos. Sin embargo, este sistema tan cómodo no está establecido en todos los países. En Inglaterra y en los EU, hasta ahora utilizan muy poco el metro, el centímetro y el kilómetro, y también el gramo y el kilogramo[1], a pesar de que es indudable la comodidad del sistema métrico.

En el siglo XVII surgió la idea de elegir un patrón que existiese en la naturaleza y que no variase con los años y con los siglos. En el año 1664, Cristián Huyghens propuso tomar por unidad de longitud la de un péndulo que efectuara una oscilación en un segundo. Después de cien años, aproximadamente en el año 1771, se propuso tomar por patrón la longitud del espacio recorrido por un cuerpo en su caída libre durante un segundo. Sin embargo, las dos variantes resultaron ser incómodas y no fueron aprobadas. Para que surgieran las medidas modernas hizo falta una revolución; el kilogramo y el metro se crearon durante la Gran Revolución Francesa.

En el año de 1790, la Asamblea Constituyente creó una comisión especial para elaborar medidas únicas; en ellas tomaban parte los mejores físicos y matemáticos. De todas las variantes propuestas para unidad de longitud, la comisión eligió una diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre y dio a esta unidad el nombre de «metro». En el año 1799 fue fabricado el patrón del metro y entregado al depósito del archivo de la República.

Sin embargo, muy pronto quedó claro que la idea, abstractamente justa, sobre la

[1]En Inglaterra se admiten oficialmente las siguientes medidas de longitud: la milla marina (igual a 1852 m); la milla simple (1609 m); el pie (30.5 cm); el pie equivale 12 pulgadas; la pulgada a 2.54 cm; la yarda a 0.91 m. Ésta es una medida de «sastre»; está convenido medir en yardas la cantidad de tela que se necesita para un traje.
En los países anglo-sajones, el peso se mide en libras (equivale a 454 g). Las partes pequeñas de la libra son: la onza ($\frac{1}{16}$ de libra) y el grano ($\frac{1}{70000}$ de libra); estas medidas las utilizan los boticarios al pesar los medicamentos.
Últimamente (en el año 1965), el parlamento inglés ha decidido pasar al sistema métrico decimal. (N. del T.)

conveniencia de la elección de las unidades ejemplares, escogiéndolas de la naturaleza, no se puede realizar por completo. Unas mediciones más exactas, realizadas en el siglo XIX, demostraron que el patrón del metro es de 0.08 milímetros más corto que la cuarenta millonésima parte del meridiano terrestre. Quedó claro que con el desarrollo de la técnica de las mediciones se irán haciendo nuevas correcciones. Conservando la definición de metro como una parte del meridiano terrestre habría que preparar nuevos patrones y calcular de nuevo todas las longitudes, siempre que hiciésemos nuevas mediciones del meridiano. Por eso, después de los debates en los congresos internacionales, en los años 1870, 1872 y 1875, se decidió no tomar por unidad de longitud la cuarenta millonésima parte del meridiano, sino el patrón de metro fabricado en el año 1799, que se conserva ahora en la oficina internacional de pesas y medidas de París.

Aquí no acaba la historia del metro. Actualmente, la definición de esta magnitud fundamental se basa en nuevas ideas físicas. La medida de longitud se reproduce otra vez de la naturaleza, pero de una manera más sutil. Con el metro, aparecieron sus divisiones: una milésima, llamada milímetro, una millonésima, llamada micrón, y la que más frecuentemente se usa, una centésima, el centímetro.

Digamos ahora unas cuantas palabras sobre el segundo. Ésta es una medida más vieja que el centímetro. Al establecer la unidad de medida del tiempo no hubo ninguna discrepancia. Esto es comprensible: la alternación del día y la noche, la rotación eterna del Sol, señalan un método natural de elección de la unidad de tiempo. Para todos es bien conocida la expresión: «determinar el tiempo por el Sol». Si el Sol está alto en el cielo, quiere decir que es mediodía y, midiendo la longitud de la sombra que proyecta un jalón, resulta fácil determinar el instante en que el Sol se encuentra en el punto más alto. De este mismo modo, al día siguiente se puede señalar el mismo instante. El intervalo transcurrido de tiempo forma un día. Y luego, no queda más que dividir el día en horas, minutos y segundos.

Las unidades grandes de medición, el año y el día, las proporciona la misma naturaleza. Pero la hora, el minuto y el segundo, son inventadas por el hombre.

La división actual del día proviene desde tiempos muy remotos. En Babilonia no estaba difundido el sistema decimal, sino el sexagesimal. Sesenta se divide por 12; de aquí que en Babilonia dividieran el día en doce partes iguales.

En el Egipto antiguo se introdujo la división del día en 24 horas. Más tarde aparecieron los minutos y los segundos. El hecho de que la hora tenga 60 minutos y el minuto 60 segundos, también se debe al sistema sexagesimal de Babilonia.

En los tiempos antiguos y en la Edad Media, el tiempo se medía con relojes de sol, de agua (por el tiempo que tardaba en caer el agua de recipientes grandes) y con otros ingeniosos dispositivos de poca exactitud.

Sirviéndose de los relojes modernos es fácil comprobar que, en diferentes épocas del año, los días no son exactamente iguales. Por consiguiente, se ha convenido tomar por unidad de medida del tiempo, el día solar medio durante un año. Una veinticuatroava parte de este día medio se llama hora.

Sin embargo, cuando se estableció la unidad de tiempo, la hora, el minuto y el segundo, dividiendo el día en partes iguales, se supuso que la rotación de la Tierra era uniforme. Sin embargo, las mareas lunares-solares de los océanos retrasan la rotación de la Tierra aunque no sea más que en una pequeñísima parte. Por lo tanto, nuestra unidad de tiempo, el día, incesantemente se alarga.

Este retraso de la rotación de la Tierra es tan ínfimo, que fue posible registrarlo directamente tan sólo hace poco tiempo, cuando se inventaron los relojes atómicos, los cuales pueden medir con gran exactitud los intervalos de tiempo de hasta millonésimas partes de segundo. La variación del día alcanza 1-2 milésimas de segundo durante 100 años.

Pero, de ser posible, el patrón tiene que carecer, incluso, de un error tan insignificante. Según la última definición, el segundo es $\frac{1}{31556925.9747}$ de un año completamente determinado, pero ya no es una parte del día solar medio.

Peso y masa

Se llama peso, a la fuerza con que un cuerpo es atraído por la Tierra. Esta fuerza se puede medir con balanzas de resorte. Cuanto más pesa el cuerpo, tanto más se expande el resorte en que está suspendido. El resorte se puede graduar mediante una pesa, tomada por unidad, marcando la expansión del resorte a consecuencia de la acción de las pesas de uno, dos, tres, etc., kilogramos. Si colocamos después un cuerpo en esta balanza, por la expansión del resorte podremos hallar la fuerza de su atracción por la Tierra, expresada en kilogramos (Fig. 1, a). Para medir los pesos, no sólo se utilizan los resortes de expansión, sino también los de compresión (Fig. 1, b). Empleando resortes de diferente calibre se pueden preparar balanzas para la medición de pesos muy grandes y muy pequeños. Se basa en este principio, no sólo la balanza de tendero, de poca exactitud, sino también la construcción de muchos instrumentos exactos que se emplean en las mediciones físicas.

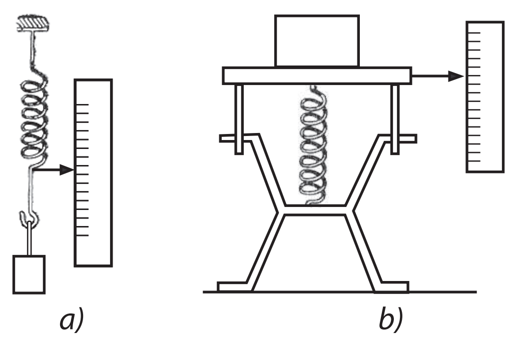


Fig. 1

Un resorte graduado, no sólo sirve para medir la fuerza de la atracción terrestre, o sea, el peso, sino también para la medición de otras fuerzas. Este instrumento se llama dinamómetro, que quiere decir medidor de fuerzas. Muchos habrán visto cómo se emplea el dinamómetro para medir la fuerza muscular del hombre. También se puede medir la fuerza de arrastre de un motor con un resorte de alargamiento (Fig. 2).

Una propiedad muy importante de un cuerpo es su peso. Sin embargo, el peso no depende solamente del mismo cuerpo. A éste le atrae la Tierra. ¿Y si estuviésemos en la Luna? Claro que su peso sería otro; como muestran los cálculos, éste sería, aproximadamente, 6 veces menor. Hasta en la misma Tierra es diferente el peso en diversas latitudes. Por ejemplo, un cuerpo pesa en el polo un 0.5 % más que en el ecuador.

A pesar de su variabilidad, el peso posee una propiedad particular admirable: como comprueban los experimentos, la razón de los pesos de dos cuerpos, en condiciones cualesquiera, permanece constante. Si dos cuerpos diversos alargan igual el resorte en el polo, esta igualdad se conservará con la misma exactitud en el ecuador.

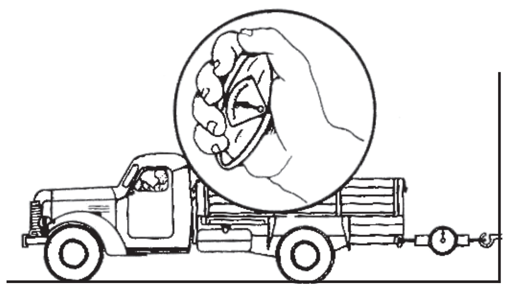


Fig. 2

Al medir el peso, comparándolo con el peso patrón, se halla una nueva propiedad del cuerpo, llamada masa.

El sentido físico de este nuevo concepto, de la masa, está estrechamente ligado a la igualdad que acabamos de señalar al comparar los pesos.

A diferencia del peso, la masa es una propiedad intrínseca del cuerpo, que no depende de nada más que del mismo cuerpo.

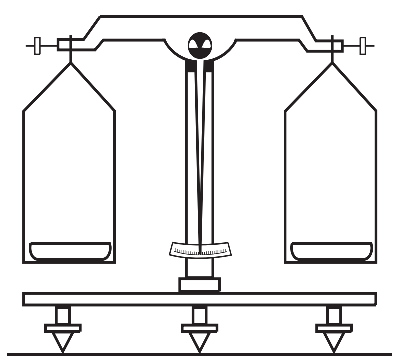


Fig. 3

La comparación de los pesos, o sea, la medición de las masas, es más cómodo realizarla mediante una simple balanza de palanca (Fig. 3). Se dice que las masas de dos cuerpos son iguales, si al colocarlos en diversos platillos de una balanza de palanca, éstos quedan rigurosamente equilibrados. Si un cuerpo se ha pesado en una balanza de resorte en el ecuador y, después, el cuerpo y las pesas se han trasladado al polo, resultará que la alteración de sus pesos es igual. El resultado de pesar en el polo es equivalente: los pesos se mantienen en equilibrio.

Podemos ir a la Luna a comprobar esta afirmación. Como tampoco varía allí la razón de los pesos de los cuerpos, el cuerpo colocado en una balanza de palanca queda equilibrado con las mismas pesas. En donde quiera que se encuentre el cuerpo, su masa es la misma.

Las unidades de masa y de peso están ligadas con la elección de la pesa patrón. Del mismo modo que en la historia del metro y del segundo, los hombres procuraron hallar un patrón de masa natural. La misma comisión preparó una pesa de una aleación determinada que se mantuvo en equilibrio, en una balanza de palanca, con un decímetro cúbico de agua, a cuatro grados centígrados[2]. Este patrón tomó el nombre de kilogramo.

Sin embargo, más tarde, quedó claro que no es tan fácil «tomar» un decímetro cúbico de agua. En primer lugar, el decímetro, como parte del metro, se alteraría junto con cada precisión que se hiciese del metro patrón. En segundo lugar, ¿qué agua tiene que ser? ¿Químicamente pura? ¿Dos veces destilada? ¿Sin partículas de aire? Y, ¿qué hacer con las mezclas de «agua pesada»? El colmo de todas las desgracias es que la exactitud en las mediciones de los volúmenes es considerablemente menor que la exactitud en el peso.

Hubo que desistir otra vez de la unidad natural y tomar por medida de masa la de una pesa preparada especialmente. Esta pesa también se conserva en París junto con el patrón del metro.

Para la medida de masas también se emplean las milésimas y millonésimas partes del kilogramo: el gramo y el miligramo. El peso de la pesa patrón en el paralelo 45 de la Tierra se llama kilogramo fuerza y se designa con kgf; la masa de esta pesa también se llama kilogramo y se designa con kg. La masa de esta pesa en la Luna también será $1\,kg$, su peso será, aproximadamente, $0.17\,kgf$. De este modo, las unidades de medida de la fuerza y de la masa llevan el mismo nombre. Esta circunstancia da lugar a serias confusiones en la interpretación de las «relaciones mutuas» entre el peso y la masa. Para esclarecer estas cuestiones, la Décima y Onceava Asamblea General (año 1960) de pesas y medidas elaboraron un nuevo sistema internacional de unidades (S I), que más tarde fue aprobado por la mayoría de los países. En el nuevo sistema la denominación kilogramo (kg) se conserva para la masa. Toda fuerza, incluyendo, naturalmente, el peso, se mide en el sistema nuevo en newtons. Más adelante veremos por qué se llama así esta unidad y cuál es su definición.

---

[2] La elección de esta temperatura no es casual. Al calentar el agua, su volumen se altera de un modo singular, diferente a la mayoría de los cuerpos. Generalmente, los cuerpos se dilatan al calentarlos; el agua se contrae al elevar la temperatura de 0 a 4^oC y empieza a dilatarse sólo después de pasar de los 4^oC. De este modo, 4^oC es la temperatura a la que el agua termina su contracción y comienza su dilatación.

Sin duda, el nuevo sistema no hallará aplicación inmediatamente en todos los sitios y, por eso, es conveniente recordar, mientras tanto, que el kilogramo masa (kg) y el kilogramo fuerza (kgf) son unidades diferentes y que las operaciones aritméticas entre ellas se deben efectuar igual que con números de diferente denominación.

Escribir $5\,kg + 2\,kgf = 7$ es tan absurdo como sumar metros y segundos.

Densidad

Cuando dicen: es pesado como el plomo o es ligero como una pluma, ¿qué es lo que se tiene en cuenta? Claro que una pizca de plomo es ligera y, a su vez, una montaña de plumas posee una masa apreciable. Quienes hacen comparaciones semejantes no tienen en cuenta la masa, sino la densidad de la substancia, de la que se compone el cuerpo.

Se llama densidad de un cuerpo, a la masa de una unidad de volumen. Naturalmente, la densidad del plomo es la misma en una pizca que en un bloque inmenso.

Generalmente, al indicar la densidad, señalamos los gramos (g) que pesa un centímetro cúbico (cm^3) del cuerpo; después del número ponemos la notación $\frac{g}{cm^3}$. Para determinar la densidad hay que dividir el número de gramos por el número de centímetros cúbicos; la raya del quebrado en la notación nos lo recuerda.

Entre los materiales más pesados se hallan algunos metales, como el osmio, cuya densidad es igual a 22.5 $\frac{g}{cm^3}$, el iridio (22.4), el platino (21.5), el volframio y el oro (19.3). La densidad del hierro es 7.88, la del cobre, 8.93.

Los metales más ligeros son: el magnesio (1.74), el berilio (1.83) y el aluminio (2.70). Entre las substancias orgánicas se pueden encontrar cuerpos todavía más ligeros: diversas variedades de maderas y de masas plásticas pueden tener densidades hasta de 0.4.

Hay que advertir que se trata de cuerpos continuos. No hay duda que, si el cuerpo tiene poros, es más ligero. En la técnica se emplean a menudo cuerpos porosos como el corcho, el cristal espuma, etc. La densidad del cristal espuma puede ser menor de 0.5, a pesar de que la substancia sólida de que está hecho tiene una densidad mayor que la unidad. El cristal espuma, igual que todos los cuerpos cuyas densidades son menores que la unidad, flota perfectamente en el agua.

El líquido más ligero es el hidrógeno líquido; éste se puede obtener sólo a temperaturas muy bajas. La masa de un centímetro cúbico de hidrógeno líquido es 0.07 g. Las densidades de los líquidos orgánicos, como el alcohol, la gasolina, el keroseno se diferencian muy poco de la del agua. El mercurio es muy pesado, su densidad es 13.6 $\frac{g}{cm^3}$.

Y, ¿cómo caracterizar la densidad de los gases? Ya se sabe que los gases ocupan el volumen que se desee. Si una misma masa de gas se expulsa de un balón de gas a recipientes de diverso volumen, éstos se llenan uniformemente. ¿Cómo se puede hablar entonces de densidad?

La densidad de los gases se define en condiciones llamadas normales: la temperatura tiene que ser $0\,^{\circ}C$ y la presión de una atmósfera. La densidad del aire en condiciones normales es igual a 0.00129 $\frac{g}{cm^3}$; la del cloro, a 0.00322 $\frac{g}{cm^3}$.

Así como el hidrógeno líquido, también bate el récord el hidrógeno gaseoso: la densidad de este ligerísimo gas es igual a 0.00009 $\frac{g}{cm^3}$.

El gas que le sigue por ligereza es el helio; éste es dos veces más pesado que el hidrógeno. El gas carbónico es 1.5 veces más pesado que el aire. En Italia, cerca de Nápoles, se encuentra la célebre «cueva de perros»; de su parte inferior constantemente se despide gas carbónico, que se extiende por debajo y sale lentamente de ella. El hombre puede entrar en esta cueva sin dificultades, pero tal paseo acaba mal para el perro. A esto se debe el nombre de la cueva.

La densidad de los gases es muy sensible a las condiciones exteriores: presión y temperatura. La densidad de los gases carece de sentido si no se indican las condiciones exteriores. La densidad de los cuerpos líquidos y sólidos también depende de la temperatura y de la presión, pero no en tal escala.

MIJAÍL LOMONÓSOV (1711–1765), *célebre sabio ruso, iniciador de la ciencia en Rusia, gran enciclopedista. En la ciencia de la física, Lomonósov luchó resueltamente contra las ideas difundidas en el siglo* XVIII, *sobre los «líquidos» eléctricos y calóricos, defendiendo la teoría cinético-molecular de la materia. Por primera vez, demostró experimentalmente la ley de conservación de la masa de las substancias que participan en las transformaciones químicas. Lomonósov realizó amplias investigaciones en la rama de la electricidad atmosférica y en la meteorología. Construyó una serie de admirables instrumentos de óptica, descubrió la atmósfera de Venus. Lomonósov creó los fundamentos de la lengua rusa científica; consiguió, con un acierto extraordinario, traducir del latín los términos físicos y químicos principales.*

Ley de conservación de la masa

Si se disuelve azúcar en agua, la masa de la disolución será exactamente igual a la suma de las masas del azúcar y del agua.

Éste y una infinidad de experimentos semejantes, muestran que la masa de un cuerpo es una propiedad inmutable del mismo. En cualquier división del cuerpo, y en las disoluciones, la masa queda la misma.

Esto mismo tiene lugar también, cualquiera que sea la transformación química. Supongamos, que hemos quemado carbón. Pesando escrupulosamente, podemos determinar que la masa de carbón y de oxígeno del aire que se gastó en la combustión es exactamente igual a la masa de los productos de la misma.

La ley de conservación de la masa se comprobó por última vez a fines del siglo XIX, cuando ya estaba muy desarrollada la técnica de pesos exactos. Resultó que, cualquiera que sea la combinación química, la masa no se altera ni siquiera en una cien mil millonésima parte de su magnitud.

Ya los hombres antiguos suponían que la masa era invariable. El primer experimento efectivo para la comprobación de esta ley se llevó a cabo en el año 1756. Lo hizo Mijaíl Lomonósov, quien señaló la importancia científica de la ley indicada, demostrando en sus experimentos (calentamiento de metales) la conservación de la masa.

La masa es la característica más importante de un cuerpo. La mayoría de las propiedades del cuerpo se hallan, como suele decirse, en manos del hombre. Templando el hierro blando, que previamente se puede doblar con las manos, se convierte en duro y frágil. Mediante el ultrasonido, se puede hacer transparente una solución turbia. Las propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, pueden alterarse a causa de efectos exteriores. Sin embargo, si no se agrega materia al cuerpo y no se separa de él ninguna partícula, es imposible alterar su masa[3], sean las que fueren las acciones exteriores que se efectúen.

Acción y reacción

Ordinariamente, no nos damos cuenta de que cualquier acción de una fuerza va acompañada de una reacción. Si se pone una maleta en una cama de muelles, ésta se encorva. Para todos resulta claro que el peso de la maleta actúa sobre la cama. Sin embargo, a veces, se olvidan que por parte de la cama también actúa una fuerza sobre la maleta. En efecto, la maleta situada en la cama no cae; esto significa que sobre ella, por parte de la cama, actúa una fuerza igual al peso de la maleta y dirigida hacia arriba.

Las fuerzas que llevan la dirección contraria a la fuerza de gravedad se llaman, frecuentemente, reacciones del apoyo. La palabra «reacción» significa «acción contraria». La acción de una mesa sobre un libro colocado en ella, la acción de la cama sobre la maleta, son reacciones del apoyo.

Como vimos anteriormente, el peso de un cuerpo se determina mediante una balanza de resorte. La presión de un cuerpo sobre un resorte colocado debajo de él, o la fuerza con que se expande el resorte en el que está suspendido un cuerpo, son iguales al peso

[3] Sobre ciertas restricciones de esta afirmación, el lector se enterará más adelante.

de éste. Es evidente, sin embargo, que la compresión o expansión del resorte muestra en igual grado la magnitud de la reacción del apoyo.

Así, pues, midiendo con un resorte la magnitud de alguna fuerza, no sólo se mide la magnitud de una, sino de dos fuerzas que llevan direcciones opuestas. Las balanzas de resorte miden la presión del cuerpo sobre los platillos y la reacción del apoyo, o sea, la acción de los platillos de la balanza sobre el cuerpo. Apoyando un resorte en la pared y estirándolo con la mano, se puede medir la fuerza con que la mano tira del resorte y, a la vez, la fuerza con que el resorte tira de la mano.

Por lo tanto, las fuerzas poseen una propiedad admirable: siempre se encuentran a pares, siendo, además, iguales y de direcciones contrarias. Generalmente, estas dos fuerzas se llaman acción y reacción.

En la naturaleza no existen fuerzas «solitarias»; realmente sólo existe la acción mutua entre los cuerpos; además, las fuerzas de acción y de reacción son constantemente iguales, se relacionan entre sí como un objeto a su imagen en el espejo.

No hay que confundir las fuerzas que se equilibran con las de acción y reacción.

Cuando se habla de fuerzas que están en equilibrio, se supone que están aplicadas a un mismo cuerpo; así, el peso de un libro situado sobre la mesa (la acción de la Tierra sobre el libro), se equilibra con la reacción de la mesa (la acción de la mesa sobre el libro).

En contraposición con las fuerzas que aparecen en el equilibrio de dos acciones mutuas, las fuerzas de acción y reacción caracterizan una acción mutua, por ejemplo, la mesa con el libro. La acción es, «la mesa-el libro»; la reacción es, «el libro-la mesa». Claro que estas fuerzas están aplicadas a cuerpos distintos.

Vamos a explicar la confusión tradicional: «un caballo tira de un carro, pero también el carro tira del caballo. ¿Por qué, sin embargo, se mueven?». Ante todo, hay que recordar, que el caballo no arrastraría al carro, si el camino estuviese resbaladizo. Esto significa que para la explicación del movimiento, no hay que tener en cuenta sólo una sino dos acciones mutuas: no sólo «el carro-el caballo», sino también «el caballo-el camino». El movimiento comienza cuando la fuerza de acción mutua del caballo sobre el camino (la fuerza con la que el caballo empuja al camino) se hace mayor que la fuerza de acción mutua, «el caballo-el carro» (la fuerza con la que el carro tira del caballo). En cuanto a las fuerzas «el carro tira del caballo» y «el caballo tira del carro», éstas caracterizan una misma acción mutua y, por consiguiente, serán iguales, lo mismo en reposo que en cualquier instante del movimiento.

Cómo sumar las velocidades

Si yo he estado esperando media hora y una hora más, en total habré perdido hora y media. Si me han dado un rublo y después otros dos más, en total habré recibido tres rublos. Si yo he comprado $200\,g$ de uva y después otros $400\,g$ más, tendré $600\,g$ de uva. Sobre el tiempo, la masa y otras cantidades semejantes, se dice que se suman algebraicamente.

Sin embargo, no todas las cantidades se pueden sumar y restar tan sencillamente. Si yo digo que desde Moscú hasta Kolomna hay $100\,km$, y desde Kolomna hasta Kashira hay 40 km, de aquí no se deduce que Kashira está a la distancia de 140 km de Moscú. Las distancias no se suman algebraicamente.

¿Cómo se pueden sumar de otra manera las cantidades? En nuestro ejemplo, la regla necesaria se halla fácilmente. Señalemos tres puntos en un papel, que indicarán las posiciones relativas de los tres puntos que nos interesa (Fig. 4). Sobre estos tres puntos se puede construir un triángulo. Conociendo dos de sus lados, se puede hallar el tercero. Sin embargo, para eso, hay que conocer el ángulo formado por los dos segmentos dados.

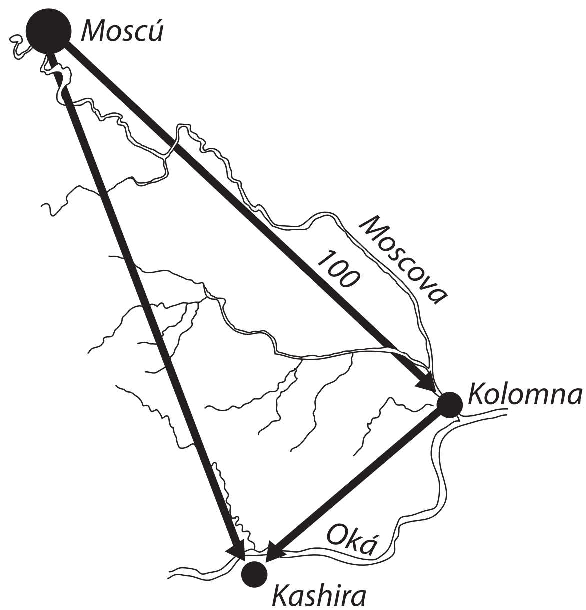


Fig. 4

La distancia desconocida se halla del modo siguiente: marcamos el primer segmento y, desde su extremo, colocamos el segundo en la dirección dada. Unimos ahora el origen del primer segmento con el extremo del segundo. El camino buscado está representado por el segmento que cierra el triángulo.

La suma, efectuada del modo indicado, se llama geométrica y las cantidades que se suman se llaman vectores.

Para distinguir el origen del extremo del segmento, en este último se coloca una flecha. Tal segmento, llamado vector, indica longitud y dirección.

Para sumar más vectores también se emplea esta regla. Pasando del primer punto al segundo, del segundo al tercero, etc., trazaremos el camino que se puede representar mediante una línea quebrada. Pero se puede llegar directamente al mismo punto desde el punto inicial. Este segmento, que cierra el polígono, se llama suma vectorial.

Naturalmente, el triángulo vectorial indica cómo se puede restar un vector de otro. Para esto, los vectores se trazan desde un mismo punto. El vector trazado desde el extremo del segundo hasta el extremo del primero será la diferencia de los vectores.

Además de la regla del triángulo se puede utilizar la regla del paralelogramo, que es equivalente (Fig. 5). Para emplear esta regla hay que construir un paralelogramo sobre los vectores que se suman y trazar una diagonal desde la intersección de éstos. En la figura se ve que la diagonal del paralelogramo cierra el triángulo. Por consiguiente, las dos reglas tienen la misma utilidad.

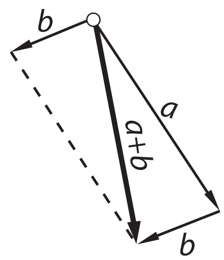


Fig. 5

Los vectores no sólo se utilizan para describir un desplazamiento. Las cantidades vectoriales aparecen frecuentemente en la física.

Veamos, por ejemplo, la velocidad del movimiento. La velocidad es el espacio recorrido en una unidad de tiempo. Como el espacio es un vector, la velocidad es un vector de la misma dirección. Si el movimiento es en línea curva, la dirección de la traslación se altera todo el tiempo. ¿Cómo contestar a la pregunta sobre la dirección de la velocidad? Un segmento pequeño de la curva lleva la dirección de la tangente. Por eso, el trayecto y la velocidad del cuerpo tienen, en cada instante, la dirección de la tangente a la línea del movimiento.

En muchos casos, se suman y restan las velocidades de acuerdo a la regla de los vectores. Cuando el cuerpo participa simultáneamente en dos movimientos, surge la necesidad de la suma de vectores. Tales casos se presentan con frecuencia: un hombre anda por el tren y, además, se mueve junto con él; una gota de agua que va deslizándose por el cristal de la ventana de un vagón se mueve hacia abajo gracias a su peso y viaja junto con el tren; el globo terrestre se mueve alrededor del Sol y junto con el Sol participa en un movimiento con respecto a otras estrellas. En todos estos casos y en casos semejantes, las velocidades se suman según la regla de la suma de vectores.

Supongamos que dos movimientos se efectúan a lo largo de una línea: si ambos movimientos tienen una misma dirección, la suma vectorial se convierte en una suma ordinaria, y en una resta, si los movimientos son contrarios.

¿Y, si los movimientos forman un ángulo entre sí? Entonces recurrimos a la suma geométrica.

Si al atravesar un río de corriente rápida sujetamos el timón transversalmente a la corriente, ésta nos llevará hacia abajo. La lancha participa en dos movimientos: en uno que es transversal al río y en otro que es a lo largo de él. La velocidad resultante de la lancha está representada en la Fig. 6.

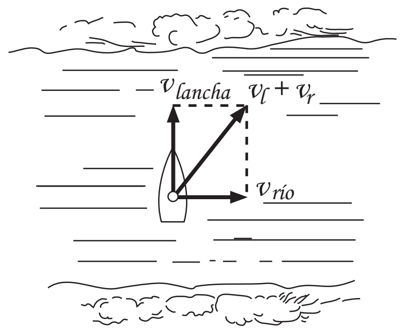


Fig. 6

Un ejemplo más. ¿Qué aspecto tiene el movimiento del agua de la lluvia visto desde la ventana del tren? Seguramente han observado la lluvia desde las ventanas de un vagón. Incluso en un día sin viento, cae con una inclinación, como si la desviase el viento que sopla de frente del tren (Fig. 7).

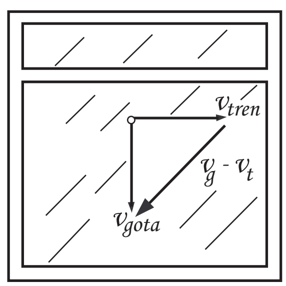


Fig. 7

Si el viento está tranquilo, la gota de la lluvia cae verticalmente. Pero, durante el tiempo de caída a lo largo de la ventana el tren hace un trayecto considerable, se escapa de la línea vertical de caída, por eso, parece que la lluvia cae con inclinación.

Si la velocidad del tren es v_t y la velocidad de caída de la gota es v_g, entonces la velocidad de caída de la gota con relación al pasajero del tren se obtiene restando vectorialmente v_t de v_g[4]. El triángulo de las velocidades está representado en la Fig. 7. La dirección del vector oblicuo señala la dirección de la lluvia; ahora queda claro por qué vemos la lluvia inclinada. La longitud de la flecha oblicua representa la magnitud de esta velocidad en la escala elegida. Cuanto más rápido vaya el tren y cuanto más despacio caiga la gota, tanto más oblicua nos parecerá la lluvia.

[4] Aquí, y a continuación, se señalarán en negrilla las letras que indican los vectores, o sea, las cantidades para las que no sólo son esenciales sus magnitudes, sino también sus direcciones.

La fuerza como vector

La fuerza, igual que la velocidad, es una cantidad vectorial. Ella siempre actúa en una dirección determinada. Por consiguiente, las fuerzas también tienen que sumarse de acuerdo a las mismas reglas que acabamos de exponer.

Frecuentemente observamos en la vida ejemplos que ilustran la suma vectorial de las fuerzas. En la Fig. 8 se muestra un cable del que está suspendido un bulto. Un hombre, tirando de una cuerda, mueve el bulto hacia un lado. El cable que sujeta el bulto se estira a causa de la acción de dos fuerzas: de la fuerza de gravedad del bulto y de la fuerza del hombre.

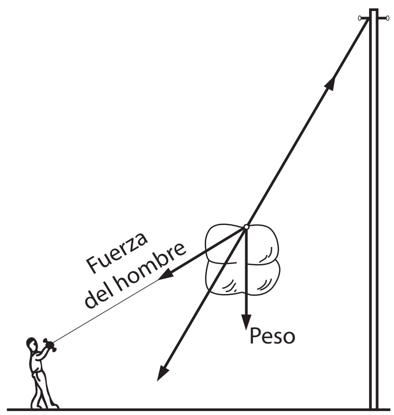


Fig. 8

Por la regla de la suma vectorial de fuerzas se puede determinar la dirección del cable y la fuerza de tensión. Si el bulto está en reposo, la suma de las fuerzas que actúan sobre él es igual a cero. En el caso general, se puede decir que la tensión del cable es igual a la suma de la fuerza de gravedad del bulto y de la fuerza de arrastre que lleva la dirección de la cuerda. Esta suma coincide con la diagonal del paralelogramo y lleva la dirección del cable (en caso contrario, no podría «eliminarse» con la tensión de éste).

La longitud de este vector representa la tensión del cable. Esta fuerza puede sustituir a las dos fuerzas que actúan sobre el bulto. Por eso, la suma vectorial de las fuerzas se llama resultante.

Frecuentemente, surge el problema inverso al de la suma de fuerzas. Una bombilla está colgada de dos cables. Para determinar la fuerza de tensión de los cables hay que descomponer el peso de la bombilla en estas dos direcciones.

Tracemos desde el extremo del vector resultante (Fig. 9) líneas paralelas a los cables hasta la intersección con ellos. El paralelogramo de las fuerzas ya está construido. Midiendo las longitudes de los lados del paralelogramo, hallamos las magnitudes de las tensiones de los cables (en la misma escala en que está representado el peso).

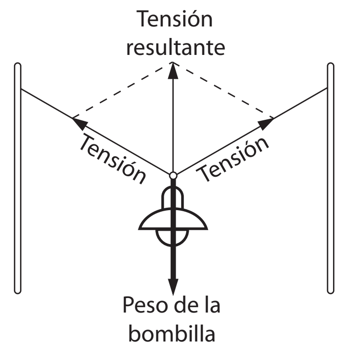


Fig. 9

Esta construcción se llama descomposición de fuerzas. Todo número se puede representar en forma de una suma de dos o más números de una infinidad de modos; esto mismo se puede hacer con un vector de fuerza: cualquier fuerza se puede descomponer en dos fuerzas (que serán los lados del paralelogramo), eligiendo una de ellas como se quiera. También está claro que sobre cada vector se puede construir cualquier polígono.

Con frecuencia se necesita descomponer la fuerza en perpendiculares entre sí, una a lo largo de la dirección que nos interesa, y otra, perpendicular a esta dirección. Éstas se llaman fuerzas componentes, longitudinal y normal (perpendicular).

La componente de una fuerza en alguna dirección, construida mediante la descomposición de la fuerza, sobre los lados del rectángulo, se llama también proyección de la fuerza sobre esta dirección.

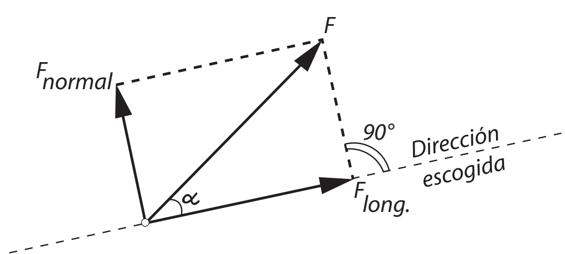


Fig. 10

Es claro que, en la Fig. 10,

$$F^2 = F^2_{\text{long.}} + F^2_{\text{normal}},$$

donde $F_{\text{long.}}$ y F_{normal} son las proyecciones de la fuerza sobre la dirección elegida y sobre la normal a ella.

Por medio de la trigonometría, establecemos sin dificultad que

$$F_{\text{long.}} = F \cdot \cos\ \alpha,$$

donde α es el ángulo formado por la fuerza vector y la dirección en que ella se proyecta.

Un ejemplo muy curioso de descomposición de fuerzas es el movimiento de un barco de vela. ¿De qué modo consigue ir con las velas en contra del viento? Si han tenido la ocasión de observar el movimiento de un yate en estas condiciones, habrán notado que es en zigzag. Los marineros llaman a tal movimiento bordeo.

Claro que es imposible ir con las velas en contra del viento. Pero, ¿cómo se puede ir en contra del viento, aunque sea formando un ángulo?

La posibilidad de bordear en contra del viento se basa en dos circunstancias. En primer lugar, el viento siempre empuja a la vela formando un ángulo recto con su plano. Véase la Fig. 11, *a*; la fuerza del viento se ha descompuesto en dos componentes: una de ellas obliga al aire a deslizarse a lo largo de la vela, la otra, la componente normal, efectúa una presión sobre la vela. En segundo lugar, el yate no se mueve hacia donde le empuja la fuerza del viento, sino hacia donde mira la proa.

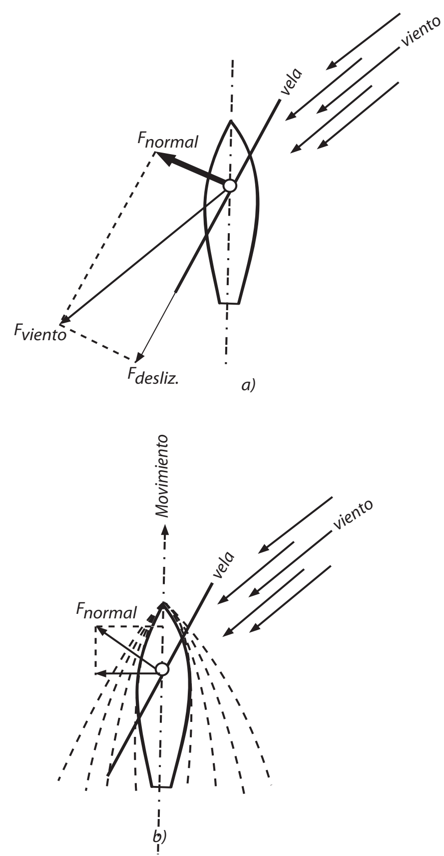


Fig. 11

La explicación está en que el movimiento transversal del yate con respecto a la línea de la quilla, encuentra una resistencia muy fuerte del agua. Por consiguiente, para que el yate se mueva con la proa hacia adelante, es necesario que la fuerza de presión sobre la vela tenga una componente a lo largo de la línea de la quilla que mire hacia adelante.

Ahora tiene que quedar clara la Fig. 11, *b*, en la que está representado un yate que va en contra del viento. La vela se coloca de modo que su plano divida por la mitad el ángulo formado por la dirección del movimiento del yate y la dirección del viento.

Para hallar la fuerza que hace avanzar al yate, habrá que descomponer dos veces la fuerza del viento. Primero, a lo largo y perpendicularmente a la vela (sólo tiene importancia la componente normal), después, hay que descomponer esta componente normal a lo largo y transversalmente a la línea de la quilla. La componente longitudinal, es la que hace avanzar al yate formando un ángulo con el viento.

Plano inclinado

Todos sabemos que es más difícil vencer una cuesta empinada que una pendiente de pequeño declive. Es más fácil hacer rodar un cuerpo por un plano inclinado hasta cierta altura que levantarle verticalmente. ¿Por qué esto es así y en cuánto es más fácil? La ley de la suma de fuerzas nos ayuda a dilucidar estas cuestiones.

En la Fig. 12 está representada una carretilla con ruedas, que se mantiene quieta en un plano inclinado gracias a la tensión de una cuerda. Además de la tracción, sobre la carretilla actúan dos fuerzas más: el peso y la fuerza de reacción del apoyo, que siempre actúa en dirección de la normal a la superficie, independientemente de que la superficie de apoyo sea horizontal o inclinada.

Como ya se dijo, si un cuerpo presiona sobre un apoyo, el apoyo reacciona sobre la presión, o como suele decirse, crea una fuerza de reacción.

Nos interesa saber cuánto más fácil es levantar la carretilla por el plano inclinado que verticalmente.

Descompongamos las fuerzas de modo que una vaya a lo largo y la otra sea perpendicular a la superficie por la que se mueve el cuerpo. Para que el cuerpo quede en reposo en el plano inclinado, la fuerza de tensión de la cuerda tiene que equilibrarse solamente con la componente longitudinal. La segunda componente se equilibra con la reacción del apoyo.

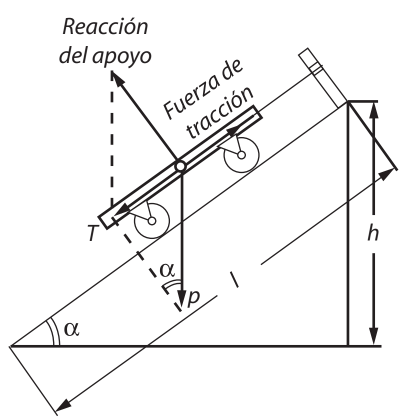


Fig. 12

La fuerza que nos interesa de la tensión T de la cuerda, se puede hallar por construcción geométrica o mediante la trigonometría. La construcción geométrica consiste en trazar una perpendicular al plano desde el extremo del vector peso P.

En la figura se pueden hallar dos triángulos semejantes. La razón de la longitud l del plano inclinado a la altura h es igual a la razón de los lados correspondientes del triángulo de las fuerzas. Así pues,

$$\frac{T}{P} = \frac{h}{l}.$$

Es natural que cuanto menos inclinación tenga el plano ($\frac{h}{l}$ no es grande), tanto más fácil será llevar el cuerpo hacia arriba.

Y ahora, por trigonometría: como el ángulo entre la componente transversal del peso y el vector del peso es igual al ángulo α del plano inclinado (estos ángulos tienen lados perpendiculares entre sí), se tiene

$$\frac{T}{P} = \operatorname{sen}\alpha \quad \text{y} \quad T = P \operatorname{sen}\alpha.$$

Resumiendo, es $\operatorname{sen}\alpha$ veces más fácil hacer rodar la carretilla por un plano de inclinación α que levantarla verticalmente.

Conviene recordar los valores de las funciones trigonométricas para los ángulos de 30°, 45° y 60°. Conociendo estos valores para el seno ($\operatorname{sen} 30^{\circ} = \frac{1}{2}$; $\operatorname{sen} 45^{\circ} = \frac{\sqrt{2}}{2}$; $\operatorname{sen} 60^{\circ} = \frac{\sqrt{3}}{2}$), podremos hacernos una idea sobre lo que se gana en trabajo en el movimiento por un plano inclinado.

Por las fórmulas se ve que, cuando el ángulo de inclinación del plano es de 30°, nuestros esfuerzos equivalen a la mitad del peso: $T = \frac{1}{2}P$. Si el ángulo es de 45° o de 60°, habrá que tirar de la cuerda con fuerzas, aproximadamente, iguales a 0.7 y 0.9 del peso de la carretilla. Como se ve, los planos de gran inclinación proporcionan pocas facilidades.

II. Las leyes del movimiento

Diversos puntos de vista sobre el movimiento

Una maleta está situada sobre la cama de un vagón, mas, a la vez, aquélla se mueve con el tren. Una casa está situada en la Tierra, pero, a la vez, se mueve con ella. Sobre un mismo cuerpo se puede decir: se mueve en línea recta, está en reposo, está girando. Todas estas opiniones son ciertas, pero desde diferentes puntos de vista.

No sólo el cuadro del movimiento, sino que hasta las propiedades del movimiento pueden ser completamente diferentes si se las examina desde diversos puntos de vista.

Recuerden lo que ocurre con los objetos en un barco que sufre un balanceo. ¡Hasta qué punto son desobedientes! Cae el cenicero que estaba sobre la mesa y rueda precipitadamente bajo la cama. El agua de la jarra salpica y la bombilla se balancea como si fuese un péndulo. Unos objetos se ponen en movimiento y otros se detienen sin causas aparentes. Un observador situado en este barco podría decir que la ley del movimiento consiste en que, un objeto que no está sujeto, en cualquier instante puede desplazarse en cualquier dirección y con velocidad diversa.

Este ejemplo muestra que entre los diversos puntos de vista que existen sobre el movimiento, hay algunos que son evidentemente incómodos.

¿Qué punto de vista es el más «racional»?

Si, de repente, sin más ni más, se inclinase la lámpara de la mesa, o si pegase un salto el pisapapeles, se podría creer que fue un milagro lo sucedido. Si se repitiesen estos milagros, empezaríamos a buscar con ahínco la causa que altera el estado de reposo de estos cuerpos.

Es natural, por lo tanto, suponer racional el punto de vista sobre el movimiento, según el cual, sin actuación de fuerzas no se mueven los cuerpos que están en reposo.

Tal punto de vista parece muy natural: si un cuerpo está en reposo, la suma de las fuerzas que actúan sobre él es igual a cero. Si se ha movido de su sitio, la causa se debe a la acción de las fuerzas.

El punto de vista supone que hay un observador. Sin embargo, a nosotros no nos interesa el observador, sino el lugar donde éste se encuentra. Por eso, en vez de decir «punto de vista sobre el movimiento», se dirá: «sistema de referencia, con respecto al cual se estudia el movimiento», o abreviadamente, «sistema de referencia».

Para nosotros, habitantes de la Tierra, ésta representa un sistema de referencia importante. Sin embargo, frecuentemente, pueden servir de sistemas de referencia los cuerpos que se mueven en la Tierra, como un barco o un tren.

Volvamos ahora al «punto de vista» sobre el movimiento que llamábamos racional. Este sistema de referencia tiene un nombre: se llama inercial.

Más adelante se verá el origen de este término.

Por consiguiente, las propiedades del sistema inercial de referencia son: los cuerpos que están en reposo, con respecto a este sistema, no sufren ninguna acción de fuerzas. Por lo tanto, en este sistema no empieza ningún movimiento sin participación de fuerzas. La sencillez y comodidad de este sistema resulta evidente. Claro que merece la pena tomarlo como base.

Es de suma importancia el hecho de que el sistema de referencia ligado con la Tierra no difiere mucho del sistema inercial. Por eso, podemos comenzar el estudio de las leyes fundamentales del movimiento considerándolo desde el punto de vista de la Tierra. Sin embargo, hay que recordar que, hablando con rigurosidad, todo lo que se diga en el párrafo siguiente se relaciona a un sistema inercial de referencia.

Ley de inercia

Es indudable que el sistema inercial de referencia es cómodo y tiene ventajas inapreciables.

Pero, ¿es único este sistema, o puede ser que existan muchos sistemas inerciales? Los griegos antiguos mantenían el primer punto de vista. En sus obras hallamos muchas ideas inocentes sobre las causas del movimiento. En las obras de Aristóteles encontramos un resumen de estas ideas. Según opina este filósofo, la situación natural de un cuerpo es el estado de reposo; por supuesto con relación a la Tierra. Cualquier desplazamiento del cuerpo con relación a la Tierra tiene que tener una causa: la fuerza. Si no hay causas para el movimiento, el cuerpo tiene que detenerse y pasar a su situación natural. Y tal situación es el estado de reposo con relación a la Tierra. Desde este punto de vista, la Tierra es el único sistema inercial.

Al gran sabio italiano Galileo Galilei (1564−1642) debemos el descubrimiento de la verdad; él rebatió esta idea errónea que estaba muy cerca de la psicología ingenua.

Reflexionemos sobre la explicación del movimiento dada por Aristóteles y busquemos en los fenómenos conocidos la afirmación o refutación de la idea sobre el reposo natural de los cuerpos situados en la Tierra.

Figurémonos que estamos en un avión que ha salido del aeropuerto por la madrugada. El Sol todavía no ha calentado el aire, no hay «baches» tan desagradables para los pasajeros. El avión vuela suavemente, casi ni lo sentimos. Si no se mira por la ventanilla, no se da uno cuenta de que está volando. Sobre un asiento libre está situado un libro; sobre una mesa, fija en el piso del avión, está inmóvil una manzana. Dentro del avión todos los objetos están quietos. ¿Será, pues, verdad, que tiene la razón Aristóteles? Claro que no, ya que según Aristóteles, la posición natural de un cuerpo es el reposo respecto a la Tierra. ¿Por qué, entonces, no se han agrupado todos los objetos en la pared de atrás del avión, tendiendo a retrasarse de su movimiento, «queriendo» pasar a la posición de reposo «verdadero»? ¿Qué es lo que obliga a la manzana situada sobre la mesa, que casi no se toca con la superficie de ella, a moverse con la gran velocidad de cientos de kilómetros por hora?

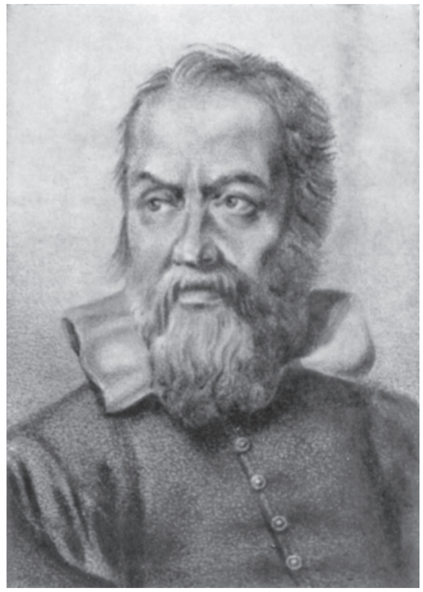
¿Cuál es la verdadera solución del problema de averiguación de la causa del movimiento? Veamos primero por qué se paran los cuerpos en movimiento. Por ejemplo, ¿por qué se para una bola que rueda por la Tierra? Para dar una respuesta correcta hay que pensar en qué casos se para ligeramente y en qué casos lentamente. Para esto no hacen falta experimentos especiales. Por la experiencia de la vida se sabe perfectamente que, cuanto más lisa sea la superficie por la que se mueve la bola, tanto más lejos rodará ésta. De éstos y otros experimentos semejantes se crea la idea natural sobre la fuerza de rozamiento como obstáculo al movimiento, como la causa del freno del objeto que rueda o resbala por la Tierra. El rozamiento se puede disminuir de muchas maneras. Cuanto más nos ocupemos de eliminar todas las resistencias al movimiento (con un buen engrasamiento, empleando cojinetes perfectos, moviéndose por un camino liso), tanto mayor será el espacio recorrido libremente por el cuerpo en movimiento, sin actuación de fuerzas.

Surge la pregunta: ¿qué ocurriría si no hubiese resistencia, si estuviesen ausentes las fuerzas de rozamiento? Es evidente que, en este caso, el movimiento se prolongaría indefinidamente con una velocidad constante y a lo largo de una misma línea recta.

Hemos enunciado la ley de inercia, aproximadamente igual que lo hizo por vez primera Galileo. La inercia es la indicación abreviada de esta facultad del cuerpo de moverse uniformemente en línea recta... sin ninguna causa, a pesar de Aristóteles. La inercia es una propiedad intrínseca de todas las partículas del Universo.

¿De qué modo se puede comprobar la justeza de esta ley admirable? Hay que tener presente que no se pueden crear condiciones para que no actúe sobre el cuerpo ninguna fuerza. Esto es cierto, pero, sin embargo, se puede observar lo recíproco. En cualquier caso, cuando el cuerpo cambia la velocidad o la dirección del movimiento, siempre se puede hallar la causa, es decir, la fuerza a que se debe esta alteración. Un cuerpo, cayendo a la Tierra, adquiere velocidad; la causa es la fuerza de atracción de la Tierra. Una piedra da vueltas en una cuerda describiendo una circunferencia; la causa que desvía la piedra del movimiento rectilíneo es la tensión de la cuerda. Si se rompe la cuerda, la piedra vuela en la misma dirección que se movía en el instante del rompimiento de la cuerda. Un automóvil que va con el motor parado retarda su movimiento; la causa es la resistencia del aire, el rozamiento de los neumáticos con el camino y las deficiencias de los cojinetes.

La ley de la inercia es el fundamento sobre el cual se basa la ciencia del movimiento de los cuerpos.



GALILEO GALILEI (1564–1642)*, gran físico y astrónomo italiano que por vez primera empleó el método experimental de investigación en la ciencia. Galileo introdujo el concepto de inercia; estableció la relatividad del movimiento; estudió las leyes de la caída de los cuerpos y del movimiento de éstos por un plano inclinado; las leyes del movimiento, al lanzar un objeto formando cierto ángulo con el horizonte; aplicó el péndulo para la medida del tiempo. Fue el primero en la historia de la humanidad, en dirigir al cielo el telescopio, descubriendo todo un conjunto de nuevas estrellas; demostró que la Vía Láctea se compone de un gran número de estrellas; descubrió los satélites de Júpiter, las manchas solares, la rotación del Sol; estudió la estructura de la superficie lunar. Galileo era partidario activo del sistema heliocéntrico de Copérnico, prohibido en aquellos tiempos por la iglesia católica. Las persecuciones por parte de la inquisición amargaron los últimos años de la vida de este célebre sabio.*

El movimiento es relativo

La ley de la inercia nos lleva a la conclusión de la pluralidad de los sistemas inerciales. No uno, sino un conjunto de sistemas de referencia excluyen los movimientos «sin causa».

Si se ha hallado uno de estos sistemas, inmediatamente se hallará otro que participa en un movimiento de traslación (sin rotación), uniforme y rectilíneo con respecto al primero. Además, ninguno de los sistemas inerciales es preferente a los demás, en nada se diferencia de los otros. En el conjunto de los sistemas inerciales no se puede hallar uno que sea el mejor. Las leyes del movimiento de los cuerpos son iguales en todos los sistemas inerciales: los cuerpos se ponen en movimiento a causa de la acción de fuerzas, se frenan debido a fuerzas, y, si están libres de la acción de las fuerzas, se mantienen en reposo o en movimiento uniforme y rectilíneo.

La imposibilidad de poder elegir un sistema inercial con preferencia ante los demás mediante algún experimento, representa la esencia del principio de relatividad de Galileo, que es una de las principales leyes de la física.

Aún más, aunque sean completamente equivalentes los puntos de vista de los observadores que estudian los fenómenos en dos sistemas inerciales, sus opiniones sobre un mismo suceso son diferentes. Por ejemplo, si uno de los observadores afirma que la silla, en la que él está sentado en un tren en movimiento, está constantemente en un lugar del espacio, el otro observador, que se encuentra fuera del tren, afirmará que es la silla la que se desplaza de un lugar a otro. O, por ejemplo, si uno de los observadores, al disparar con un fusil, afirma que la bala lleva la velocidad de 500 $\frac{m}{seg}$, otro observador, estando en un sistema que se mueve en la misma dirección con la velocidad de 200 $\frac{m}{seg}$, afirmará que la bala lleva una velocidad mucho menor: igual a 300 $\frac{m}{seg}$.

¿Quién de los dos tiene razón? Los dos. En que el principio de relatividad del movimiento no permite dar preferencia a alguno de los sistemas inerciales.

Resulta, pues, que sobre el lugar en el espacio y sobre la velocidad del movimiento no se pueden hacer deducciones generales, indiscutiblemente justas, o como suele decirse, absolutas. Los conceptos de lugar en el espacio y de velocidad del movimiento son relativos. Refiriéndose a tales conceptos relativos, es necesario indicar de qué sistema inercial se trata.

Por lo tanto, la ausencia de un punto de vista unívocamente «justo» sobre el movimiento, nos lleva al reconocimiento de la relatividad del espacio. El espacio se podría llamar absoluto, solamente en el caso de que se pudiese hallar en él un cuerpo que estuviese en reposo desde el punto de vista de todos los observadores. Pero, precisamente esto es imposible.

La relatividad del espacio significa que a éste no se le puede imaginar como algo en el que están incrustados los cuerpos.

La relatividad del espacio no fue reconocida inmediatamente por la ciencia. Incluso un sabio tan genial como lo fue Newton, suponía que el espacio era absoluto, aunque comprendía que no se podía demostrar esto de ningún modo. Este falso punto de vista estaba muy difundido entre una gran parte de los físicos hasta fines del siglo XIX. Seguramente las causas de esto eran de carácter psicológico: estamos muy acostumbrados a ver inmutables, alrededor de sí, «los mismos lugares del espacio».

Veamos ahora qué deducciones absolutas se pueden proponer sobre el carácter del movimiento.

Si los cuerpos se mueven con las velocidades v_1 y v_2, con respecto a un sistema de referencia, la diferencia $v_1 - v_2$ (naturalmente, vectorial) será igual para cualquier observador inercial, puesto que, al variar el sistema de referencia, las dos velocidades, v_1 y v_2, se alteran en igual magnitud.

Así pues, la diferencia vectorial de las velocidades de dos cuerpos es absoluta. Siendo esto así, es absoluto también el vector del incremento de la velocidad de un mismo cuerpo durante un intervalo determinado de tiempo, es decir, su magnitud es igual para todos los observadores inerciales.

La rotación de un cuerpo, igual que la variación de la velocidad, es de carácter absoluto. La dirección de la rotación y el número de revoluciones por minuto son iguales desde el punto de vista de todos los sistemas inerciales.

El punto de vista de un observador estelar

Hemos decidido estudiar el movimiento desde el punto de vista de los sistemas inerciales. ¿No tendremos, entonces, que negarnos de los servicios de un observador terrestre?

Como demostró Copérnico, la Tierra gira alrededor de su eje y alrededor del Sol. Es probable que le sea difícil al lector percibir el carácter revolucionario del descubrimiento de Copérnico y creer que, por defender sus ideas científicas, Giordano Bruno fue a parar a la hoguera y Galileo fue humillado y desterrado. ¿En qué consiste la hazaña del ingenio de Copérnico? ¿Por qué se puede poner en un mismo plano el descubrimiento de la rotación de la Tierra junto con las ideas de justicia humana, por las que los hombres avanzados estaban dispuestos a dar su vida?

Galileo, en su «Diálogo sobre dos sistemas importantes del mundo, el de Ptolomeo y el de Copérnico» —por cuya obra fue perseguido por la Iglesia— dio el nombre de Simplicio, que quiere decir simplón, al enemigo del sistema de Copérnico.

En efecto, desde el punto de vista de la apreciación espontánea y simple del mundo —no con gran acierto, llamado «sentido común»— el sistema de Copérnico parece absurdo. ¿Cómo que la Tierra da vueltas? ¡Si yo la veo y está inmóvil! Sin, embargo, el Sol y las estrellas, verdaderamente, se mueven.

La reacción de los teólogos ante el descubrimiento de Copérnico lo muestra la siguiente conclusión de su consejo (año 1616):

> «La doctrina de que el Sol está situado en el centro del mundo y no se mueve es falsa y absurda, formalmente herética y adversa a las Sagradas Escrituras, y la doctrina de que la Tierra no está situada en el centro del mundo y además se mueve, experimentando una rotación diaria, es falsa y absurda, desde el punto de vista filosófico y, por lo menos, errónea, desde el punto de vista de la teología».

Esta conclusión, en la que la incomprensión de las leyes de la naturaleza y la fe en los dogmas de la religión se enlazaban con el falso «sentido común», es el mejor testimonio de la fuerza del espíritu y del talento de Copérnico y de sus discípulos, que tan resueltamente rompieron con «las verdades» del siglo XVII.

Pero, volvamos a la cuestión planteada más arriba.

Si la velocidad del movimiento del observador varía o si el observador participa en un movimiento giratorio, éste tiene que ser excluido del grupo de los observadores «verdaderos». Precisamente en esas condiciones se halla el observador situado en la

Tierra. Sin embargo, si mientras se estudia el movimiento, la variación de la velocidad o de la rotación del observador es pequeña, se puede suponer condicionalmente que tal observador es «verdadero». ¿Puede referirse esto a un observador situado en la Tierra?

Durante un segundo la Tierra gira en $\frac{1}{240}$ de un grado, o sea, aproximadamente, en 0.00007 radianes. Esto no es mucho. Por eso, la Tierra, respecto a muchos fenómenos, representa un sistema inercial perfecto.

Sin embargo, para fenómenos de gran duración, no hay que olvidarse de la rotación de la Tierra.

En cierto tiempo, bajo la cúpula de la catedral de Isaac de Leningrado, estaba colgado un péndulo colosal. Poniéndolo en movimiento oscilatorio se podía observar, después de un tiempo breve, que su plano de oscilación giraba lentamente. Después de unas horas el plano de oscilación giraba en un ángulo considerable. Este experimento con el péndulo lo realizó por primera vez el sabio francés Foucault y desde entonces lleva su nombre. El experimento de Foucault es una visible prueba de la rotación de la Tierra (Fig. 13).

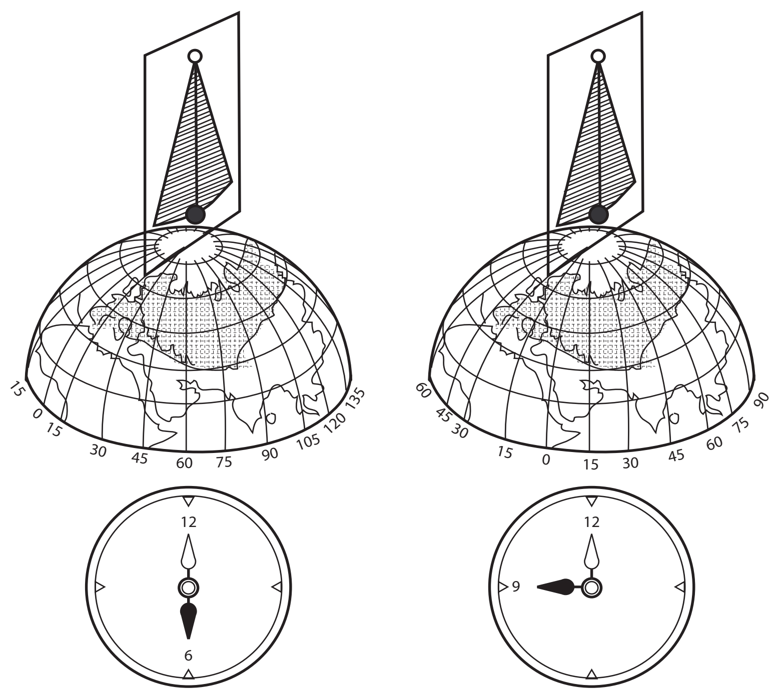


Fig. 13

Así, pues, si el movimiento que se examina es de mucha duración, estaremos obligados a renunciar de los servicios del observador terrestre para recurrir a un sistema de referencia relacionado con el Sol y las estrellas. Tal sistema fue utilizado por Copérnico, que suponía que el Sol y las estrellas que nos rodean estaban inmóviles.

Sin embargo, en realidad, el sistema de Copérnico no es completamente inercial.

El Universo se compone de numerosas conglomeraciones de estrellas, esas islas del

Universo llamadas galaxias. En la galaxia, a la que pertenece nuestro sistema solar, hay aproximadamente cien mil millones de estrellas. El Sol gira alrededor del centro de esta galaxia con un período de 180 millones de años y con la velocidad de 250 $\dfrac{km}{seg}$.

¿Cuál es el error cometido al suponer que el observador solar es inercial?

Para comparar los méritos de los observadores terrestre y solar, calculemos el ángulo de rotación del sistema solar de referencia durante un segundo. Si para dar una vuelta completa se tarda $180 \cdot 10^6$ años ($6 \cdot 10^{15}$ *seg*), el sistema solar de referencia girará en un segundo $6 \cdot 10^{-4}$ de grado o sea, un ángulo 10^{-15} radián. Se puede decir que el observador solar es 100 mil millones de veces «mejor» que el terrestre.

Queriendo aproximarse más a un sistema inercial, los astrónomos toman como base un sistema de referencia relacionado con varias galaxias. Tal sistema de referencia es el más inercial de todos los posibles. Es imposible hallar un sistema mejor.

A los astrónomos se les puede llamar observadores estelares en dos sentidos: ellos examinan las estrellas y describen los movimientos de los astros celestes desde el punto de vista de las estrellas.

La aceleración

Para caracterizar la inconstancia de la velocidad, la física utiliza el concepto de aceleración.

Se llama aceleración a la variación de la velocidad en una unidad de tiempo. En lugar de decir: «la velocidad del cuerpo ha variado en la cantidad a durante 1 segundo», se dirá, abreviadamente: «la aceleración del cuerpo es igual a a».

Si se indica con v_1 la velocidad del movimiento rectilíneo en el primer intervalo de tiempo, y con v_2, la velocidad en el siguiente intervalo, la regla del cálculo de la aceleración a se expresa por la fórmula

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t},$$

en donde t es el tiempo durante el cual aumenta la velocidad.

La velocidad se mide en $\dfrac{cm}{seg}$ (o $\dfrac{m}{seg}$, etc.), el tiempo, en segundos. Por lo tanto, la aceleración se mide en $\dfrac{cm}{seg}$ durante un segundo. El número de centímetros por segundo se divide por los segundos. De este modo, la unidad de aceleración será $\dfrac{cm}{seg^2}$ (o $\dfrac{m}{seg^2}$, etc.).

Sin duda, la aceleración puede variar durante el movimiento. Sin embargo, no vamos a complicar nuestro resumen a causa de esta circunstancia que no es de principio. Simplemente se supondrá que, durante el movimiento, la velocidad aumenta de manera uniforme. Tal movimiento se llama uniformemente acelerado.

¿Qué representa la aceleración en un movimiento curvilíneo?

La velocidad es un vector, la variación (la diferencia) de la velocidad es un vector, por consiguiente, la aceleración también es un vector. Para hallar el vector de la aceleración hay que dividir por el tiempo la diferencia vectorial de las velocidades. Ya se explicó anteriormente cómo se puede construir el vector de la variación de la velocidad.

La carretera da una vuelta. Marquemos dos posiciones próximas de un coche y representemos sus velocidades mediante vectores (Fig. 14). Restando los vectores se obtiene una magnitud, generalmente, diferente de cero; dividiéndola por el tiempo transcurrido se halla la magnitud de la aceleración. Hay aceleración, incluso cuando la magnitud de la velocidad no varía en la vuelta. El movimiento curvilíneo siempre es acelerado. Solamente no es acelerado el movimiento rectilíneo uniforme.

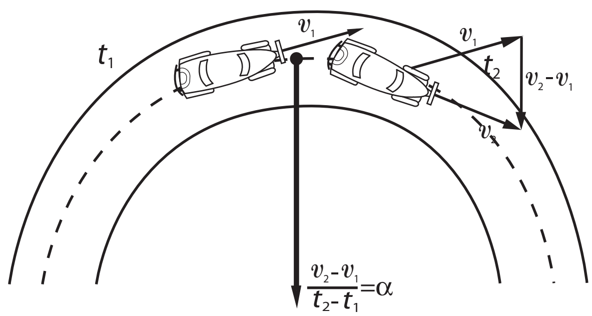


Fig. 14

Refiriéndonos a la velocidad del movimiento de un cuerpo, manteníamos un punto de vista sobre el movimiento. La velocidad de un cuerpo es relativa. Puede ser considerable, desde el punto de vista de un sistema inercial y, pequeña, desde el punto de vista de otro sistema inercial. ¿Hay que hacer tales referencias cuando se habla de la aceleración? Claro que no. En contraposición a la velocidad, la aceleración es absoluta. La aceleración es la misma desde el punto de vista de todos los sistemas inerciales que se puedan imaginar. En efecto, la aceleración depende de la diferencia de las velocidades del cuerpo durante el primero y segundo intervalos de tiempo y, como ya sabemos, esta diferencia es igual desde todos los puntos de vista, o sea, es absoluta.

La aceleración y la fuerza

Un cuerpo que está libre de la acción de fuerzas, sólo puede moverse sin aceleración. Por el contrario, la acción de una fuerza sobre un cuerpo da lugar a la aceleración, y además, ésta es tanto mayor, cuanto mayor sea la fuerza. Cuanto más rápidamente deseemos poner en movimiento una carretilla con una carga, tanto mayor esfuerzo tendremos que hacer. Por regla general, sobre un cuerpo en movimiento actúan dos fuerzas: la aceleradora, que es la fuerza de arrastre, y la que frena, que es la fuerza de rozamiento o de resistencia del aire.

La diferencia de estas dos fuerzas, llamada resultante, puede estar dirigida en la misma dirección o en dirección contraria al movimiento. En el primer caso, el cuerpo acelera el movimiento, en el segundo, lo retarda. Si estas dos fuerzas, que actúan recíprocamente, son iguales entre sí (están en equilibrio), el cuerpo se mantiene en movimiento uniforme, como si sobre él no actuase ninguna fuerza.

¿Qué relación hay entre la fuerza y la aceleración originada por ella? Resulta que la respuesta es muy simple. La aceleración es proporcional a la fuerza:

$$a \propto F.$$

(El signo $\propto$ significa «es proporcional a»)

Pero, queda por resolver una cuestión más: ¿Cómo influyen las propiedades del cuerpo en su capacidad de acelerar el movimiento, a causa de la acción de una u otra fuerza? Ya se sabe que una misma fuerza, actuando sobre diferentes cuerpos, produce diferentes aceleraciones.

La respuesta a la cuestión planteada la da la admirable circunstancia de que todos los cuerpos caen a la Tierra con igual aceleración. Esta aceleración se indica con la letra g. En las cercanías de Moscú, la aceleración es $g = 981\ \dfrac{cm}{seg^2}$.

A primera vista, la observación directa no confirma la igualdad de la aceleración para todos los cuerpos. Es que, en la caída de los cuerpos en las condiciones normales, actúa sobre ellos, además de la fuerza de gravedad, una fuerza que «obstaculiza», ésta es la resistencia del aire. La diferencia en el carácter de la caída de los cuerpos ligeros y pesados desconcertaba a los filósofos de la antigüedad. Un trozo de hierro cae rápidamente pero una pluma planea en el aire. Una hoja de papel abierta desciende lentamente a la Tierra, sin embargo, esta misma hoja, hecha una bola, cae con mayor rapidez. Los griegos de la antigüedad comprendían ya que el aire deformaba el movimiento «verdadero» de los cuerpos, a causa de la acción de la Tierra. Sin embargo, Demócrito creía que, incluso quitando el aire, los cuerpos pesados siempre caerían con mayor rapidez que los ligeros. En realidad, la resistencia del aire puede dar lugar a lo contrario; por ejemplo, una lámina de aluminio (desarrollada ampliamente) cae con más lentitud que una bola enrollada del mismo material.

A propósito, ahora se fabrica un alambre metálico tan fino (de unos cuantos micrones) que planea en el aire como una pluma.

Aristóteles creía que todos los cuerpos tenían que caer del mismo modo en el vacío. Sin embargo, de este silogismo hacía la conclusión paradójica siguiente: «La caída de diversos cuerpos con igual velocidad es tan absurda, que queda clara la imposibilidad de la existencia del vacío».

A ningún sabio de la Antigüedad y de la Edad Media se le ocurrió hacer un experimento para comprobar si los cuerpos caían a la Tierra con aceleraciones iguales o diferentes. Solamente Galileo, con sus maravillosos experimentos (estudiaba el movimiento de las bolas en un plano inclinado y la caída de los cuerpos arrojados desde lo alto de la torre inclinada de Pisa), comprobó que todos los cuerpos, independientemente de su masa, en un mismo lugar del globo terrestre, caen con igual aceleración. Estos experimentos se pueden hacer actualmente con gran facilidad empleando un tubo largo del que se ha extraído el aire. Una pluma y una piedra caen en este tubo con la misma aceleración: los cuerpos solamente sufren la acción de una fuerza, del peso; la resistencia del aire se ha reducido a cero. No existiendo la resistencia del aire, la caída de cualquier cuerpo representa un movimiento uniformemente acelerado.

Volvamos a estudiar la cuestión planteada anteriormente. ¿Cómo depende de sus propiedades la capacidad de un cuerpo de acelerar su movimiento a causa de la acción de una fuerza dada?

La ley de Galileo señala que todos los cuerpos, independientemente de sus masas, caen con la misma aceleración; o sea, una masa de $m\ kg$, impulsada por una fuerza de $m\ kgf$, se mueve con la aceleración g.

Supongamos ahora que no se trata de la caída de los cuerpos, y que una masa de $m\ kg$ sufre la acción de una fuerza de 1 kgf. Como la aceleración es proporcional a la fuerza, aquélla será m veces menor que g.

Llegamos a la conclusión que, estando dada la fuerza (en el caso considerado es de 1 kgf), la aceleración a de un cuerpo es inversamente proporcional a la masa.

Resumiendo, se puede escribir:

$$a = \frac{F}{m},$$

o sea, siendo constante la masa, la aceleración es proporcional a la fuerza y, siendo constante la fuerza, la aceleración es inversamente proporcional a la masa.

La ley que relaciona la aceleración con la masa de un cuerpo y con la fuerza que actúa sobre él, fue descubierta por el gran sabio inglés Isaac Newton (1643−1727) y lleva su nombre[5].

La aceleración es proporcional a la fuerza de acción e inversamente proporcional a la masa del cuerpo y no depende de otras propiedades del cuerpo. De la ley de Newton se deduce que la masa es, precisamente, la medida de «la inercia» del cuerpo. Con fuerzas iguales, es difícil acelerar un cuerpo de mayor masa. Vemos, pues, que el concepto de masa que conocíamos como una magnitud «sencilla» y que se determinaba pesando en una balanza de palanca, toma un nuevo sentido profundo: la masa caracteriza las propiedades dinámicas del cuerpo.

La ley de Newton se puede escribir así:

$$kF = ma,$$

en donde k es un coeficiente constante. Este coeficiente depende de las unidades elegidas.

En vez de utilizar la unidad de fuerza (kgf) que teníamos, procederemos de otro modo. Elegiremos esta unidad, como frecuentemente suelen hacer los físicos, de modo que el coeficiente de proporcionalidad en la ley de Newton sea igual a la unidad. Entonces, la ley de Newton toma la forma siguiente:

$$F = ma.$$

Como ya se dijo, en la física se ha convenido medir la masa en gramos, el espacio en centímetros y el tiempo en segundos. El sistema de unidades basado en estas tres magnitudes principales se llama sistema CGS.

[5] Newton mismo indica que el movimiento está sujeto a tres leyes. La ley a que nos referimos aquí, Newton la llama, segunda. Como primera, él tomaba la ley de inercia, como tercera, la ley de acción y de reacción.

Elijamos ahora la unidad de fuerza, empleando el principio enunciado anteriormente. Es evidente que la fuerza es igual a la unidad, en el caso en que ella comunique a $1\,g$ de masa una aceleración igual a $1\ \dfrac{cm}{seg^2}$. Tal fuerza lleva, en este sistema, el nombre de *dina*.

Según la ley de Newton, $F = ma$, la fuerza se expresa en *dinas* si m gramos se multiplica por $a\ \dfrac{cm}{seg^2}$. Por eso, suele escribirse:

$$1\ dina = 1\ \frac{g \cdot cm}{seg^2}.$$

Generalmente, el peso del cuerpo se indica con la letra P. La fuerza P comunica al cuerpo la aceleración g, y, resulta evidente, que en *dinas*,

$$P = mg.$$

Pero ya teníamos la unidad de fuerza, el kilogramo (kgf). Inmediatamente se halla la relación entre las unidades antigua y nueva, mediante la última fórmula:

$$1 \text{ kilogramo (peso)} = 981\ 000\ dinas.$$

La *dina* es una fuerza muy pequeña. Aproximadamente, es igual a un miligramo de peso.

Ya se mencionó el sistema nuevo de unidades (SI), propuesto recientemente. La denominación de *newton* para la nueva unidad de fuerza es merecida por completo. Con tal elección de la unidad la ley de Newton se escribe de un modo más simple; esta unidad se define así:

$$1\ newton = 1\ \frac{kg \cdot m}{seg^2},$$

o sea, $1\,newton$ es la fuerza que comunica a una masa de $1\ kg$ una aceleración de $1\ \dfrac{m}{seg^2}$.

Es fácil ligar esta nueva unidad con la *dina* y con el kilogramo:

$$1\ newton = \ 100\ 000\ dinas\ \ = \frac{1}{9.8}\ kgf.$$

Movimiento rectilíneo con aceleración constante

Según la ley de Newton, tal movimiento se produce cuando sobre el cuerpo actúa, en su conjunto, una fuerza constante que acelera o frena al cuerpo.

Tales condiciones, aunque no justamente iguales, se crean con bastante frecuencia; un coche que va con el motor parado, frena gracias a la acción de la fuerza de rozamiento, que es casi constante; un cuerpo pesado cae desde una altura a consecuencia de la acción de la fuerza de gravedad, que es constante.

Conociendo la magnitud de la fuerza resultante y la masa del cuerpo, hallamos la magnitud de la aceleración mediante la fórmula, $a = \dfrac{F}{m}$. Como

$$a = \frac{v - v_0}{t},$$

en donde t es el tiempo del movimiento; v, la velocidad final y v_0, la velocidad inicial, podemos, mediante esta fórmula, responder a una serie de preguntas del carácter siguiente, por ejemplo: ¿cuánto tiempo tarda el tren en pararse, si se conoce la fuerza al freno, la masa del tren y la velocidad inicial? ¿Qué velocidad alcanzará el automóvil, si se conoce la fuerza del motor, la fuerza de resistencia, la masa del coche y el tiempo de la carrera?

Frecuentemente, suele ser interesante conocer la longitud del trayecto recorrido por un cuerpo en un movimiento uniformemente acelerado. Si el movimiento es uniforme, el espacio recorrido se halla multiplicando la velocidad por el tiempo del movimiento. Si el movimiento es uniformemente acelerado, el cálculo de la magnitud del espacio recorrido se efectúa como si el cuerpo se moviese uniformemente durante el mismo tiempo t, con una velocidad igual a la semisuma de las velocidades final e inicial

$$S = \frac{1}{2}\,(v_0 + v)\,t.$$

Así pues, el espacio recorrido por el cuerpo en un movimiento uniformemente acelerado (o retardado), es igual al producto de la semisuma de las velocidades final e inicial por el tiempo del movimiento. Este mismo espacio se recorrería durante el mismo tiempo en un movimiento uniforme con la velocidad $\frac{1}{2}\,(v_0 + v)$. En este sentido, se puede decir que $\frac{1}{2}\,(v_0 + v)$ es la velocidad media del movimiento uniformemente acelerado. Sería conveniente hallar una fórmula que mostrase la dependencia del espacio recorrido de la aceleración. Sustituyendo en la última fórmula, el valor de v por $v = v_0 + at$, hallamos:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2},$$

o, si el movimiento se efectúa sin velocidad inicial,

$$S = \frac{at^2}{2}.$$

Si el cuerpo recorre 5 m en un segundo, en dos segundos recorrerá (4×5) m, en tres segundos (9×5) m, etc., etc. El espacio recorrido crece proporcionalmente al cuadrado del tiempo.

Un cuerpo pesado cae desde una altura de acuerdo con esta ley. La aceleración en la caída libre es igual a g y la fórmula toma la forma siguiente:

$$S = \frac{981}{2} \times t^2 \;\; [cm]\,,$$

si t se da en segundos.

Si el cuerpo pudiese caer sin obstáculos durante 100 segundos, recorrería, desde el comienzo de la caída, un espacio grandísimo, alrededor de 50 km. Además, en los primeros 10 segundos recorre solamente $\frac{1}{2}$ km. He aquí lo que significa la aceleración del movimiento.

Pero, ¿qué velocidad desarrollará el cuerpo al caer de una altura dada? Para contestar a esta pregunta necesitamos saber la fórmula que relaciona el espacio recorrido con la aceleración y la velocidad. Sustituyendo en la fórmula $S = \frac{1}{2}(v_0 + v)\,t$, el valor del tiempo del movimiento $\frac{v_0 - v}{a}$, obtenemos:

$$S = \frac{v^2 - v_0^2}{2a},$$

o, si es que la velocidad inicial es igual a cero,

$$S = \frac{v^2}{2a}, \quad v = \sqrt{2aS}.$$

Diez metros es la altura de una casa no muy grande, de dos o tres pisos. ¿Por qué es peligroso saltar a la Tierra desde el tejado de una casa tal? Un cálculo sencillo muestra que la velocidad de la caída libre alcanza el valor de $v = \sqrt{2 \cdot 9.8 \cdot 10}\ \frac{m}{seg} = 14\ \frac{m}{seg} \approx 50\ \frac{km}{hora}$[6], que es la velocidad de un automóvil en la ciudad.

La resistencia del aire no disminuye mucho esta velocidad.

Las fórmulas deducidas anteriormente se emplean en diversos cálculos. Veamos, con su ayuda, cómo se efectúa el movimiento en la Luna.

En la novela de Wells «Los primeros hombres en la Luna», se describen las sorpresas que experimentan los viajeros en sus paseos fantásticos. La aceleración de la gravedad en la Luna es, aproximadamente, 6 veces menor que la terrestre. Si en la Tierra, un cuerpo que cae, recorre durante el primer segundo 5 m, en la Luna, «navegará» hacia abajo solamente 80 cm (la aceleración es aproximadamente igual a 1.6 $\frac{m}{seg^2}$).

Las fórmulas escritas dan la posibilidad de calcular rápidamente los «milagros» lunares.

Un salto desde la altura h dura el tiempo $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$. Como la aceleración lunar es 6 veces menor que la terrestre, para este salto, en la Luna se necesitará $\sqrt{6} \approx 2.45$ veces más de tiempo.

¿En cuántas veces disminuirá la velocidad final del salto? $\left(v = \sqrt{2gh}\right)$.

En la Luna se puede saltar con seguridad desde el tejado de una casa de tres pisos. La altura del salto aumenta 6 veces, si se ha hecho con la misma velocidad inicial (la fórmula es $h = \frac{v^2}{2g}$). Un niño puede saltar a una altura superior a la del récord terrestre.

La trayectoria de una bala

Desde los tiempos remotos el hombre está resolviendo el problema de lanzar un cuerpo cuanto más lejos posible. La piedra lanzada con la mano o con una honda, la flecha

[6] $\approx$ significa «aproximadamente igual a».

disparada por un arco, la bala de un fusil, el proyectil de artillería, el cohete balístico, he aquí una lista breve de los éxitos obtenidos sobre esta cuestión.

El cuerpo lanzado recorre una línea curva llamada parábola. Es fácil construir esta línea si se considera el movimiento del cuerpo lanzado como una suma de dos movimientos, horizontal y vertical, que son simultáneos e independientes. La aceleración de la fuerza de gravedad es vertical, por eso la bala que vuela se mueve por inercia con velocidad constante en dirección horizontal y, simultáneamente, cae verticalmente a la Tierra con aceleración constante. ¿Cómo sumar estos dos movimientos?

Comencemos por un caso simple, cuando la velocidad inicial es horizontal (por ejemplo, se trata de un disparo de un fusil, el cañón del cual es horizontal).

Tomemos una hoja de papel milimétrico y tracemos una línea horizontal y otra vertical (Fig. 15). Como los dos movimientos son independientes, después de t segundos el cuerpo se desplazará en el segmento hacia la derecha y en el segmento $\frac{gt^2}{2}$ hacia abajo. Marquemos en la horizontal el segmento y desde su extremo, en la vertical, el segmento $\frac{gt^2}{2}$. El extremo del segmento vertical indicará el punto donde se encontrará el cuerpo después de t segundos.

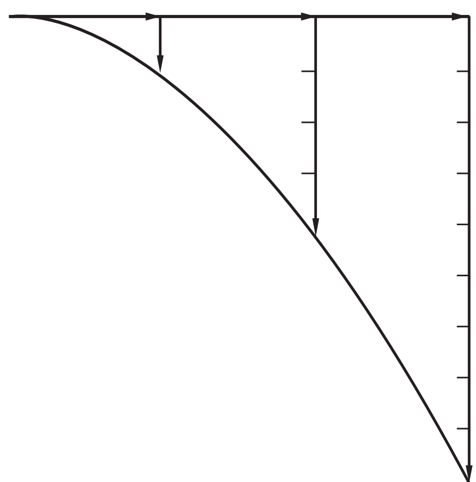


Fig. 15

Esta construcción hay que realizarla para unos cuantos puntos, o sea, para unos cuantos instantes de tiempo. Por estos puntos pasará una línea continua, la parábola que describe la trayectoria del cuerpo. Cuanto más frecuentemente estén marcados los puntos, tanto mayor será la precisión con que se construirá la trayectoria del vuelo de la bala.

En la Fig. 16 está trazada la trayectoria para el caso cuando la velocidad inicial v_0 forma cierto ángulo.

Ante todo, se debe de descomponer el vector v_0 en las componentes vertical y horizontal. En la línea horizontal se marca, $v_{hor}t$ que es el desplazamiento horizontal de la bala durante t segundos.

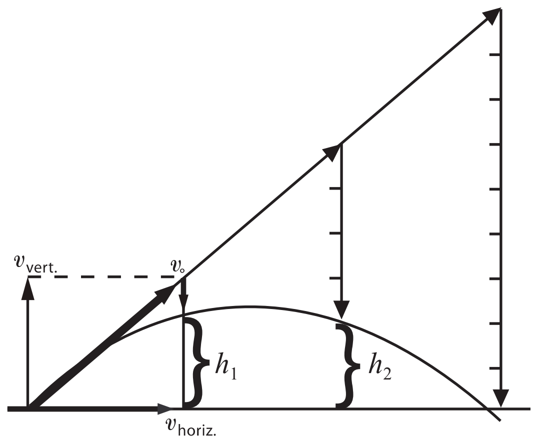


Fig. 16

Pero, simultáneamente, la bala hace un movimiento hacia arriba. En t segundos se eleva a la altura $S = v_{vert}t - \dfrac{gt^2}{2}$. Sustituyendo aquí t por los instantes de tiempo que nos interesen, se hallan los desplazamientos verticales y se marcan en el eje vertical. Al principio, la magnitud h aumentará (elevación), después, disminuirá.

Ahora, no queda más que señalar los puntos de la trayectoria en el diagrama como lo hicimos en el ejemplo anterior y trazar por ellos una curva continua.

Manteniendo horizontalmente el cañón del fusil, la bala se entierra rápidamente; si la posición del cañón es vertical, la bala vuelve a caer al mismo sitio donde fue hecho el disparo. Por lo tanto, para disparar cuanto más lejos posible, es necesario colocar el cañón del fusil de manera que forme con el horizonte un ángulo determinado. Pero, ¿qué ángulo?

Empleemos de nuevo el mismo procedimiento; descompongamos el vector de la velocidad inicial en dos componentes: sea v_1 la velocidad en la vertical y v_2, en la horizontal. El tiempo, desde el momento del disparo hasta el momento en que la bala alcance el punto superior de la trayectoria, es igual a $\dfrac{v_1}{g}$. Tengamos en cuenta que la bala tarda el mismo tiempo en caer, o sea, que el tiempo del vuelo de la bala hasta que cae a la tierra es $\dfrac{2v_1}{g}$.

Como en la horizontal el movimiento es uniforme, el alcance del vuelo es

$$S = \frac{2v_1v_2}{g},$$

(se ha despreciado la altura del cañón del fusil sobre el nivel del mar).

Hemos obtenido una fórmula que muestra que el alcance del vuelo es proporcional al producto de las componentes de la velocidad. ¿En qué dirección hay que disparar para que este producto sea máximo? Esta pregunta se puede expresar geométricamente. Las velocidades v_1 y v_2 forman un rectángulo de velocidades; su diagonal es la velocidad total v. El producto $v_1 v_2$ es igual al área de este rectángulo.

La pregunta se reduce a lo siguiente: siendo conocida la longitud de la diagonal, ¿qué lados hay que tomar para que el área del rectángulo sea máxima? En la geometría se demuestra que a esta condición la satisface el cuadrado. Por lo tanto, el alcance de la bala será máximo cuando $v_1 = v_2$, o sea, cuando el rectángulo de las velocidades sea un cuadrado. La diagonal del cuadrado de las velocidades forma un ángulo de 45° con la horizontal: bajo este ángulo hay que colocar el fusil para que la bala vaya lo más lejos posible.

Si v es la velocidad total de la bala, en el caso del cuadrado, se tiene: $v_1 = v_2 = \dfrac{v}{\sqrt{2}}$. En este caso, la fórmula para el alcance del vuelo tiene esta forma: $S = \dfrac{v^2}{g}$, o sea, el alcance es dos veces mayor que al disparar para arriba con la misma velocidad inicial.

La altura alcanzada al disparar bajo un ángulo de 45° es igual a $h = \dfrac{v_1^2}{2g} = \dfrac{v^2}{4g}$, o sea, es cuatro veces menor que el alcance del vuelo.

Hay que reconocer que las fórmulas con que operamos proporcionan resultados exactos solamente en un caso muy lejano de la realidad: cuando falta el aire. En muchos casos, la resistencia del aire juega un papel decisivo y cambia por completo todo el cuadro.

Movimiento circular

El movimiento circular de un punto siempre es acelerado, aunque sólo sea por el hecho de que en cada instante la velocidad cambia su dirección. Sin embargo, la magnitud de la velocidad puede mantenerse constante. Precisamente, vamos a examinar ahora un caso semejante.

Dibujemos los vectores de las velocidades para intervalos sucesivos de tiempo, colocando en un punto los orígenes de los vectores (tenemos derecho a esto). Si el vector de la velocidad gira un ángulo pequeño, la variación de la velocidad se representará por la base de un triángulo isósceles. Construyamos la variación de la velocidad durante el tiempo en que el cuerpo hace una vuelta completa (Fig. 17). La suma de las magnitudes de las variaciones de la velocidad durante este tiempo será igual a la suma de los lados del polígono representado. Al construir cada triángulo, se supone simplemente que el vector de la velocidad varía bruscamente; pero, en la realidad, la dirección del vector de la velocidad varía continuamente. Está absolutamente claro que cuanto menor se tome el ángulo del triángulo, tanto menor será el error. Cuanto menores sean los lados del polígono, tanto más se aproximará éste a una circunferencia de radio v. Por eso, el valor exacto de la suma de los valores absolutos de las variaciones de la velocidad durante una vuelta del punto, será igual a la longitud de la circunferencia, o sea, igual a $2\pi v$. La magnitud de la aceleración se hallará dividiendo ésta por el tiempo T de una vuelta completa.

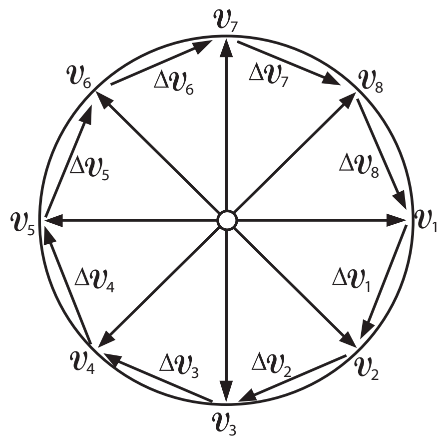


Fig. 17

Así pues, la magnitud de la aceleración en el movimiento circular uniforme queda expresada por la fórmula $a = \dfrac{2\pi v}{T}$.

Pero, el tiempo de una vuelta completa en el movimiento sobre una circunferencia de radio R, puede escribirse en la forma $T = \dfrac{2\pi R}{v}$. Sustituyendo esta expresión en la fórmula anterior, para la aceleración, se obtiene: $a = \dfrac{v^2}{R}$.

Siendo constante el radio de la rotación, la aceleración es proporcional al cuadrado de la velocidad. Siendo dada la velocidad, la aceleración es inversamente proporcional al radio.

Este mismo razonamiento nos muestra cómo está dirigida en cada instante la aceleración del movimiento circular.

Cuanto menor sea el ángulo de los vértices de los triángulos isósceles que empleamos para la demostración, tanto más se aproximará a 90º el ángulo entre el incremento de la velocidad y la velocidad misma.

Por lo tanto, la dirección de la aceleración en el movimiento uniforme circular es perpendicular a la velocidad. Y, ¿qué direcciones tienen la velocidad y la aceleración con relación a la trayectoria? Como la velocidad es tangente al trayecto, la aceleración tiene la dirección del radio y, además, va hacia el centro de la circunferencia. Todo esto se ve bien en la figura 18.

Hagamos la prueba de dar vueltas a una piedra con una cuerda. Con gran claridad sentiremos la necesidad de hacer un esfuerzo muscular. ¿Para qué hace falta la fuerza, si el movimiento del cuerpo es uniforme? En realidad no resulta así. El cuerpo se mueve con una velocidad de magnitud invariable, pero la variación continua de la dirección de la velocidad hace que este movimiento sea acelerado. La fuerza se necesita para desviar al cuerpo de su camino inercial rectilíneo, para crear la aceleración $\dfrac{v^2}{R}$ que acabamos de calcular.

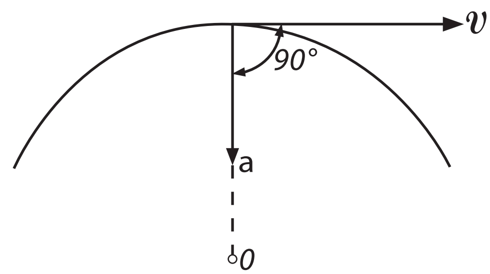


Fig. 18

Según la ley de Newton, la fuerza señala la dirección de la aceleración. Por consiguiente, el cuerpo que gira sobre una circunferencia con una velocidad constante tiene que sufrir la acción de una fuerza que va por el radio en dirección del centro de rotación. La fuerza que actúa sobre la piedra por parte de la cuerda es la que garantiza la aceleración $\dfrac{v^2}{R}$. Por consiguiente, la magnitud de esta fuerza es $\dfrac{mv^2}{R}$.

La cuerda tira de la piedra y la piedra tira de la cuerda. En estas dos fuerzas reconocemos «el objeto y su imagen» en el espejo, o sea, las fuerzas de acción y reacción. Frecuentemente, la fuerza con la que la piedra actúa sobre la cuerda la llaman centrífuga. No hay duda que la fuerza centrífuga es igual a $\dfrac{mv^2}{R}$ y que lleva la dirección del radio, desde el centro de la rotación. La fuerza centrífuga está aplicada al cuerpo que reacciona a la tendencia que tiene el mismo a moverse por inercia en línea recta.

Todo lo expuesto se refiere también al caso en que la fuerza de gravedad juega el papel de «la cuerda». La Luna gira alrededor de la Tierra. ¿Qué es lo que sujeta a nuestro satélite? ¿Por qué no se marcha, siguiendo la ley de la inercia, a un viaje interplanetario? La Tierra sujeta a la Luna con «una cuerda invisible», con la fuerza de gravedad. Esta fuerza es igual a $\dfrac{mv^2}{R}$, en donde v es la velocidad del movimiento en la órbita lunar, y R, la distancia hasta la Luna. En este caso, la fuerza centrífuga está aplicada a la Tierra, pero, gracias a la gran masa de la Tierra, ella influye muy poco en el carácter del movimiento de nuestro planeta.

Supongamos que se quiere poner un satélite artificial de la Tierra en una órbita circular a la distancia de 300 km de la superficie terrestre. ¿Qué velocidad tiene que tener ese satélite? A la distancia de 300 km, la fuerza de gravedad es un poco menor que en la superficie de la Tierra y es igual a 8.9 $\dfrac{m}{seg^2}$.

La aceleración del satélite que se mueve sobre una circunferencia es igual a $\dfrac{v^2}{R}$, en donde R es la distancia hasta el centro de rotación (o sea, hasta el centro de la Tierra), que, aproximadamente, es igual a 6600 $km = 6.6 \times 10^6\ m$.

Por otra parte, esta aceleración es igual a la aceleración g de la fuerza de gravedad. Por consiguiente, $g = \dfrac{v^2}{R}$, de donde hallamos la velocidad del movimiento del satélite en la órbita:

$$v = \sqrt{gR} = \sqrt{8.9 \cdot 6.6 \times 10^6} = 7700\ \frac{m}{seg} = 7.7\ \frac{km}{seg}.$$

La velocidad mínima que se necesita para que un cuerpo lanzado horizontalmente se convierta en satélite de la Tierra, se llama velocidad cósmica primera. En el ejemplo expuesto se ve que esta velocidad es aproximadamente igual a 8 $\dfrac{km}{seg}$.

III. El movimiento desde un punto de vista «irracional»

Principio de equivalencia

En el capítulo anterior hallamos «un punto de vista racional» sobre el movimiento. La verdad es que, puntos de vista «racionales», que llamamos sistemas inerciales, existen infinidad de ellos.

Armados ahora de los conocimientos de las leyes del movimiento, nos puede interesar el aspecto de éste desde un punto de vista «irracional». El interés en saber cómo viven los habitantes de sistemas no inerciales no es, en general, vano, aunque sólo sea por el hecho de que nosotros mismos somos habitantes de tal sistema.

Figurémonos que, tomando consigo unos instrumentos de medición, nos embarcamos en una nave interplanetaria y nos marchamos de viaje por el mundo de las estrellas.

El tiempo corre ligero. El Sol ya se parece a una estrellita. El motor está parado, la nave está lejos de los cuerpos que gravitan.

Veamos qué es lo que ocurre en nuestro laboratorio en vuelo. ¿Por qué está suspendido en el aire y no se cae al suelo el termómetro que se ha soltado de su sostén? ¡En qué posición tan rara, desviado de la «vertical», está suspenso el péndulo que cuelga de la pared! Inmediatamente hallamos la explicación: tengamos en cuenta que la nave no está en la Tierra, sino en el espacio interplanetario. Los objetos han perdido el peso.

Después de contemplar con admiración este panorama extraordinario decidimos cambiar la dirección. Apretando un botón se pone en marcha el motor-cohete (a reacción) y, de repente... todos los objetos que nos rodean parecen revivir. Todos los cuerpos que no estaban bien sujetos se ponen en movimiento. El termómetro se cae, el péndulo comienza a oscilar y, lentamente, se pone vertical. Veamos los instrumentos que indican hacia qué lado comenzó nuestra nave el movimiento acelerado. Claro que hacia arriba. Los instrumentos muestran que hemos elegido un movimiento con una aceleración muy pequeña con relación a las posibilidades de la nave de 9.8 $\dfrac{m}{seg^2}$. Nuestras impresiones son habituales, nos sentimos igual que en la Tierra. Pero, ¿por qué esto es así? Igual que antes, la nave se encuentra muy lejos de las masas gravitantes; no hay fuerzas de atracción; sin embargo, los objetos han obtenido peso.

Dejemos caer de la mano una bolita y midamos la aceleración con que cae al suelo de la nave. Resulta que esta aceleración es igual a 9.8 $\frac{m}{seg^2}$. Este mismo número acabamos de leer en los instrumentos que miden la aceleración del cohete. La nave se mueve hacia arriba con la misma aceleración con que caen al suelo los cuerpos en nuestro laboratorio.

Pero, ¿qué quiere decir en nuestra nave el vuelo hacia «arriba» o hacia «abajo»? ¡Qué sencillo era todo cuando vivíamos en la Tierra! Allí el cielo estaba arriba, la Tierra, abajo. ¿Y aquí? Nuestro arriba tiene un síntoma indiscutible: es la dirección de la aceleración del cohete.

No es difícil entender el sentido de nuestros experimentos: sobre la bolita soltada de la mano no actúa ninguna fuerza. La bolita se mueve por inercia. Es el cohete el que se mueve con aceleración respecto a la bolita y respecto a nosotros, que estamos dentro del cohete, y nos parece que es la bolita la que «cae» hacia un lado, en dirección opuesta a la aceleración del cohete. Claro que la aceleración de esta «caída» tiene una magnitud igual a la de la aceleración verdadera del cohete. También es evidente que todos los cuerpos en el cohete tienen que «caer» con una misma aceleración.

De todo lo expuesto se puede hacer una conclusión interesante. En un cohete que se mueve con aceleración, todos los cuerpos comienzan a «pesar». Además, la dirección de «la fuerza de gravedad» es opuesta a la dirección de la aceleración del cohete y la magnitud de la aceleración de la «caída» libre es igual a la magnitud de la aceleración de la misma nave. Y lo más maravilloso es que, prácticamente, no podemos distinguir el movimiento acelerado del sistema de la fuerza de gravedad correspondiente[7]. Estando dentro de la nave cósmica con las ventanas cerradas no podríamos saber si está quieta en la Tierra o si se mueve con una aceleración de 9.8 $\frac{m}{seg^2}$. La igualdad de la aceleración y de la acción de la fuerza de gravedad se llama en física principio de equivalencia.

Como ahora veremos en una multitud de ejemplos, este principio da la posibilidad de resolver rápidamente muchos problemas, agregando a las fuerzas reales una fuerza aparente de gravedad que existe en los sistemas que se mueven con aceleración.

El ascensor puede servir de primer ejemplo. Tomemos consigo una balanza de resorte con las pesas y vayamos hacia arriba en el ascensor. Veamos cómo se comporta el fiel de la balanza en la que se ha colocado una pesa de un kilogramo (Fig. 19). La ascensión ha comenzado; vemos que las indicaciones de los pesos crecen, como si la pesa pesase más de un kilogramo. Este hecho se explica con facilidad con el principio de equivalencia. Durante el movimiento del ascensor hacia arriba con la aceleración a aparece una fuerza complementaria de gravedad dirigida hacia abajo. Como la aceleración de esta fuerza es igual a a, el peso complementario es igual a ma. Por consiguiente, la balanza indicará el peso $mg + ma$. La aceleración se ha terminado y el ascensor se mueve uniformemente: el resorte vuelve a su posición inicial y muestra 1 kgf. Nos aproximamos al piso superior, el movimiento del ascensor se retarda. ¿Qué ocurrirá ahora con el resorte de la balanza? Claro que ahora la pesa tiene un peso menor de un kilogramo. Cuando el movimiento

[7]Sólo prácticamente. En principio, hay diferencia. En la Tierra las fuerzas de gravedad van dirigidas por los radios hacia el centro de la Tierra. Esto significa que las direcciones de la aceleración en dos puntos diversos, forman entre sí un ángulo. En el cohete que se mueve con aceleración, las direcciones de la gravedad son rigurosamente paralelas en todos los puntos. En la Tierra, la aceleración también varía con la altura; este efecto no existe en el cohete que se mueve con aceleración.

del ascensor es retardado, el vector de la aceleración va dirigido hacia abajo. Por lo tanto, la fuerza aparente de gravedad complementaria está dirigida hacia arriba, en dirección contraria a la gravedad terrestre. Ahora a es negativa y la balanza indica una magnitud menor que mg. Después de pararse el ascensor, el resorte vuelve a su posición inicial. Comencemos el descenso. El movimiento del ascensor se acelera; el vector de la aceleración está dirigido hacia abajo y, por lo tanto, la fuerza de gravedad complementaria está dirigida hacia arriba. La pesa tiene ahora un peso menor de un kilogramo. Cuando el movimiento sea uniforme, se perderá el peso complementario y ante el fin de nuestro viaje en el ascensor, cuando el movimiento hacia abajo sea retardado, la pesa tendrá que pesar más de un kilogramo.

Las sensaciones desagradables que se notan cuando son rápidas las aceleraciones y los retrasos del movimiento del ascensor, están ligadas con la variación considerada del peso.

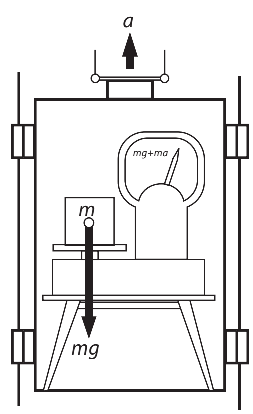


Fig. 19

Si el ascensor baja con aceleración, los cuerpos que están en él se hacen más ligeros. Cuanto mayor sea esta aceleración, tanto más peso se perderá ¿Qué ocurrirá en la caída libre del sistema? La respuesta es clara: en este caso, los cuerpos dejan de presionar sobre el soporte, dejan de pesar; la fuerza de gravedad de la Tierra se equilibra con la fuerza de gravedad complementaria que existe en tal sistema que cae libremente. Estando en tal «ascensor», se puede colocar tranquilamente sobre los hombros una tonelada de peso.

Al comienzo de este capítulo describíamos la vida «sin peso» en una nave interplanetaria que había salido fuera de los límites de la esfera de gravedad. Cuando el movimiento era uniforme y rectilíneo, en esta nave no había peso; pero lo mismo ocurre también en la caída libre del sistema. Esto significa que no hay necesidad de salir fuera de los límites de la esfera de gravedad: no hay peso en ninguna de las naves interplanetarias que se mueve sin motor. La caída libre nos conduce a la pérdida del peso en sistemas semejantes. El principio de equivalencia nos lleva a la conclusión sobre la casi (véase la nota de la pág. 40) equivalencia total del sistema de referencia que se mueve uniformemente en línea recta, lejos de la acción de las fuerzas de atracción, y el sistema de referencia que cae libremente gracias a la acción de la gravedad. En el primer sistema no hay peso, en el segundo, «el peso hacia abajo» se equilibra con «el peso hacia arriba». No hallamos ninguna diferencia entre los sistemas.

El primer viajero interplanetario fue un perro llamado Layka, un poco después, el hombre se acostumbró a la vida «sin peso» en la cabina de una nave cósmica. El primero que ha ido por este camino es el piloto cosmonauta soviético Y. Gagarin.

No se puede decir que sea ordinaria la vida en la cabina de la nave. Hizo falta mucho ingenio e inventiva para hacer que fuesen dóciles las cosas que con tanta facilidad se acomodan a la fuerza de la gravedad. ¿Se puede, por ejemplo, echar agua de una botella a un vaso? Hay que tener en cuenta que el agua cae «hacia abajo» gracias a la acción de la gravedad. ¿Se puede preparar la comida, si no se puede calentar el agua en la cocina? (El agua templada no se disolverá con la fría). ¿Cómo escribir con el lápiz sobre el papel si un pequeño golpe del lapicero sobre la mesa es suficiente para echar a un lado al escribiente? Ni la cerilla, ni la vela, ni el mechero de gas arderán, porque los gases de la combustión no se elevarán (ya que no hay «arriba») y no darán acceso al oxígeno. Hubo incluso que pensar el modo de garantizar el curso normal de las evacuaciones naturales que se efectúan en el organismo del hombre, ya que estos procesos están «acostumbrados» a la fuerza de la gravedad terrestre.

Ocupémonos ahora de las observaciones físicas en un autobús o en un tranvía que se mueven con aceleración. Una particularidad de este ejemplo, que le distingue del anterior, consiste en lo siguiente: en el ejemplo del ascensor, el peso complementario y la atracción de la Tierra estaban dirigidos a lo largo de una línea. En un tranvía que va frenando o que va tomando velocidad, la fuerza complementaria de gravedad forma un ángulo recto con la fuerza de gravedad terrestre. Esto provoca unas sensaciones en los pasajeros que, a pesar de la costumbre, son originales. Si el tranvía toma velocidad, aparece una fuerza complementaria que tiene la dirección inversa a la del movimiento. Sumemos esta fuerza con la fuerza de gravedad. En resumen, sobre el hombre situado en el vagón actúa una fuerza que forma un ángulo obtuso con la dirección del movimiento. Estando en el vagón como de ordinario, de cara al movimiento, sentiremos que nuestro «arriba» se ha desplazado. Para no caernos, hacemos lo posible por ocupar la posición «vertical», tal como se muestra en la Fig. 20, *a*. Nuestra «vertical» está oblicua; forma un ángulo agudo con la dirección del movimiento. Un hombre que está de pie, sin sujetarse en nada, inevitablemente se cae hacia atrás.

Por fin, el movimiento del tranvía se hace uniforme y ya podemos estar tranquilos. Sin embargo, se aproxima una nueva parada. El conductor frena y... nuestra «vertical» se inclina. Ésta, como se ve en la Fig. 20, *b*, forma un ángulo obtuso con el movimiento. El pasajero, para no caerse, se inclina hacia atrás. Sin embargo, no se queda mucho tiempo en esta posición. El vagón se para, la retardación desaparece y la «vertical» toma su posición inicial. Otra vez hay que cambiar la posición del cuerpo. Comprueben sus sensaciones. ¿Verdad que parece que les han empujado por la espalda en el momento de frenar? (la vertical está detrás de la espalda). Usted se ha puesto «derecho», pero ahora se ha parado el vagón, y como la vertical está por delante, sentirá un golpe en el pecho.

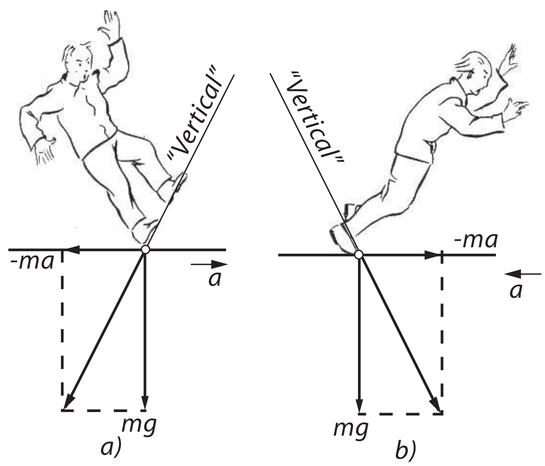


Fig. 20

Durante el movimiento del tranvía sobre una curva ocurren fenómenos parecidos. Ya sabemos que el movimiento sobre una circunferencia es acelerado, incluso cuando la magnitud de la velocidad es constante. La aceleración $\frac{v^2}{R}$ será tanto mayor, cuanto más ligero sea el movimiento del tranvía y cuanto menor sea el radio R de la curvatura. La aceleración de este movimiento va por el radio, en dirección del centro. Pero esto es equivalente a la aparición de una fuerza de gravedad complementaria dirigida desde el centro. Por consiguiente, durante la curva, sobre el pasajero actúa una fuerza complementaria $\frac{mv^2}{R}$ que le empuja hacia el lado exterior de la curvatura. La fuerza radial $\frac{mv^2}{R}$, se llama centrífuga. Con esta fuerza nos encontramos anteriormente en la pág. 37 siendo examinada desde otro punto de vista.

La acción de la fuerza centrífuga en un tranvía o en un autobús, sólo puede dar lugar a pequeñas molestias. En este caso, la fuerza $\frac{mv^2}{R}$ es pequeña. Sin embargo, si el movimiento sobre la curva es ligero, las fuerzas centrífugas pueden alcanzar grandes magnitudes y pueden hacerse peligrosas para la vida. Los pilotos suelen verse con grandes valores de $\frac{mv^2}{R}$, cuando el avión efectúa un «rizo». Cuando el avión describe una circunferencia, sobre el piloto actúa la fuerza centrífuga que le aprisiona sobre el asiento. Cuanto menor sea la circunferencia del rizo, tanto mayor será la fuerza complementaria que aprisiona al piloto. Si esta gravedad es muy grande, el hombre se puede «destrozar» ya que los tejidos del organismo en vida poseen una resistencia limitada y no pueden aguantar cualquier pesantez.

¿En cuánto puede «aumentar al peso» de un hombre sin peligro notable para la vida? Eso depende de la duración de la carga. Si ésta es de una parte de segundo, el hombre es capaz de aguantar cargas que sean ocho y diez veces mayores que su peso, o sea, sobrecargas de $7g - 9g$. El piloto, durante diez segundos, puede aguantar sobrecargas de $3g - 5g$. A los cosmonautas les interesa saber, qué sobrecargas es capaz de aguantar un hombre durante diez minutos, e incluso durante horas. Es probable que, en estos casos, la sobrecarga tenga que ser muchísimo menor.

Calculemos el radio del rizo que puede describir el avión para diversas velocidades, sin peligro para el piloto. Tomemos, por ejemplo, el número $4g$. Éste es el valor de la aceleración, o sea que, $\dfrac{v^2}{R} = 4g$ y $R = \dfrac{v^2}{4g}$. Siendo la velocidad de 360 $\dfrac{km}{hora} = 100\ \dfrac{m}{seg}$, el radio del rizo es de 250 m; si la velocidad es 4 veces mayor, o sea, si es de 1440 $\dfrac{km}{hora}$ (estas velocidades ya han sido superadas por los aviones modernos de reacción), el radio del rizo tiene que ser aumentado 16 veces. El radio menor del rizo resulta igual a 4 km.

No dejemos de prestar atención a una forma de transporte más sencilla, a la bicicleta. Todos han visto cómo se inclina el ciclista en la vuelta. Propongamos al ciclista describir una circunferencia de radio R con la velocidad v, o sea, moverse con una aceleración de $\dfrac{v^2}{R}$, dirigida hacia el centro. Entonces, sobre el ciclista, además de la fuerza de gravedad, va a actuar una fuerza complementaria, la centrífuga, que lleva la dirección horizontal y que va dirigida hacia el centro de la circunferencia. En la Fig. 21 están representadas estas fuerzas y su suma. Claro que el ciclista tiene que estar «verticalmente», si no se caería. Pero su vertical no coincide con la terrestre.

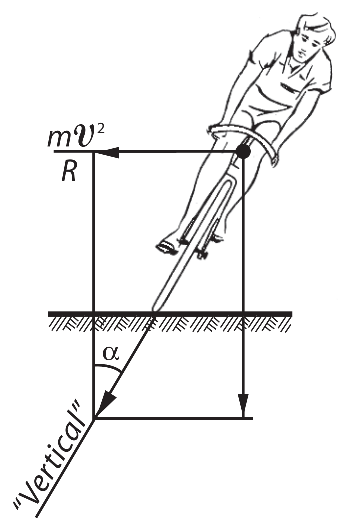


Fig. 21

En la figura se ve que los vectores $\dfrac{mv^2}{R}$ y mg son los catetos de un triángulo rectángulo. La razón del cateto opuesto al ángulo α, al adyacente, se llama en trigonometría tangente del ángulo α. Aquí, $tg\ \alpha = \dfrac{v^2}{R}$, la masa se simplifica según el principio de equivalencia. Por lo tanto, el ángulo de inclinación del ciclista no depende de su masa (un ciclista gordo y uno delgado tienen que inclinarse igual). La fórmula y el triángulo representado en la figura muestran la dependencia de la inclinación de la velocidad del movimiento (crece con el aumento de ésta) y del radio de la circunferencia (crece con su disminución).

Hemos aclarado que la vertical del ciclista no coincide con la vertical terrestre. ¿Qué es lo que va a sentir él? Habrá que dar vuelta a la Fig. 21. El camino se parece ahora al declive de un monte (Fig. 22, *a*), y queda claro para nosotros que, al no haber una fuerza suficiente de rozamiento entre los neumáticos y la cubierta del camino (el asfalto está mojado), el ciclista se puede resbalar y la vuelta muy cerrada puede terminarse con la caída en la cuneta.

Para que no ocurra esto, en las vueltas muy cerradas (o, como suele decirse, en los virajes) las carreteras se hacen con una inclinación, o sea, horizontal para el ciclista, tal como se representa en la Fig. 22, *b*. De este modo se puede rebajar mucho, e incluso anular, la tendencia a resbalar. Precisamente así se construyen las pistas de ciclismo y las autopistas en las vueltas.

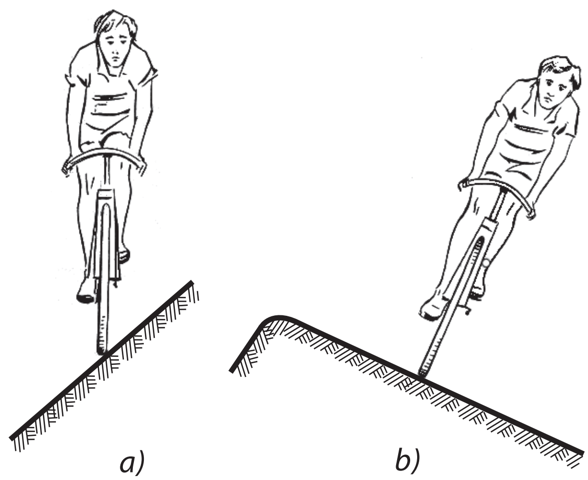


Fig. 22

Rotación

Ocupémonos ahora de los sistemas en rotación. El movimiento de este sistema se determina por el número de vueltas que efectúa en un segundo al girar alrededor del eje. Claro que hay que saber también la dirección del eje de rotación.

Para comprender mejor las particularidades de la vida en los sistemas en rotación, consideremos «la rueda de la risa», atracción bien conocida (Fig. 23). Su construcción es muy sencilla. Un disco plano de unos cuantos metros de diámetro gira con rapidez. Quien lo desea, se sube sobre él y prueba sujetarse.

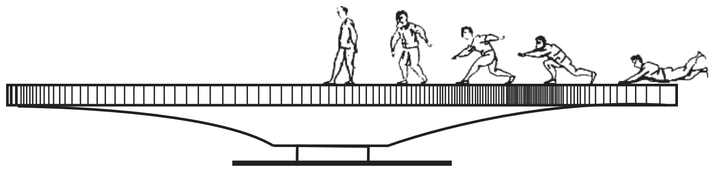


Fig. 23

Muy pronto se dan cuenta del secreto del éxito, incluso aquellos que no saben la física: hay que colocarse en el centro del disco, puesto que cuanto más lejos del centro se esté, tanto más difícil será sujetarse. Tal disco representa un sistema no inercial con unas propiedades singulares.

Cada objeto sujeto al disco se mueve sobre una circunferencia de radio R a una velocidad v, o sea, con la aceleración $\frac{v^2}{R}$. Como ya sabemos, desde el punto de vista de un observador no inercial, esto significa la presencia de una fuerza complementaria de gravedad $\frac{mv^2}{R}$, dirigida por el radio desde el centro. En cualquier punto de esta «rueda del diablo» va a actuar esta fuerza radial de gravedad, en cualquier punto va a crear ésta una aceleración radial igual a $\frac{v^2}{R}$. La magnitud de esta aceleración será igual para los puntos situados en una circunferencia. Y, ¿en diferentes circunferencias? No debemos apresurarnos en afirmar, que según la fórmula $\frac{v^2}{R}$, la aceleración es tanto mayor, cuanto menor sea la distancia al centro. Esto no es cierto, pues la velocidad de los puntos de la rueda más lejanos del centro es mayor. En efecto, si se indica con la letra n el número de vueltas que efectúa la rueda en un segundo, el espacio recorrido durante un segundo por un punto de la rueda, situado a la distancia R del centro, o sea, la velocidad de este punto, se puede expresar así: $2\pi Rn$.

La velocidad de un punto es directamente proporcional a su distancia al centro. La fórmula de la aceleración se puede escribir ahora así:

$$a = 4\pi^2 n^2 R.$$

Y, como el número de vueltas efectuadas en un segundo es igual para todos los puntos de la rueda, llegamos a la siguiente conclusión: la aceleración de la fuerza «radial de gravedad» que actúa en una rueda en rotación, crece proporcionalmente a la distancia del punto del centro de la rueda.

En este interesante sistema no inercial, la fuerza de gravedad es diferente en circunferencias diversas. Por consiguiente, son diferentes las direcciones de las «verticales» de los cuerpos situados a diversas distancias del centro. Claro está, que la atracción de la Tierra es la misma para todos los puntos de la rueda. Pero, el vector que caracteriza la gravedad radial complementaria, se hace más largo a medida que se aleja del centro. Por lo tanto, las diagonales de los rectángulos se desvían más y más de la vertical terrestre.

Figurándose las sensaciones consecutivas de un hombre que se desliza sobre «la rueda de la risa», se puede decir que, desde su punto de vista, el disco «se inclina» más y más a medida que se aleja del centro hasta que se hace imposible sujetarse en él.

Sin embargo, ¿se podría discurrir para este sistema inercial una construcción parecida a la carretera inclinada? Claro que se podría, pero habría que sustituir el disco por una superficie, en cada uno de los puntos de la cual la fuerza total de gravedad fuese perpendicular a ella. La forma de tal superficie se puede calcular. Esta superficie se llama paraboloide. Esta denominación no es casual: cada una de las secciones del paraboloide representa una parábola, que es la curva que describen los cuerpos al caer. El paraboloide se forma al hacer girar una parábola alrededor de su eje.

Es fácil crear esta superficie haciendo girar rápidamente un vaso con agua. La superficie del líquido en rotación representa un paraboloide. Las partículas de agua acabarán de desplazarse precisamente cuando la fuerza que empuja a cada partícula hacia la superficie sea perpendicular a ésta. A cada velocidad de rotación corresponde su paraboloide (Fig. 24).

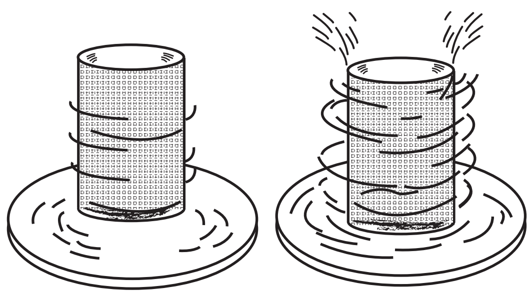


Fig. 24

Preparando un paraboloide sólido, se pueden mostrar sus propiedades con toda evidencia. Una bolita pequeña, colocada en cualquier punto de un paraboloide, que gira con una velocidad determinada, se mantiene en reposo. Esto significa que la fuerza que actúa sobre ella es perpendicular a la superficie. Mejor dicho, la superficie del paraboloide en rotación posee unas propiedades semejantes a una superficie horizontal. Se puede andar por esta superficie como por la tierra, sintiéndose, además, firme por completo. Sin embargo, la dirección de la vertical varía al andar.

Los efectos centrífugos se emplean a menudo en la técnica. Por ejemplo, la construcción de una centrífuga se basa en la aplicación de estos efectos.

La centrífuga consiste en un tambor que gira rápidamente alrededor de su eje. ¿Qué ocurriría si sobre este tambor, lleno de agua hasta los bordes, se lanzasen diversos objetos?

Echemos al agua una bolita metálica: ésta irá al fondo, pero no por nuestra vertical, sino que, alejándose todo el tiempo del eje de rotación, se parará al lado de la pared. Echemos ahora sobre el tambor una bolita de corcho: ésta, por el contrario, se pondrá inmediatamente en movimiento, en dirección del eje de rotación y se situará en éste.

Si el tambor de este modelo de centrífuga es de gran diámetro, se puede observar que la aceleración aumenta rápidamente a medida que se aleja del centro.

Los fenómenos que ocurren son comprensibles. Dentro de la centrífuga existe una gravedad radial complementaria. Si la centrífuga gira con bastante rapidez, su «abajo» estará en la pared del tambor. La bolita metálica «se sumerge» en el agua, mientras que la de corcho «flota». Cuanto más lejos esté del eje de rotación, tanto más «pesado» se hará el cuerpo que «cae» al agua.

En las centrífugas suficientemente perfectas, la velocidad de rotación alcanza hasta 60 000 vueltas por minuto, o sea, 10^3 vueltas por segundo. A la distancia de 10 cm del eje de rotación, la aceleración de la fuerza de gravedad radial es, aproximadamente, igual a

$$40 \cdot 10^6 \cdot 0.1 = 4 \cdot 10^6 \ \frac{m}{seg^2},$$

o sea, es 400 000 veces mayor que la aceleración terrestre.

Claro que, para tales máquinas, se puede despreciar la gravedad terrestre; verdaderamente, tenemos derecho de suponer que el «abajo» de la centrífuga está en las paredes del tambor.

De lo expuesto, queda claro cuáles son los campos de aplicación de las centrífugas. Si, en una mezcla, quisiéramos separar las partículas pesadas de las ligeras, sería conveniente utilizar la centrífuga. Todos conocen la expresión: «el líquido turbio se ha aclarado». Si el agua sucia se mantiene quieta durante mucho tiempo, la suciedad (que, generalmente, suele ser más pesada que el agua) se depositará en el fondo. Sin embargo, este proceso de sedimentación puede durar meses enteros, pero, con ayuda de una buena centrífuga, se puede limpiar el agua inmediatamente.

Las centrífugas que giran con velocidades de decenas de miles de vueltas por minuto son capaces de separar la suciedad más fina, no sólo del agua, sino también de los líquidos viscosos.

Las centrífugas se emplean en la industria química para separar los cristales de la disolución en que crecieron, para la deshidratación de las sales, para limpiar los barnices; en la industria de productos alimenticios, para separar la melaza del azúcar molida.

Se llaman separadores a las centrífugas que se emplean para la separación de sólidos o líquidos mezclados con grandes cantidades de líquido. Su principal aplicación es la elaboración de la leche. Los separadores de leche giran con una velocidad de $2-6$ mil vueltas por minuto; el diámetro del tambor llega a ser hasta de 5 m.

En la metalurgia se emplea en gran escala la fundición centrifugada. Ya a velocidades de $300-500$ vueltas por minuto, el metal líquido, que entra en la centrífuga en rotación, se une a las paredes exteriores de la centrífuga con una fuerza considerable.

Así se funden los tubos metálicos que, además, resultan más compactos, más homogéneos, sin oquedades y sin grietas.

He aquí otro empleo de la fuerza centrífuga. En la Fig. 25 está representado un mecanismo simple que sirve para regular el número de vueltas de las piezas en revolución de una máquina. Este mecanismo se llama regulador centrífugo. Al aumentar la velocidad de rotación, crece la fuerza centrífuga, las bolitas del regulador se van alejando del eje.

Las varillas unidas a las bolitas se inclinan y, cuando llegan a tomar una inclinación determinada, calculada por el ingeniero, pueden desconectar algunos contactos eléctricos; en la máquina de vapor, por ejemplo, pueden abrir las válvulas que sueltan el vapor sobrante. Con esto, disminuye la velocidad de rotación y las varillas vuelven a su posición normal.

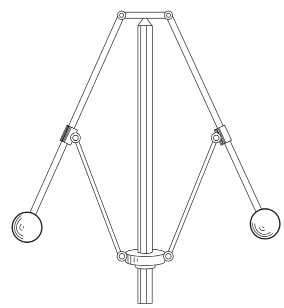


Fig. 25

Es interesante el experimento siguiente. Coloquemos un disco de cartón en el eje de un motor eléctrico. Una vez puesto en marcha el motor, acerquemos un trozo de madera al disco rotatorio. Un taco de madera, de un espesor considerable, se puede serrar por la mitad tan fácilmente como con una sierra de acero.

La prueba de serrar la madera con un cartón, actuando como con una sierra de mano, puede producir asombro. ¿Por qué corta la madera el cartón en rotación? Sobre las partículas del cartón, situadas sobre una circunferencia, actúa una fuerza centrífuga grandísima. Las fuerzas laterales que podrían deformar el plano del cartón son insignificantes con relación a la fuerza centrífuga. El disco de cartón, conservando inalterable su plano, obtiene la posibilidad de introducirse en la madera.

La fuerza centrífuga que se crea gracias a la rotación de la Tierra, conduce, como ya se dijo anteriormente, a la diferencia en el peso de los cuerpos en latitudes diversas.

Un cuerpo pesa menos en el ecuador que en el polo por dos causas. Los cuerpos situados en la superficie de la Tierra están a diversas distancias del eje terrestre en dependencia de la latitud del lugar. Claro está que esta distancia crece al pasar del polo al ecuador. Además, en el polo, el cuerpo está en el eje de rotación, y la aceleración centrífuga $a = 4\pi^2 n^2 R$, es igual a cero (la distancia hasta el eje de rotación es $R = 0$). En el ecuador, por el contrario, esta aceleración es máxima. La fuerza centrífuga disminuye la fuerza de atracción. Por eso, en el ecuador, la presión de un cuerpo sobre un soporte (el peso del cuerpo) es mínima.

Si la Tierra tuviese la forma exacta de una esfera, la pesa de un kilogramo, al ser trasladada del polo al ecuador, perdería en su peso 3.5 gramos fuerza (gf). Este número se haya fácilmente llenando la fórmula

$$a = 4\pi^2 n^2 Rm;$$

$n = 1$ vuelta al día, $R = 6300\ km$ y $m = 1000\ g$.

No hay que olvidarse de reducir las unidades de medidas a segundos y centímetros.

Sin embargo, en la realidad, la pesa de un kilogramo pierde en peso 5.3 gramos fuerza (gf), en vez de 3.5 gramos fuerza (gf). Esto es debido a que la Tierra representa una esfera achatada, que en geometría se llama elipsoide. La distancia desde el polo hasta el centro de la Tierra es menor que el radio terrestre que va dirigido hacia el ecuador, aproximadamente, en $\frac{1}{300}$ del radio.

La causa de este aplastamiento de la esfera terrestre es la misma fuerza centrífuga, pues ésta actúa sobre todas las partículas de la Tierra. En tiempos muy remotos, la fuerza centrífuga «formó» nuestro planeta, le dio la forma achatada.

La fuerza de Coriolis

La particularidad del mundo de los sistemas rotatorios no acaba con la existencia de las fuerzas de gravedad radiales. Estudiemos otro efecto interesante, cuya teoría se expuso en el año 1835 por el francés Coriolis.

Hagámonos la pregunta siguiente: ¿qué aspecto tiene el movimiento rectilíneo desde el punto de vista de un laboratorio en rotación? Un plano de tal laboratorio está representado en la Fig. 26. La trayectoria rectilínea de un cuerpo está marcada con una raya que pasa por el centro. Consideremos el caso, cuando el trayecto del cuerpo pasa por el centro de rotación de nuestro laboratorio. El disco, sobre el que está situado el laboratorio, gira uniformemente; en la figura están representadas cinco posiciones del laboratorio con relación a la trayectoria rectilínea. Éste es el aspecto de la posición relativa del laboratorio y de la trayectoria durante uno, dos, tres, etc., segundos. Como vemos, si se mira desde arriba, el laboratorio gira en dirección contraria a las agujas de un reloj.

En la línea del trayecto se han marcado flechas, correspondientes a los segmentos que recorre el cuerpo durante uno, dos, tres y etc., segundos. En cada segundo, el cuerpo recorre un trayecto igual, puesto que se trata de un movimiento uniforme y rectilíneo (desde el punto de vista de un observador inmóvil).

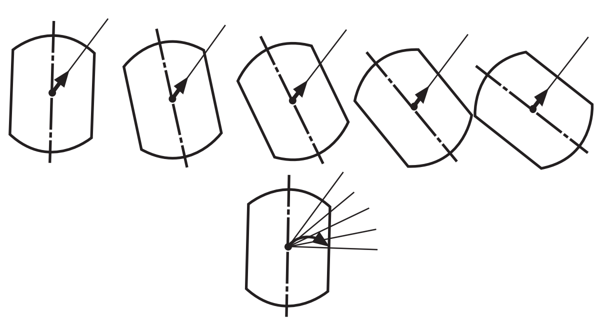


Fig. 26

Figúrense que el cuerpo móvil es una bola recién pintada y que rueda sobre un disco. ¿Qué huellas se marcarán en el disco? Nuestra construcción da la respuesta a esta pregunta. Los puntos que marcan los extremos de las flechas, se han trasladado de los cinco dibujos a una figura. No queda más que unir estos puntos con una línea suave. El resultado de la construcción no nos sorprende, pues, desde el punto de vista de un observador en rotación, el movimiento uniforme y rectilíneo parece curvilíneo. Se observa la regla siguiente: durante todo el recorrido, el cuerpo en movimiento se inclina hacia la derecha de su trayecto. Supongamos que el disco gira en dirección de las agujas de un reloj, y propongamos al lector repetir la construcción. Ésta mostrará que, en este caso, desde el punto de vista de un observador en rotación, el cuerpo móvil se inclina hacia la izquierda de su trayecto.

Ya sabemos que en los sistemas giratorios aparece una fuerza centrífuga. Sin embargo, no puede ser su actuación la causa de la torsión del trayecto, puesto que su dirección es a lo largo del radio. Por consiguiente, en los sistemas de revolución, además de la fuerza centrífuga, aparece también una fuerza complementaria. Ésta se llama fuerza de Coriolis.

¿Por qué no nos encontrábamos en los ejemplos anteriores con la fuerza de Coriolis y nos arreglábamos perfectamente con la centrífuga sola? La razón consiste en que, hasta ahora, no considerábamos el movimiento desde el punto de vista del observador rotatorio, pues, la fuerza de Coriolis sólo aparece en este caso. Sobre los cuerpos que están en reposo en un sistema de revolución, actúa solamente la fuerza centrífuga. Si la mesa de un laboratorio en rotación está clavada al suelo sobre ella sólo actúa la fuerza centrífuga. Y sobre la pelotita que ha caído de la mesa y que rueda por el suelo del laboratorio en rotación, además de la fuerza centrífuga, actúa también la fuerza de Coriolis.

¿De qué magnitudes depende el valor de la fuerza de Coriolis? Esto se puede calcular, pero los cálculos son demasiado complicados para exponerlos aquí. Por eso, describiremos solamente el resultado de los cálculos.

A diferencia de la fuerza centrífuga, cuyo valor depende de la distancia hasta el eje de rotación, la fuerza de Coriolis no depende de la posición del cuerpo. Su magnitud se determina por la velocidad del movimiento del cuerpo, y, además, no sólo por la magnitud de la velocidad, sino también por su dirección con relación al eje de rotación. Si el cuerpo se mueve a lo largo del eje de rotación, la fuerza de Coriolis es igual a cero. Cuanto mayor sea el ángulo formado por el vector de la velocidad y el eje de rotación, tanto mayor será la fuerza de Coriolis; ésta alcanza el valor máximo cuando el movimiento del cuerpo forma un ángulo recto con el eje.

Como ya sabemos, siempre se puede descomponer el vector de la velocidad en dos componentes y estudiar por separado los dos movimientos en que participa simultáneamente el cuerpo.

Si se descompone la velocidad del cuerpo en las componentes $v_{\parallel}$ y $v_{\perp}$, la primera de las cuales es paralela al eje de rotación, y la segunda, perpendicular a él, el primer movimiento no estará animado por la acción de la fuerza de Coriolis. El valor de la fuerza de Coriolis F_C se determina por la componente $v_\perp$ de la velocidad. Los cálculos proporcionan la fórmula:

$$F_C = 4\pi n v_\perp m.$$

Aquí, m es la masa del cuerpo y n es el número de vueltas que efectúa el sistema giratorio durante una unidad de tiempo. Como se ve en la fórmula, la fuerza de Coriolis será tanto mayor, cuanto más ligera sea la rotación del sistema y cuanto más rápido sea el movimiento del cuerpo.

Los cálculos establecen también la dirección de la fuerza de Coriolis. Esta fuerza siempre es perpendicular al eje de rotación y a la dirección del movimiento. Además, como ya se advirtió anteriormente, la fuerza está orientada hacia la derecha del movimiento, en el sistema que gira en dirección contraria a la de las agujas de un reloj.

Muchos fenómenos que ocurren en la Tierra tienen su explicación en la acción de la fuerza de Coriolis. La Tierra es una esfera y no un disco; por eso, las manifestaciones de las fuerzas de Coriolis son más complicadas. Estas fuerzas se revelan en el movimiento a lo largo de la superficie terrestre, así como en la caída de los cuerpos a la Tierra.

¿Es exactamente vertical la caída de un cuerpo? No del todo. Solamente en el polo es exactamente vertical la caída de un cuerpo. La dirección del movimiento coincide, en este caso, con el eje de rotación de la Tierra, por eso no aparece la fuerza de Coriolis. Otra cosa es en el ecuador; aquí la dirección del movimiento forma un ángulo recto con el eje terrestre. Mirando desde el polo norte, vemos la rotación de la Tierra en dirección contraria a la de las agujas de un reloj. Por lo tanto, un cuerpo que cae libremente tiene que desviarse hacia la derecha del movimiento, o sea, hacia el este. La magnitud de la desviación oriental es máxima en el ecuador y, al aproximarse hacia los polos, va disminuyendo hasta cero.

Calculemos la magnitud de la desviación en el ecuador. Como el movimiento del cuerpo que cae libremente es uniformemente acelerado, la fuerza de Coriolis crece a medida que se acerca a la Tierra. Por eso, nos limitaremos a hacer un cálculo aproximado. Si, por ejemplo, el cuerpo cae de una altura de 80 m, la caída se prolongará cerca de 4 seg. (según la fórmula $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$). La velocidad media de la caída será igual a 20 $\frac{m}{seg}$.

En la fórmula de la aceleración de Coriolis, $4\pi nv$, ponemos este valor de la velocidad. Después, convertimos en vueltas por segundo el valor de $n = 1$ vuelta en 24 horas. Como 24 horas equivale a $24 \cdot 3600$ segundos, se tiene que n es igual a $\frac{1}{86400}\ \frac{vueltas}{seg}$ y, por consiguiente, la aceleración creada por la fuerza de Coriolis es igual $\frac{\pi}{1080}\ \frac{m}{seg^2}$. El camino recorrido con esta aceleración durante 4 seg igual a $\frac{1}{2}\frac{\pi}{1080} \cdot 4^2 = 2.3\ cm$. Ésta es la magnitud de la desviación oriental en nuestro ejemplo. Si se tiene en cuenta que la caída no es uniforme, el cálculo exacto proporciona otro resultado: 3.1 cm.

Si en la caída libre, la desviación del cuerpo es máxima en el ecuador y es igual a cero en los polos, en el caso del movimiento sobre un plano horizontal, se observa un cuadro inverso en la desviación del cuerpo, debido a la acción de la fuerza de Coriolis.

Una pista horizontal en el polo norte o en el polo sur, no se diferencia nada del disco en rotación que consideramos al comenzar el estudio de la fuerza de Coriolis. Un cuerpo que se mueve por tal pista, se desviará hacia la derecha del movimiento en el polo norte, y hacia la izquierda en el polo sur, a causa de la fuerza de Coriolis. El lector puede calcular sin dificultad, valiéndose de la misma formula de la aceleración de Coriolis, que una bala que se ha disparado de un fusil con una velocidad inicial de 500 $\frac{m}{seg}$, se desvía en el plano horizontal, durante un segundo (o sea, en el trayecto de 500 m), en un segmento de 3.5 cm.

Pero, ¿por qué la desviación en el plano horizontal, en el ecuador, tiene que ser igual a cero? Claro que, sin demostraciones rigurosas se comprende que así tiene que ser. El cuerpo se desvía en el polo norte hacia la derecha del movimiento, en el polo sur, hacia la izquierda; por consiguiente, en el intermedio de los polos, es decir, en el ecuador, la desviación será igual a cero.

Recordemos el experimento con el péndulo de Foucault. Oscilando en el polo, el péndulo conserva el plano de sus ondulaciones. La Tierra, girando, se escapa del péndulo. Tal es la explicación de un observador estelar sobre el experimento de Foucault. Pero, el observador que gira junto con el globo terrestre explicará este experimento atribuyéndolo a la fuerza de Coriolis. En efecto, la fuerza de Coriolis es perpendicular al eje terrestre y a la dirección del movimiento del péndulo; mejor dicho, la fuerza es perpendicular al plano de oscilación del péndulo y hace girar continuamente este plano. Se puede hacer de manera que el extremo del péndulo trace la trayectoria del movimiento. La trayectoria representa una «rosa», indicada en la Fig. 27. En este dibujo, durante medio período de oscilación del péndulo, la «Tierra» gira un cuarto de vuelta. El péndulo de Foucault gira con mucha más lentitud. En el polo, el plano de oscilación del péndulo girará $\frac{1}{4}$ de grado durante un minuto. En el polo norte, el plano gira hacia la derecha del movimiento, en el sur, hacia la izquierda.

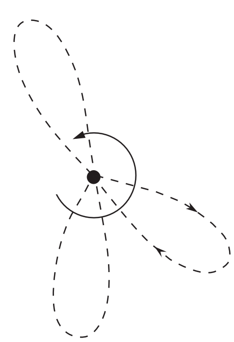


Fig. 27

En las latitudes de Europa central, el efecto de Coriolis es un poco menor que en el ecuador. En el ejemplo que acabamos de examinar, una bala se desvía, no en 3.5 cm, sino en 2.5 cm. El péndulo de Foucault, durante un minuto, gira, aproximadamente $\frac{1}{6}$ de grado.

¿Tienen que tener en cuenta los artilleros la fuerza de Coriolis? El cañón Berta, con el que los alemanes disparaban a París durante la primera guerra mundial, estaba situado a 110 km del objetivo. La desviación de Coriolis alcanzaba hasta 1600 m. Ésta ya no es una magnitud pequeña.

Si un proyectil se lanza a gran distancia sin contar con la fuerza de Coriolis, éste se desviará considerablemente de su curso. Este efecto es grande, no porque la fuerza sea grande (para un proyectil de 10 Tn, que lleva la velocidad de 1000 $\frac{km}{h}$, la fuerza de Coriolis es de cerca de 25 kgf), sino porque la fuerza actúa constantemente durante largo tiempo.

Claro que la influencia del viento sobre un proyectil no guiado, puede ser no menos considerable. La corrección del rumbo hecha por el piloto se debe a la acción del viento, al efecto de Coriolis y a los defectos del avión o del avión proyectil.

¿Qué especialistas tienen que tener en cuenta el efecto de Coriolis, además de los aviadores y de los artilleros? Entre ellos forman parte los ferroviarios, aunque esto parezca extraño. En la vía férrea, a causa de la acción de la fuerza de Coriolis, un riel se gasta por la parte interior bastante más que otro. Para nosotros está claro cuál de los dos: el riel derecho (respecto al movimiento), en el hemisferio norte; el riel izquierdo, en el hemisferio sur. Los ferroviarios de los países ecuatoriales no tienen preocupación alguna de esto.

El derrubio de la orilla derecha de los ríos en el hemisferio norte se explica del mismo modo que el desgaste de los rieles. En gran parte, la desviación del cauce se debe a la acción de la fuerza de Coriolis. Resulta que los ríos del hemisferio norte rehuyen los obstáculos por la parte derecha.

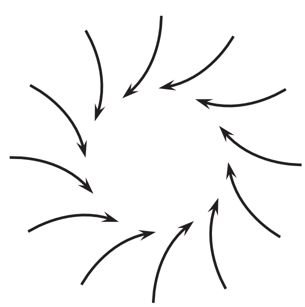


Fig. 28

Es sabido que las corrientes de aire se dirigen a la zona de baja presión. Pero, ¿por qué tal viento se llama ciclón? La raíz de esta palabra indica un movimiento circular (cíclico).

Precisamente, así es: en la zona de baja presión se crea un movimiento circular de las masas de aire (Fig. 28). La causa estriba en la acción de la fuerza de Coriolis. En el hemisferio norte, todas las corrientes de aire que tienden a las zonas de baja presión se desvían hacia la derecha de su movimiento. Véase la Fig. 29; en ella se ve que esto conduce a la desviación hacia el oeste de los vientos (alisios) que soplan en los dos hemisferios, de los trópicos hacia el ecuador.

¿Por qué una fuerza tan pequeña juega un papel tan grande en el movimiento de las masas de aire?

La explicación está en que las fuerzas de rozamiento son insignificantes. El aire se mueve con facilidad, y una fuerza, aunque sea pequeña, actuando constantemente, conduce a serios efectos.

Fig. 29

IV. Leyes de conservación

Repercusión

Incluso quien no estuvo en la guerra sabe que, al disparar, el cañón bruscamente vuelve hacia atrás. Al disparar con un fusil, éste repercute sobre el hombro. Pero, sin recurrir a las armas de fuego, también se puede observar el efecto de la repercusión. Echen agua en una probeta, ciérrenla con un corcho y cuélguenla sobre dos hilos en posición horizontal (Fig. 30). Acerquen ahora un mechero al cristal: el agua comenzará a hervir y dentro de unos dos minutos el corcho volará con estrépito hacia un lado, la probeta se inclinará en dirección contraria.

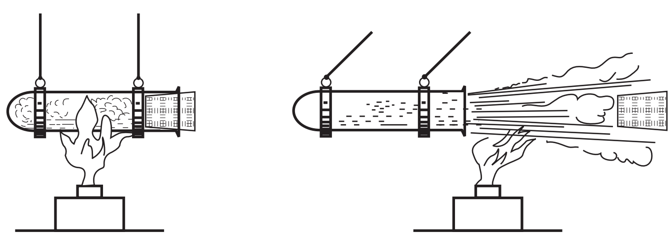


Fig. 30

La fuerza que expulsó al corcho de la probeta, es la presión del vapor. La fuerza que inclinó la probeta, también es la presión del vapor. Ambos movimientos se crearon gracias a la acción de una misma fuerza. Lo mismo ocurre con el disparo, sólo que aquí no actúa el vapor, sino los gases de la pólvora.

El fenómeno de la repercusión necesariamente se deduce de la regla de igualdad de la acción y reacción. Si el vapor actúa sobre el corcho, el corcho actúa sobre el vapor en dirección contraria y el vapor transmite esta reacción a la probeta.

Pero, puede ser que nos venga a la cabeza una objeción: ¿es que puede una misma fuerza conducir a tan diversas consecuencias? El fusil sólo vuelve un poco hacia atrás, mientras que la bala vuela lejos. Sin embargo, creemos que al lector no se le ocurrirá hacer tal objeción. Claro que fuerzas iguales pueden conducir a consecuencias diversas: pues, la aceleración que obtiene el cuerpo (esto es consecuencia de la acción de la fuerza) es inversamente proporcional a la masa de este cuerpo. La aceleración de uno de estos cuerpos (el proyectil, la bala, el corcho) la tenemos que escribir de la forma $a_1 = \dfrac{F}{m_1}$;

la aceleración del cuerpo que experimenta la repercusión (el cañón, el fusil, la probeta) será $a_2 = \dfrac{F}{m_2}$. Como la fuerza es una misma, llegamos a la siguiente conclusión: las aceleraciones obtenidas durante la acción mutua de dos cuerpos que toman parte en el «disparo», son inversamente proporcionales a sus masas:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Esto significa que la aceleración que obtiene el cañón al retroceder, es tantas veces menor que la aceleración del proyectil, cuántas veces pesa más el cañón que el proyectil.

La aceleración de la bala, y también del fusil, durante la repercusión, continúa mientras la bala se mueve por el cañón del fusil. Indiquemos este tiempo con la letra t. Durante este intervalo de tiempo, el movimiento acelerado se transforma en uniforme. Para mayor facilidad supondremos que la aceleración no se altera. Entonces, la velocidad con que sale la bala del cañón del fusil es: $v_1 = a_1 t$, y la velocidad de repercusión, $v_2 = a_2 t$. Como el tiempo de la acción de la aceleración es el mismo, se tiene: $\dfrac{a_1}{a_2} = \dfrac{v_1}{v_2}$ y, por consiguiente,

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

Las velocidades con que salen despedidos los cuerpos después de su acción mutua, son inversamente proporcionales a sus masas.

Si recordamos el carácter vectorial de la velocidad, podemos escribir la última relación así: $m_1 v_1 = -m_2 v_2$; el signo menos señala que las velocidades v_1 y v_2 tienen direcciones opuestas.

Finalmente, escribamos de nuevo la igualdad; traslademos a un miembro de la igualdad los productos de las masas por las velocidades:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0.$$

Ley de conservación del impulso

El producto de la masa de un cuerpo por su velocidad se llama impulso (otra denominación es, cantidad de movimiento). Como la velocidad es un vector, el impulso es una cantidad vectorial. Sin duda, la dirección del impulso coincide con la dirección de la velocidad del cuerpo.

Mediante este nuevo concepto, la ley de Newton $F = ma$, se puede expresar de otro modo. Como $a = \dfrac{v_2 - v_1}{t}$, se tiene, $F = \dfrac{mv_2 - mv_1}{t}$ o sea, $Ft = mv_2 - mv_1$. El producto de la fuerza por el tiempo de su acción es igual a la variación del impulso del cuerpo.

Volvamos al efecto de repercusión.

El resultado de la consideración de la repercusión del cañón, se puede ahora formular más abreviadamente: la suma de los impulsos del cañón y del proyectil después del disparo, se mantiene igual a cero. Es evidente que igual a cero era también antes del disparo, cuando el cañón y el proyectil estaban en estado de reposo.

Las velocidades que toman parte en la ecuación $m_1v_1+m_2v_2=0$, son las velocidades inmediatas después del disparo. Durante el movimiento ulterior del proyectil y del cañón, comienzan a actuar sobre éstos la fuerza de gravedad, la resistencia del aire, y sobre el cañón, además, la fuerza de rozamiento sobre la tierra. Si el disparo se produjese en el vacío, con un cañón suspenso en el espacio, entonces, el movimiento con las velocidades v_1 y v_2 se prolongaría tanto cuanto se desease. El cañón se movería hacia un lado y el proyectil hacia el lado opuesto.

Actualmente, en la artillería se utilizan, en gran escala, cañones situados en plataformas, que disparan en marcha. ¿Cómo hay que alterar la ecuación deducida, para que se pueda emplear para el disparo de uno de estos cañones? Podemos escribir:

$$m_1u_1 + m_2u_2 = 0,$$

en donde u_1 y u_2, son las velocidades del proyectil y del cañón con respecto a la plataforma en movimiento. Si la velocidad de la plataforma es V, las velocidades del cañón y del proyectil, con respecto al observador en reposo, serán: $v_1 = u_1 + V$ y $v_2 = u_2 + V$.

Sustituyendo los valores u_1 y u_2 en la última ecuación, obtenemos:

$$(m_1 + m_2)\,V = m_1v_1 + m_2v_2.$$

En el segundo miembro de esta igualdad figura la suma de los impulsos del proyectil y del cañón después del disparo. ¿Y, en el primer miembro? El cañón y el proyectil, que tienen una masa total de $m_1 + m_2$, se movían antes de disparar con una velocidad igual a V. Por consiguiente, en el primer miembro de la igualdad figura el impulso total del proyectil y del cañón, pero, antes del disparo.

Hemos demostrado una ley muy importante de la naturaleza, llamada ley de conservación del impulso. Hemos demostrado esta ley para dos cuerpos, pero es fácil demostrar que este resultado subsiste también para un número cualquiera de cuerpos. ¿Cuál es el contenido de esta ley? Según ésta, la suma de los impulsos de unos cuantos cuerpos que se encuentran en acción mutua, no se altera como resultado de esta acción.

Está claro que la ley de conservación del impulso subsiste solamente cuando sobre el grupo de cuerpos considerados no actúan fuerzas exteriores. En física, tal grupo de cuerpos se llama cerrado.

Durante el disparo, el fusil y la bala se comportan como un grupo cerrado de dos cuerpos, a pesar de que sufren la acción de la fuerza de atracción terrestre. El peso de la bala es pequeño con relación a la fuerza de los gases de la pólvora, y el efecto de repercusión ocurrirá según las mismas leyes, independientemente de donde se efectúe el disparo, en la Tierra o en un cohete que vuele por el espacio interplanetario.

La ley de conservación del impulso permite resolver con facilidad diversos problemas relacionados con el choque de los cuerpos. Probemos golpear con una bolita de barro a otra; éstas se pegan y continúan el movimiento juntas. Si se dispara con un fusil sobre una bola de madera, ésta echa a rodar junto con la bala que se quedó introducida en ella. Una vagoneta quieta se pone en movimiento si un hombre salta corriendo sobre ella.

Desde el punto de vista de la física, todos los ejemplos expuestos son muy parecidos. La regla que liga las velocidades de los cuerpos en los choques de este tipo, se obtiene inmediatamente de la ley de conservación del impulso.

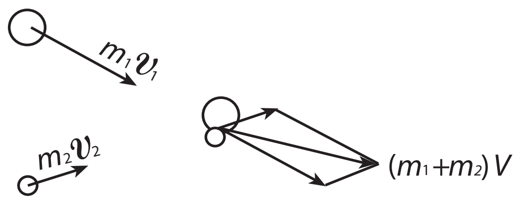


Fig. 31

Los impulsos de los cuerpos antes del encuentro eran m_1v_1 y m_2v_2; después del choque los cuerpos se unieron y su masa total se hizo igual a $m_1 + m_2$. Indicando con V la velocidad de los cuerpos unidos, se tiene

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)\,V,$$

de donde

$$V = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}.$$

Recordemos el carácter vectorial de la ley de conservación del impulso. Los impulsos mv que figuran en el numerador de la fórmula, se deben sumar como vectores.

El choque «conjunto» al encontrarse los cuerpos que se mueven formando un ángulo entre sí, se muestra en la Fig. 31. Para hallar la magnitud de la velocidad, hay que dividir la longitud de la diagonal del paralelogramo construido sobre los vectores de los impulsos de los cuerpos que chocan, por la suma de sus masas.

Movimiento de reacción

El hombre se mueve empujando a la tierra; la lancha navega porque los remeros empujan al agua con los remos; la motonave también empuja al agua, pero no con los remos, sino con la hélice. También empuja a la tierra el tren que va por los rieles y el automóvil; recuerden lo difícil que le es arrancar a un automóvil sobre el hielo.

Así pues, parece como si el empuje sobre el apoyo fuese la condición necesaria para el movimiento; hasta el avión se mueve empujando al aire con la hélice.

Sin embargo, ¿es esto así? ¿Es que no existe algún artificio para poder moverse sin empujar nada? Si andamos en patines, podemos convencernos nosotros mismos que tal movimiento es posible. Cojamos un palo pesado y parémonos sobre el hielo. Tiremos el palo hacia adelante: ¿qué ocurrirá? Pues, que patinaremos hacia atrás, a pesar de que no pensábamos empujar al hielo con el pie.

El efecto de repercusión que acabamos de estudiar nos proporciona una llave para la realización del movimiento sin apoyo, del movimiento sin empuje. La repercusión ofrece la posibilidad de acelerar el movimiento en el vacío, en donde no hay absolutamente nada para empujar.

La repercusión producida por un chorro de vapor expulsado de un recipiente (reacción del chorro), se utilizaba ya en la antigüedad para crear juguetes curiosos. En la Fig. 32 está representada una turbina de vapor antigua, inventada en el segundo siglo, antes de nuestra era. La caldera esférica se apoyaba en un eje vertical. El vapor, saliendo de la caldera por los tubos acodados, empujaba a estos tubos en dirección contraria y la esfera giraba.

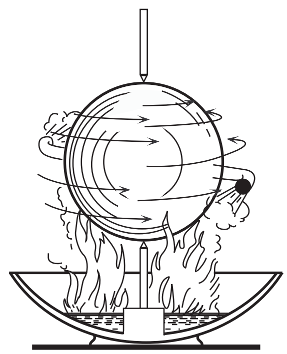


Fig. 32

En nuestros tiempos, la utilización del movimiento de reacción no se limita ya a crear juguetes o a recopilar observaciones interesantes, ha ido ya mucho más lejos. A veces, llaman al siglo veinte, siglo de la energía atómica, pero, no con menos razón, se le puede llamar siglo del movimiento de reacción, puesto que es difícil sobreestimar los grandes alcances a que conducirá el empleo de potentes motores de reacción. Esto, no sólo es una revolución en la construcción de aviones, es el comienzo, de la vinculación del hombre con el Universo.

El principio del movimiento de reacción ha permitido crear aviones que se mueven con velocidades de unos cuantos miles de kilómetros por hora, proyectiles a reacción que se levantan a la altura de cientos de kilómetros sobre la Tierra, satélites artificiales de la Tierra y cohetes cósmicos que efectúan viajes interplanetarios.

El motor de reacción es una máquina de la que, con gran fuerza, se despiden los gases que se forman al quemarse el combustible. El cohete se mueve en dirección contraria a la del flujo del gas.

¿A qué es igual la fuerza de arrastre que llevo el cohete al espacio? Sabemos que la fuerza es igual a la variación del impulso en una unidad de tiempo. Según la ley de conservación, el impulso del cohete se altera en la magnitud del impulso mv del gas despedido.

Esta ley de la naturaleza da la posibilidad de calcular, por ejemplo, la relación entre la fuerza reactiva de arrastre y el gasto necesario de combustible. Además, hay que determinar la magnitud de la velocidad de emanación de los productos de combustión. Si, por ejemplo, cada segundo se despiden 10 toneladas de gas a la velocidad de 2000 $\frac{m}{seg}$, la fuerza de arrastre será igual, aproximadamente, a $2 \cdot 10^{12}$ *dinas*, o sea, en cifras redondas, a 2000 toneladas.

Determinemos la variación de la velocidad en un cohete que se mueve por el espacio interplanetario.

El impulso de la masa de gas ΔM, despedida con la velocidad u, es igual a $u \cdot \Delta M$. Con esto, el impulso del cohete de masa M crece en la magnitud $M\Delta v$. Según la ley de conservación, estas dos magnitudes son iguales entre sí:

$$u \times \Delta M = M \times \Delta v \text{ o sea, } \Delta v = u\frac{\Delta M}{M}.$$

Sin embargo, si quisiéramos calcular la velocidad del cohete al despedir masas que se pueden comparar con la masa del cohete, la fórmula deducida resultaría errónea. Es que, en ella, se supone que la masa del cohete es constante. Sin embargo, se mantiene inalterable el siguiente resultado importante: siendo iguales las variaciones relativas de la masa, la velocidad aumenta en una misma magnitud. El cálculo con una fórmula exacta muestra, que, al disminuir la masa del cohete en dos veces, la velocidad alcanza $0.7u$.

Para que la velocidad del cohete llegue a $3u$, hay que quemar una masa de substancia igual a $m = \frac{19}{20}M$. Esto significa que, si queremos que la velocidad llegue a $3u$, o sea, a $6 - 8\ \frac{km}{seg}$, tenemos que conservar solamente $\frac{1}{20}$ parte de la masa del cohete.

Para alcanzar la velocidad de $7u$, la masa del cohete, durante el aceleramiento, tiene que disminuir en 1000 veces.

Estos cálculos muestran que no hay que apresurarse en aumentar la masa de combustible que se pueda llevar en el cohete. Cuanto más combustible se lleve, tanto más habrá que quemar. Con la velocidad dada de expulsión de los gases, es muy difícil conseguir un aumento de la velocidad del cohete.

Lo principal, para conseguir velocidades grandes de los cohetes, es el aumento de la velocidad de expulsión de los gases. En lo que a esto se refiere, en los cohetes tiene que jugar un papel decisivo el empleo de los motores que trabajan con un combustible nuevo, llamado nuclear.

Empleando cohetes de etapas múltiples se obtienen ventajas en la velocidad, sin tener necesidad de alterar la velocidad de despedida de los gases y consumiendo la misma masa de combustible. En el cohete de un piso, la masa de combustible disminuye y los depósitos vacíos continúan en movimiento con el cohete. Para el aceleramiento de la masa de los depósitos inútiles de combustible se necesita una energía complementaria. Una vez consumido el combustible, es conveniente desprenderse de los depósitos. En los cohetes múltiples modernos, no sólo se abandonan los depósitos y las tuberías, sino también los motores de los cohetes usados.

Naturalmente que mejor sería despedir continuamente la masa innecesaria del cohete. Por ahora, no existe tal construcción. El peso inicial de un cohete de tres pisos, de una «altitud» igual a la de un cohete de un piso, se puede hacer 6 veces menor. En este sentido, el cohete «continuo» es todavía más ventajoso en un 15 %.

Movimiento propulsado por la fuerza de gravedad

Hagamos rodar una carretilla no muy grande por dos planos inclinados bien pulidos. Tomando una tabla mucho más corta que la otra, las colocamos sobre un mismo apoyo. Entonces, uno de los planos inclinados estará más empinado, el otro tendrá un pequeño declive. Las partes superiores de ambas tablas, que son los puntos de partida de de la carretilla, estarán a la misma altura. ¿Qué les parece a ustedes, por qué plano obtendrá la carretilla mayor velocidad al rodar? Muchos creerán que por el plano más inclinado.

El experimento mostrará que éstos se equivocan, pues la carretilla alcanzará una velocidad igual. Mientras el cuerpo se mueve por el plano inclinado, sobre el actúa una fuerza constante, precisamente, la componente de la fuerza de gravedad que está dirigida a lo largo del movimiento (Fig. 33). La velocidad v que alcanza un cuerpo en el trayecto S, al moverse con la aceleración a, es, como sabemos, igual a $v = \sqrt{2aS}$

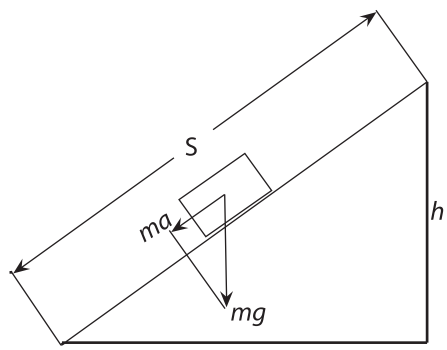


Fig. 33

¿De dónde se ve que esta magnitud no depende del ángulo de inclinación del plano? En la Fig. 33 se ven dos triángulos. Uno de ellos representa un plano inclinado. El cateto pequeño de este triángulo, indicado con la letra h, es la altura desde la que comienza el movimiento; la hipotenusa S, es el camino recorrido por el cuerpo en el movimiento acelerado. El triángulo pequeño de las fuerzas, con el cateto ma y con la hipotenusa mg, es semejante al mayor, puesto que son rectángulos y sus ángulos son iguales, como ángulos cuyos lados son perpendiculares entre si. Por consiguiente, la razón de los catetos tiene que ser igual a la razón de las hipotenusas, o sea,

$$\frac{h}{ma} = \frac{S}{mg},$$

de donde,

$$aS = gh.$$

Hemos demostrado que el producto aS y, por lo tanto, la velocidad final del cuerpo que ha rodado por el plano inclinado, no depende del ángulo de inclinación, sino que depende solamente de la altura de la que comenzó el movimiento hacia abajo. La velocidad $v = \sqrt{2gh}$ es la misma para todos los planos inclinados, con la única condición de que el movimiento comience desde una misma altura h. Esta velocidad resulta ser igual a la velocidad de la caída libre desde la altura h.

Midamos la velocidad del cuerpo en dos lugares del plano inclinado, en las alturas h_1 y h_2. Indiquemos con v_1 la velocidad del cuerpo en el instante en que pasa por el primer punto y, con v_2, la velocidad en el instante en que pasa por el segundo punto.

Si h es la altura desde la que comienza el movimiento, el cuadrado de la velocidad del cuerpo en el primer punto es $v_1^2 = 2g\,(h - h_1)$ y, en el segundo punto, $v_2^2 = 2g\,(h - h_2)$. Restando la primera de la segunda, hallamos cómo están relacionadas las velocidades del cuerpo al comienzo y al fin de cualquier trozo del plano inclinado con las alturas de estos puntos:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g\,(h_1 - h_2)\,.$$

La diferencia de cuadrados de las velocidades depende solamente de la diferencia de las alturas. Obsérvese que la igualdad obtenida vale lo mismo para los movimientos hacia arriba que para los movimientos hacia abajo. Si la primera altura es menor que la segunda (ascenso), la segunda velocidad es menor que la primera.

De esta igualdad se deduce que

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + gh_2,$$

lo que muestra que la suma de la mitad del cuadrado de la velocidad y de la altura multiplicada por g, es igual para cualquier punto del plano inclinado. Se puede decir, que la cantidad $\dfrac{v^2}{2} + gh$ se conserva durante el movimiento.

Lo más admirable es que la ley hallada se verifica para un movimiento sin rozamiento por cualquier montículo y, en general, por cualquier camino compuesto de ascensos y descensos, que se alternan con diversos declives. Esto es debido a que, cualquier camino se puede dividir en segmentos rectos. Cuanto menores se tomen los segmentos, tanto más cerca se aproximará la línea quebrada a la curva. Cada segmento de éstos se puede considerar como una parte de un plano inclinado y se le puede aplicar la regla obtenida.

Por lo tanto, la suma $\dfrac{v^2}{2} + gh$ es igual en cualquier punto de la trayectoria y, por consiguiente, la variación del cuadrado de la velocidad no depende de la forma y de la longitud del camino por el que se mueve el cuerpo, y se determina solamente por la diferencia de las alturas del punto inicial y del punto final del movimiento.

Al lector le puede parecer que nuestra conclusión no coincide con la experiencia cotidiana: en un camino largo y de poco declive, el cuerpo no toma ninguna velocidad y, al fin y al cabo, se para. Esto es cierto, pero, es que en nuestros razonamientos no contábamos con la fuerza de rozamiento. La igualdad escrita anteriormente tiene valor para un movimiento en el campo de gravedad de la Tierra, propulsado sólo por la fuerza de gravedad. Si las fuerzas de rozamiento son pequeñas, la ley deducida se cumplirá bastante bien. Los trineos con patines metálicos se deslizan por los montes resbaladizos de hielo con muy poco rozamiento. Se pueden hacer caminos largos de hielo, que comiencen con un descenso muy empinado, en los que se alcanza una velocidad muy grande y que, después, extravagantemente serpenteen hacia arriba y hacia abajo. Si no hubiese roce en absoluto, en tales montes se efectuaría el fin del viaje (cuando el trineo se para por sí mismo) a una altura igual a la inicial. Pero, como no se puede evitar el rozamiento, el punto del comienzo del movimiento del trineo estará más alto que el lugar donde se para.

La ley, según la cual, en el movimiento propulsado por la fuerza de gravedad, la velocidad final no depende de la forma del camino, se puede emplear para la resolución de diversos problemas interesantes.

Muchas veces muestran en el circo como un número emocionante, «el rizo» vertical. Un ciclista o una carretilla con un acróbata se establecen en un andamio alto. Después de realizar un descenso acelerado viene una ascensión. Ya tenemos al acróbata con la cabeza hacia abajo, otro descenso más y ya está descrito el rizo. Veamos el problema que tiene que resolver el ingeniero del circo. ¿A qué altura hay que hacer el andamio, del que se comienza el descenso, para que no se caiga el acróbata desde el punto superior del rizo? La condición es conocida: la fuerza centrífuga que aprisiona al acróbata hacia el andamio tiene que equilibrar a la fuerza de gravedad, que está dirigida en dirección contraria.

Por lo tanto, $mg \leq \frac{mv^2}{r}$, donde r es el radio del rizo y v es la velocidad del movimiento en el punto superior del rizo. Para alcanzar esta velocidad, hay que comenzar el movimiento desde un lugar que esté más alto que el punto superior del rizo en cierta magnitud h. La velocidad inicial del acróbata es igual a cero, por eso, en el punto superior del rizo, $v^2 = 2gh$. Pero, por otra parte, $v^2 \geq gr$. Por consiguiente, entre la altura h y el radio r del rizo subsiste la relación $h \geq \frac{r}{2}$. El andamio tiene que estar levantado sobre el punto superior del rizo en una cantidad no menor que la mitad de su radio. Claro que, teniendo en cuenta la fuerza inevitable de rozamiento, habrá que tomar cierta reserva de altura.

He aquí otro problema. Consideremos una cúpula, bien pulimentada, para que el rozamiento sea mínimo. Coloquemos sobre el vértice un objeto no muy grande y, dándole un pequeño golpe, hagámosle resbalar sobre la cúpula. Pronto o tarde, el objeto que resbala se desprenderá de la cúpula y comenzará a caer. Fácilmente podemos calcular cuándo se desprenderá el objeto de la superficie de la cúpula; en el instante del desprendimiento, la fuerza centrífuga tiene que ser igual a la componente del peso sobre la dirección del radio (en este instante, el cuerpo acabará de presionar sobre la cúpula: éste es, precisamente, el instante del desprendimiento). En la Fig. 34 se observan dos triángulos semejantes; está representado el instante del desprendimiento. En el triángulo de las fuerzas, hallamos la razón del cateto a la hipotenusa y la igualamos a la razón correspondiente de los lados del otro triángulo:

$$\frac{\frac{mv^2}{r}}{mg} = \frac{r-h}{r}.$$

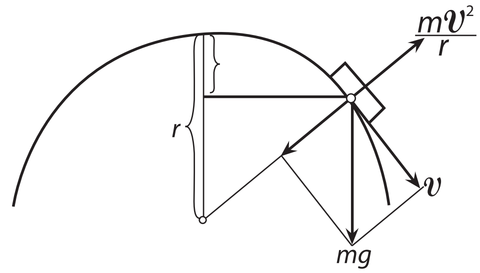


Fig. 34

Aquí, r es el radio de la cúpula esférica, y h, la diferencia de las alturas al comienzo y al fin del deslizamiento. Apliquemos ahora la ley de la independencia de la velocidad final de la forma del camino. Como se supone que la velocidad inicial del cuerpo es igual a cero, se tiene: $v^2 = 2gh$. Sustituyendo este valor en la proporción escrita anteriormente y efectuando transformaciones aritméticas, hallamos: $h = \frac{r}{3}$. Por lo tanto, el cuerpo se desprenderá de la cúpula a una altura situada a $\frac{1}{3}$ de radio más abajo del vértice de la cúpula.

Ley de conservación de la energía mecánica

En los ejemplos que acabamos de considerar, nos hemos convencido de que es conveniente conocer la cantidad que no varía (que conserva) su valor numérico durante el movimiento.

Por ahora, conocemos tal cantidad sólo para un cuerpo. ¿Y si en el campo de gravedad se mueven unos cuantos cuerpos ligados entre sí? Claro que no se debe creer que para cada uno de ellos se mantiene constante la expresión $\frac{v^2}{2} + gh$, puesto que cada uno de los cuerpos no sólo está propulsado por la fuerza de gravedad, sino también por los cuerpos contiguos. ¿Puede ser que se conserve la suma de tales expresiones, tomada para todo el grupo de cuerpos considerados?

Ahora demostraremos que no es válida esta suposición. Existe una cantidad que se conserva durante el movimiento de varios cuerpos, pero no es igual a la suma

$$\left(\frac{v^2}{2} + gh\right)_{cuerpo_1} + \left(\frac{v^2}{2} + gh\right)_{cuerpo_2} + ...$$

sino que es igual a la suma de expresiones semejantes, multiplicadas por las masas de los cuerpos correspondientes; o sea, que se conserva la suma.

$$m_1\left(\frac{v^2}{2} + gh\right)_1 + m_2\left(\frac{v^2}{2} + gh\right)_2 + ...$$

Para demostrar esta importante ley de la mecánica, veamos el ejemplo siguiente.

De una polea están suspendidas dos cargas, una masa grande M y una masa pequeña m. La carga grande tira de la pequeña y este grupo de dos cuerpos se mueve con velocidad creciente.

La fuerza motriz es la diferencia en peso de estos cuerpos, $Mg - mg$.Como en el movimiento acelerado participa la masa de ambos cuerpos, la ley de Newton se escribirá, para este caso, así:

$$(M - m)\, g = (M + m)\, a.$$

Consideremos dos instantes del movimiento y demostremos que la suma de las expresiones $\left(\frac{v^2}{2} + gh\right)$, multiplicadas por las masas correspondientes, se mantiene, verdaderamente, constante. Así pues, se necesita demostrar la igualdad:

$$m\left(\frac{v_2^2}{2} + gh_2\right) + M\left(\frac{V_2^2}{2} + gH_2\right) = m\left(\frac{v_1^2}{2} + gh_1\right) + M\left(\frac{V_1^2}{2} + gH_1\right).$$

Se han señalado con letras mayúsculas las cantidades físicas que caracterizan la carga grande. Los subíndices 1 y 2 se refieren aquí a las cantidades para los dos instantes considerados del movimiento.

Como las cargas están ligadas con la cuerda, se tiene, $v_1 = V_1$, $v_2 = V_2$. Aprovechando estas simplificaciones y trasladando al segundo miembro todos los términos que contienen alturas y, al primer miembro, los que contienen velocidades, obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{(M + m)}{2}\left(v_2^2 - v_1^2\right) &= mgh_1 + MgH_1 - mgh_2 - MgH_2 = \\ &= mg\,(h_1 - h_2) + Mg\,(H_1 - H_2)\,. \end{aligned}$$

Claro está que las diferencias de las alturas de las cargas son iguales (pero con signo contrario, puesto que una carga se eleva y otra desciende). Por lo tanto,

$$\frac{(M + m)}{2}\left(v_2^2 - v_1^2\right) = (M - m)\, gS,$$

en donde S es el camino recorrido.

En la pág. 32 se vio que la diferencia de los cuadrados de las velocidades , al comienzo y al fin del segmento S del trayecto recorrido con la aceleración a, es igual a $v_1^2 - v_2^2$, al comienzo y al fin del segmento S del trayecto recorrido con la aceleración a, es igual a

$$v_1^2 - v_2^2 = 2aS.$$

Sustituyendo esta expresión en la última igualdad, hallamos:

$$(M + m)\, a = (M - m)\, g.$$

Pero ésta es la fórmula de Newton, escrita anteriormente para nuestro ejemplo. De este modo, queda demostrado lo que se pedía: para dos cuerpos, la suma de las expresiones $\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)$, multiplicadas por las masas correspondientes[8], se mantiene constante durante el movimiento, o como suele decirse, se conserva, es decir,

$$m\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)+M\left(\frac{V^2}{2}+gH\right)=\text{const.}$$

Para el caso de un cuerpo, esta relación se convierte en la demostrada anteriormente:

$$\frac{v^2}{2}+gh=\text{const.}$$

La mitad del producto de la masa por el cuadrado de la velocidad se llama energía cinética K:

$$K=\frac{mv^2}{2}.$$

El producto del peso del cuerpo por la altura se llama energía potencial U de gravitación del cuerpo respecto a la Tierra:

$$U=mgh.$$

Hemos demostrado, que durante el movimiento de un sistema de dos cuerpos (lo mismo se puede demostrar para un sistema que se compone de muchos cuerpos), la suma de las energías cinética y potencial de los cuerpos se mantiene constante.

En otras palabras, un aumento de la energía cinética de un grupo de cuerpos se puede efectuar solamente a causa de una disminución de la energía potencial de este sistema, y recíprocamente.

La ley demostrada se llama ley de conservación de la energía mecánica.

La ley de conservación de la energía mecánica es una ley muy importante de la naturaleza. Todavía no hemos apreciado por completo su valor. Más adelante, cuando estudiemos el movimiento de las moléculas, se verá su universalidad, su aplicación a todos los fenómenos de la naturaleza.

Trabajo

Como resultado de empujar o de tirar de un cuerpo, sin encontrar ningún obstáculo, se obtiene la aceleración del mismo. El incremento producido de energía cinética se llama trabajo A de la fuerza:

$$A=\frac{mv_2^2}{2}-\frac{mv_1^2}{2}.$$

Según la ley de Newton, la aceleración y, por consiguiente, el aumento de la energía cinética, se determina mediante la suma vectorial de todas las fuerzas aplicadas al cuerpo.

[8]Claro que con la misma razón se puede multiplicar la expresión $\frac{v^2}{2}+gh$ por $2m$ o por $\frac{m}{2}$ y, en general, por cualquier coeficiente. Se ha convenido obrar de la manera más sencilla, o sea, multiplicar simplemente por m.

Por lo tanto, en el caso de muchas fuerzas, la fórmula $A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$ representa el trabajo de la fuerza resultante. Expresemos el trabajo A mediante la magnitud de la fuerza.

Para mayor sencillez, nos limitaremos al caso, cuando el movimiento es posible sólo en una dirección, es decir, cuando empujamos o arrastramos una carretilla de masa m, situada sobre los rieles (Fig. 35).

Según la fórmula general del movimiento uniformemente acelerado, se tiene $v_1^2 - v_2^2 = 2aS$. Por eso, el trabajo de todas las fuerzas en el camino S, es:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = maS.$$

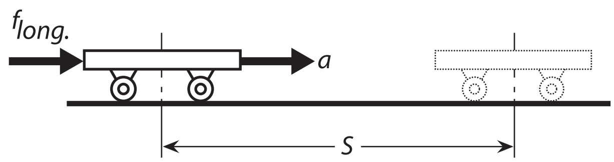


Fig. 35

El producto ma es igual a la componente de la fuerza total que lleva la dirección del movimiento. Por lo tanto, $A = f_{long} \cdot S$.

El trabajo de la fuerza se mide por el producto del camino recorrido por la componente de la fuerza que va a lo largo de la dirección del camino.

La fórmula del trabajo es justa para fuerzas de cualquier procedencia y para movimientos de cualesquiera trayectorias.

Señalemos que el trabajo puede ser igual a cero, a pesar de que sobre el cuerpo actúen fuerzas.

Por ejemplo, el trabajo de la fuerza de Coriolis es igual a cero. Es que esta fuerza es perpendicular a la dirección del movimiento. Como no tiene componente longitudinal, el trabajo es igual a cero.

No se necesita efectuar un trabajo para cualquier curvatura de la trayectoria que no vaya acompañada de una alteración de la velocidad, pues la energía cinética no varía.

¿Puede ser negativo el trabajo? Claro que si, pues, si la fuerza forma un ángulo obtuso con la dirección del movimiento, ésta no ayuda, sino que obstaculiza al movimiento. La componente longitudinal de la fuerza sobre la dirección será negativa. En este caso, se dirá que la fuerza efectúa un trabajo negativo. La fuerza de rozamiento siempre retarda el movimiento, o sea, efectúa un trabajo negativo.

Por el incremento de la energía cinética se puede juzgar sobre el trabajo de la fuerza resultante.

El trabajo de cada una de las fuerzas se tiene que calcular como el producto $f_{long} \cdot S$. En el caso del movimiento uniforme de un automóvil por la carretera, no hay aumento de energía cinética y, por consiguiente, el trabajo de la fuerza resultante es igual a cero. Pero, sin duda, el trabajo del motor no es igual a cero, pues es igual al producto de la fuerza de arrastre por el camino recorrido, y se compensa por completo con el trabajo negativo de las fuerzas de resistencia y de rozamiento.

Valiéndose del concepto de «trabajo», se pueden describir más abreviadamente y con mayor claridad las propiedades tan interesantes de la fuerza de gravedad que acabamos de conocer. Si un cuerpo, propulsado por la fuerza de gravedad, se traslada de un sitio a otro, la energía cinética se altera. Esta alteración de la energía cinética es igual al trabajo A. Pero, por la ley de la conservación de la energía, ya sabemos que el aumento de la energía cinética se efectúa a cuenta de la disminución de la energía potencial.

Por lo tanto, el trabajo de la fuerza de gravedad es igual a la disminución de la energía potencial:

$$A = U_1 - U_2.$$

Es evidente, que la disminución (o el aumento) de la energía potencial y, por consiguiente, el aumento (o la disminución) de la energía cinética, son los mismos, independientemente del camino por el que se mueva el cuerpo. Esto significa que el trabajo de la fuerza de gravedad no depende de la forma del camino. Si el cuerpo se ha trasladado del primer punto al segundo aumentando la energía cinética, éste se trasladará del segundo punto al primero disminuyendo la energía cinética en una misma cantidad, exactamente. Y, además, es indiferente si la forma del camino «de ida» coincide con la forma del camino «de regreso». Por lo tanto, los trabajos «de ida» y «de regreso», son iguales. Pero si el cuerpo hace un recorrido grande y si el fin del camino coincide con el comienzo, el trabajo será igual a cero.

Figúrense que por un canal, de la forma más extravagante que se quiera, resbala sin rozamiento un cuerpo. Pongámoslo en camino desde el punto más alto. El cuerpo se deslizará hacia abajo tomando velocidad. A cuenta de la energía cinética obtenida, el cuerpo vencerá el ascenso y, por fin, volverá a la estación de partida. ¿Con qué velocidad? Es natural que con la misma que tenía al partir de la estación. La energía potencial volverá a tomar su valor anterior. Siendo esto así, la energía cinética no puede disminuir ni aumentar. Por lo tanto, el trabajo es igual a cero.

El trabajo en un camino en forma de anillo (los físicos suelen decir, en un camino cerrado) no es igual a cero para todas las fuerzas. No hay necesidad de demostrar que el trabajo de las fuerzas de rozamiento siempre será tanto mayor, cuanto más largo sea el camino.

¿En qué unidades se miden el trabajo y la energía?

Como el trabajo es igual a la variación de la energía, el trabajo y la energía (claro que tanto la potencial como la cinética) se miden en unas mismas unidades. El trabajo es igual al producto de la fuerza por el camino. El trabajo de la fuerza de una *dina* en el camino de un centímetro se llama *erg*:

$$1\,erg = 1\ dina \cdot 1\,cm.$$

Este trabajo es muy pequeño. Tal trabajo lo puede realizar un mosquito venciendo la fuerza de gravedad al volar del dedo pulgar de la mano al dedo índice. El *joule* es una unidad más grande de trabajo y energía. Éste es 10 millones de veces mayor que el *erg*:

$$1 \; joule = 10 \text{ millones de } ergs.$$

Con bastante frecuencia se emplea la unidad de trabajo de 1 kilográmetro ($1\,kgm$ es igual al trabajo realizado por una fuerza de $1\,kgf$ en el camino de $1\,m$). Este trabajo realiza, aproximadamente, una pesa de un kilogramo al caer de la mesa el suelo.

Como ya se sabe, la fuerza, de 1 kgf es igual a 981000 *dinas*, 1 m es igual a 100 *cm*. Por lo tanto, 1 kgm de trabajo es igual a 98 100 000 *ergs*, o sea, a 9.81 *joules*. Por el contrario, 1 *joule* es igual a 0.102 kgm.

El nuevo sistema de unidades (SI), del que ya se habló y del que todavía seguiremos hablando, utiliza el *joule* como unidad de trabajo y de energía, y determina a éste como el trabajo de la fuerza de 1 *newton* (véase la pág. 30) en el camino de 1 *metro*. Viendo la simplicidad con que se determina en este caso la fuerza, es fácil darse cuenta en qué consisten las ventajas del nuevo sistema de unidades.

Disminución de la energía

Probablemente, el lector se habrá dado cuenta de que en las ilustraciones de la ley de conservación de la energía mecánica, repetíamos constantemente: «no habiendo rozamiento, si no hubiese rozamiento...». Sin embargo, el rozamiento inevitablemente acompaña a cualquier movimiento. ¿Qué valor tiene una ley que no tiene en cuenta una circunstancia práctica tan importante? La respuesta a esta pregunta la aplazamos; veamos ahora a qué conduce el rozamiento.

Las fuerzas de rozamiento tienen dirección contraria al movimiento y, por lo tanto, efectúan un trabajo negativo. Esto da lugar a una pérdida forzosa de energía mecánica.

¿Conducirá esta pérdida inevitable de energía mecánica a la interrupción del movimiento? Es fácil convencerse de que el rozamiento no puede detener cualquier movimiento.

Figuremos un sistema cerrado, compuesto de unos cuantos cuerpos en acción mutua. Como ya sabemos, respecto a tal sistema cerrado se verifica la ley de conservación del impulso. Un sistema cerrado no puede alterar su impulso, por eso, su movimiento es rectilíneo y uniforme. El rozamiento dentro de tal sistema puede detener el movimiento relativo de las partes del sistema, pero, no influye en la velocidad y en la dirección de todo el sistema entero.

Existe también una ley de la naturaleza, llamada ley de conservación del momento de rotación (que veremos más adelante), que no permite al rozamiento acabar con la rotación uniforme de todo el sistema cerrado.

Por lo tanto, en un sistema cerrado de cuerpos, la existencia de rozamiento conduce al cese de todos los movimientos y no representa un obstáculo solamente para el movimiento uniforme rectilíneo y para el movimiento uniforme de revolución de todo este sistema en su conjunto.

Y, la causa de que el globo terrestre altere un poco la velocidad de su rotación, no estriba en el rozamiento mutuo de los cuerpos terrestres, sino en que la Tierra no es un sistema aislado.

En lo que se refiere a los movimientos de los cuerpos en la Tierra, todos ellos están sometidos al rozamiento y pierden su energía mecánica. Por eso, el movimiento siempre cesa, si no se mantiene desde fuera.

Ésta es una ley de la naturaleza. ¿Y si se consiguiese engañar a la naturaleza? Entonces... entonces, se podría realizar el perpetuum móbile, que significa «movimiento perpetuo».

Perpetuum móbile

Bertold, el héroe de la obra de Pushkin «Escenas de los tiempos caballerescos», soñaba con la realización del perpetuum móbile. «¿Qué es el perpetuum móbile?», le preguntaban en una conversación. «Es el movimiento perpetuo, contestaba Bertold. Si yo hallase el movimiento perpetuo, no vería confín a la creación del hombre. Hacer oro, es un problema seductor, el descubrimiento puede ser curioso, lucrativo, pero, hallar la solución del perpetuum móbile...»

El perpetuum móbile o móvil perpetuo, es una máquina que trabaja, no sólo a pesar de la ley de la disminución de la energía mecánica, sino infringiendo la ley de la conservación de la energía mecánica, que, como ya sabemos, se verifica solamente en condiciones ideales, inexistentes, libres de rozamiento. El móvil perpetuo, una vez construido, tendría que comenzar a trabajar «por sí solo»; por ejemplo, girar una rueda o levantar pesos de abajo a arriba. El trabajo tendría que realizarse eterna y continuamente, y el motor no tendría que necesitar ni combustible, ni la mano del hombre, ni la energía del salto del agua, es decir, nada tomado del exterior.

El primer documento fidedigno conocido hasta ahora sobre la «realización» de la idea del móvil perpetuo pertenece al siglo XIII. Es curioso que, después de seis siglos, en el año 1910, en una de las instituciones científicas de Moscú, fue sometido a «examen» un «proyecto» exactamente igual.

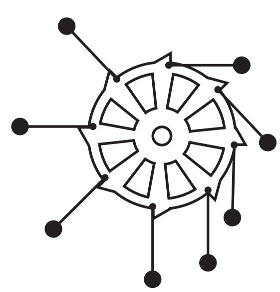


Fig. 36

El proyecto de este móvil perpetuo está representado en la Fig. 36. Al girar la rueda, las pesas sobrecaen y, según la idea del inventor, mantienen el movimiento, puesto que las pesas caídas presionan con más fuerza, ya que actúan a mayor distancia del eje. Construyendo tal «máquina» que, por cierto, no es tan complicada, el inventor llega a convencerse de que después de dar una o dos vueltas por inercia, la rueda se para. Pero esto no le desanima. ¡Se ha cometido un error!: las barras hay que hacerlas más largas, hay que cambiar la forma de los dientes. Y el trabajo inútil, al que muchos de los inventores primitivos dedicaron su vida, continúa, claro que con el mismo éxito.

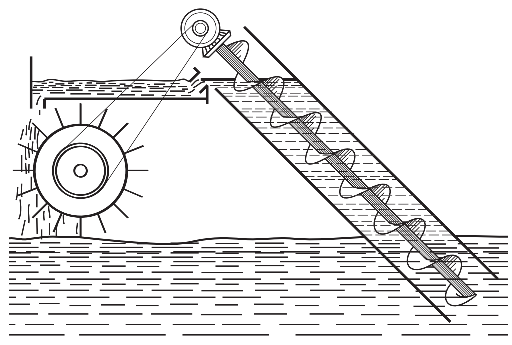


Fig. 37

En general, no se propusieron muchas variantes de móviles perpetuos: diversas ruedas automotores, que de principio no se diferenciaban mucho de la descrita; motores hidráulicos como el que se muestra en la Fig. 37, inventado en el año 1634; motores que emplean los sifones o los vasos capilares (Fig. 38); la pérdida de peso en el agua (Fig. 39); la atracción de los cuerpos férreos por los imanes. No siempre se puede acertar a cuenta de qué pensaba el inventor realizar el movimiento perpetuo.

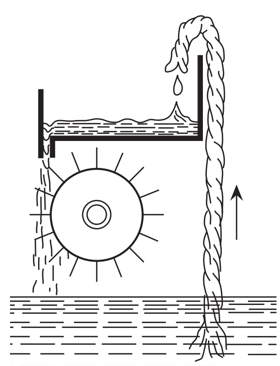


Fig. 38

Ya antes de haberse establecido la ley de la conservación de la energía, la afirmación de la imposibilidad del perpetuum móbile la encontramos en la disposición oficial hecha por la Academia francesa en el año 1775, cuando ésta decidió no someter más a examen y a prueba ningún proyecto de móvil perpetuo.

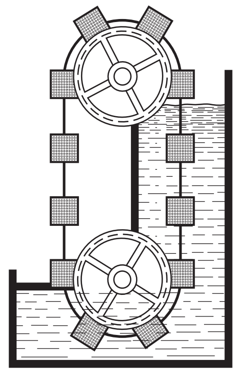


Fig. 39

Muchos mecánicos de los siglos XVII–XVIII se basaban ya en sus demostraciones en el axioma de la imposibilidad del perpetuum móbile, a pesar de que el concepto de energía y la ley de conservación de la energía aparecieron en la ciencia mucho más tarde.

Actualmente, está claro que los inventores que procuran crear el móvil perpetuo, no sólo entran en contradicción con el experimento, sino que también cometen un error de lógica elemental.

En efecto, la imposibilidad del perpetuum móbile, es una consecuencia de las leyes de la mecánica, de las que ellos mismos parten cuando argumentan su «invento».

Es posible que, a pesar de su esterilidad, la búsqueda del móvil perpetuo haya jugado algún papel útil, puesto que, al fin y al cabo, condujo al descubrimiento de la ley de conservación de la energía.

Choques

Cualquiera que sea el choque de dos cuerpos, siempre se conserva el impulso. En cuanto a la energía, ésta, como acabamos de ver, forzosamente disminuye, a causa de diversas clases de rozamientos.

Sin embargo, si los cuerpos que chocan son de un material elástico, por ejemplo, de marfil o de acero, la pérdida de energía es insignificante.

Tales choques, en los que la suma de las energías cinéticas antes y después del choque son iguales, se llaman perfectamente elásticos.

Incluso cuando chocan los materiales más elásticos, se efectúa una pequeña pérdida de energía cinética; por ejemplo, en el caso de las bolas de marfil de un billar, ésta alcanza 3–4 %.

La conservación de la energía cinética en el choque elástico da la posibilidad de resolver una serie de problemas.

Examinemos, por ejemplo, el choque frontal de bolas de distinta masa. La ecuación del impulso tiene la forma (suponemos que la bola N^o 2 estaba en reposo antes del choque)

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2,$$

y la de la energía es

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2},$$

en donde v_1 es la velocidad de la primera bola antes del choque, y u_1 y u_2, las velocidades de las bolas después del choque.

Como el movimiento se efectúa a lo largo de una línea recta (que pasa por los centros de las bolas; precisamente, esto significa que el choque es frontal), se han suprimido las flechas vectoriales sobre las letras.

De la primera ecuación, se tiene:

$$u_2 = \frac{m_1}{m_2}\left(v_1 - u_1\right).$$

Sustituyendo esta expresión para u_2 en la ecuación de la energía, obtenemos:

$$\frac{m_1}{2}\left(v_1^2 - u_1^2\right) = \frac{m_2}{2}\left[\frac{m_1}{m_2}\left(v_1 - u_1\right)\right]^2.$$

Una de las soluciones de esta ecuación es $u_1 = v_1$ y $u_2 = 0$. Pero, este resultado no nos interesa, puesto que la igualdad $u_1 = v_1$ y $u_2 = 0$ significa que las bolas no chocan. Por eso, buscamos otra solución de la ecuación. Simplificando por $m_1(v_1 - u_1)$, obtenemos:

$$\frac{1}{2}\left(v_1 + u_1\right) = \frac{1}{2}\cdot\frac{m_1}{m_2}\left(v_1 - u_1\right),$$

es decir

$$m_2 v_1 + m_2 u_1 = m_1 v_1 - m_1 u_1,$$

o sea,

$$\left(m_1 - m_2\right) v_1 = \left(m_1 + m_2\right) u_1,$$

que da el siguiente valor para la velocidad de la primera bola después del choque:

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1.$$

En el choque frontal contra la bola inmóvil, la bola chocante rebota de vuelta (u_1 es negativo), si su masa es menor. Si m_1 es mayor que m_2, ambas bolas continúan el movimiento en dirección del choque.

Al jugar al billar, en el caso de un choque frontal exacto, frecuentemente se observa el cuadro siguiente: la bola chocante se para bruscamente, mientras que la bola chocada se dirige a la tronera. Esto se explica por la ecuación que acabamos de hallar. Las masas de las bolas son iguales, y la ecuación da $u_1 = 0$, y, por consiguiente, $u_2 = v_1$. La bola chocante se para, mientras que la segunda bola comienza el movimiento con la velocidad de la chocante. Parece como si las bolas intercambiaran sus velocidades.

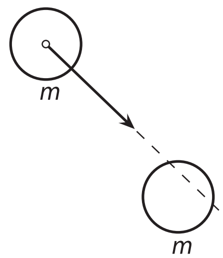


Fig. 40

Veamos otro ejemplo de choque de cuerpos que también está sometido a la ley del choque elástico: el choque oblicuo de cuerpos de igual masa (Fig. 40). Antes del choque, el segundo cuerpo estaba en reposo; por eso, las leyes de conservación del impulso y de la energía tienen la forma:

$$mv_1 = mu_1 + mu_2,$$

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mu_1^2}{2} + \frac{mu_2^2}{2}.$$

Simplificando por la masa, obtenemos:

$$v_1 = u_1 + u_2,$$

$$v_1^2 = u_1^2 + u_2^2.$$

El vector $\boldsymbol{v}_1$ es la suma vectorial de $\boldsymbol{u}_1$ y $\boldsymbol{u}_2$. Pero esto significa que las longitudes de los vectores velocidades forman un triángulo.

¿Qué triángulo es éste? Recordemos el teorema de Pitágoras. Nuestra segunda ecuación lo expresa. Esto significa, que el triángulo de las velocidades tiene que ser rectángulo con la hipotenusa $\boldsymbol{v}_1$ y con los catetos $\boldsymbol{u}_1$ y $\boldsymbol{u}_2$. Por consiguiente, $\boldsymbol{u}_1$ y $\boldsymbol{u}_2$ forman entre sí un ángulo recto. Este interesante resultado muestra que cualquiera que sea el choque elástico oblicuo, los cuerpos de igual masa rebotan formando un ángulo recto.

V. Oscilaciones

Equilibrio

En algunos casos es muy difícil mantener el equilibrio: hagan la prueba de pasar por una cuerda tirante. Al mismo tiempo, nadie premiará con aplausos al que esté sentado en una mecedora. Pero, en realidad, éste también mantiene su equilibrio.

¿Qué diferencia hay entre estos dos ejemplos? ¿En qué caso el equilibrio se establece «por sí solo»?

Parece evidente la condición de equilibrio. Para que el cuerpo no se mueva de su sitio, las fuerzas que actúan sobre él tienen que estar en equilibrio; mejor dicho, la suma de estas fuerzas tiene que ser igual a cero. En realidad, esta condición es necesaria para el equilibrio del cuerpo; pero, ¿será ésta suficiente?

En la Fig. 41 está representado el perfil de una montaña, que fácilmente se puede construir con cartón. El comportamiento de la bolita es distinto, según el sitio en que la coloquemos en la montaña. En cualquier punto de la pendiente de la montaña, sobre la bolita actúa una fuerza que la obliga a rodar hacia abajo. Esta fuerza propulsora es la de gravedad, o mejor dicho, su proyección sobre la dirección de la tangente a la línea del perfil de la montaña, trazada en el punto que nos interesa. Por esto, se comprende, que cuanto más suave sea la pendiente, tanto menor será la fuerza que actúa sobre la bolita.

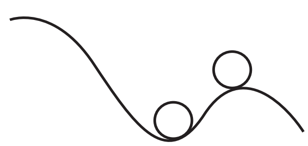


Fig. 41

Ante todo, nos interesan aquellos puntos, en los que la fuerza de gravedad se equilibra por completo con la reacción del apoyo y, por consiguiente, la fuerza resultante que actúa sobre la bolita es igual a cero. Esta condición se verifica en los vértices de la montaña y en los puntos inferiores, en las depresiones. Las tangentes en estos puntos son horizontales, y las fuerzas resultantes que actúan sobre la bolita son iguales a cero.

Sin embargo, no se puede colocar la bolita sobre los vértices, a pesar de que la fuerza resultante sea igual a cero; y si esto se consigue, inmediatamente se revela que la causa del éxito es el rozamiento. Un pequeño golpe o un suave soplido, superarán a la fuerza de rozamiento y la bolita se moverá del sitio y echará a rodar hacia abajo.

Para una bolita lisa, colocada sobre una montaña resbaladiza, las únicas posiciones de equilibrio son los puntos inferiores de las depresiones. Si con un golpe o con una corriente de aire se expulsase a la bolita de este lugar, ésta volvería por sí sola a este sitio.

No hay duda que en una depresión, en un hoyo, en una hondura, el cuerpo está en equilibrio. Al desviarse de esta posición, el cuerpo es propulsado por una fuerza que le hace retornar. En las cumbres de la montaña, el cuadro es otro; si el cuerpo se ha apartado de esta posición, sobre él actúa la fuerza «que le aleja» y no la que le retorna. Por lo tanto, la igualdad a cero de la fuerza resultante es la condición necesaria, pero no suficiente, para el equilibrio estable.

El equilibrio de la bolita en la montaña se puede examinar también desde otro punto de vista. Los lugares de depresión corresponden a los mínimos de la energía potencial, y las cumbres, a los máximos. La ley de conservación de la energía impide la alteración de las posiciones, en las cuales la energía potencial es mínima. Tal alteración convertiría en negativa a la energía cinética, lo cual es imposible. Otra cosa ocurre en los puntos vértices. La salida de estos puntos está ligada con la disminución de la energía potencial y, por lo tanto, con el aumento de la energía cinética y no con su disminución.

Así pues, en la posición de equilibrio, la energía potencial tiene que tener valor mínimo, en comparación con sus valores en los puntos vecinos.

Cuanto más hondo sea el hoyo, tanto más estabilidad habrá. Como ya conocemos la ley de conservación de la energía, inmediatamente podemos decir en qué condiciones saldrá rodando el cuerpo del hoyo. Para eso, hay que comunicar al cuerpo una energía cinética que sea suficiente para levantarlo hasta el borde del hoyo. Cuanto más profundo sea el hoyo, tanto más energía cinética se necesitará para infringir el equilibrio estable.

Oscilaciones simples

Si se empuja una bolita situada en un hoyo, ésta comenzará a moverse por el montículo, perdiendo poco a poco su energía cinética. Cuando se pierda toda por completo, habrá una parada instantánea y comenzará el movimiento hacia abajo. Ahora, la energía potencial pasará a energía cinética. La bolita tomará velocidad, superará por inercia la posición de equilibrio y comenzará de nuevo el ascenso, pero, por el lado opuesto. Si el rozamiento es insignificante, este movimiento «de arriba, abajo» puede continuar mucho tiempo y, en el caso ideal, no habiendo rozamiento, es de eterna duración.

Por lo tanto, el movimiento alrededor de la posición de equilibrio estable, siempre es de carácter oscilante.

Para el estudio de las oscilaciones, quizás sea más útil el péndulo que la bolita que pasa rodando por el hoyo. Aunque sólo sea porque en el péndulo es más fácil reducir al mínimo el rozamiento.

Cuando, al inclinarse el péndulo, el grave del mismo ocupa la posición extrema, su velocidad y su energía cinética son iguales a cero. En este instante, la energía potencial es máxima. Cuando el grave va hacia abajo, la energía potencial disminuye y se transforma en cinética. Por consiguiente, la velocidad del movimiento crece. Cuando el grave pasa por la posición inferior, su energía potencial es mínima y, respectivamente, su energía cinética y su velocidad son máximas. Durante el movimiento ulterior, el grave de nuevo asciende. Ahora, la velocidad disminuye y la energía potencial aumenta.

Menospreciando las pérdidas en el rozamiento, el grave se inclina hacia la derecha, a una distancia equivalente a su desviación inicial hacia la izquierda. La energía potencial se ha transformado en cinética y después se ha creado, en la misma cantidad, una «nueva» energía potencial. Hemos descrito la primera mitad de una oscilación. La segunda mitad se efectúa del mismo modo, pero el grave se mueve hacia el lado opuesto.

El movimiento de oscilación es un movimiento de repetición o, como suele decirse, periódico. Volviendo al punto inicial, el grave repite cada vez su movimiento (si no se tienen en cuenta las alteraciones que son debidas al rozamiento), tanto en lo que respecta al camino, como en lo que respecta a la velocidad y a la aceleración. El tiempo invertido en una oscilación, o sea, el que se necesita para volver al punto inicial, es el mismo para la primera, segunda y todas las oscilaciones ulteriores. Este tiempo, que representa una de las características más importantes de la oscilación, se llama período y se señala con la letra T.

Después del tiempo T, el movimiento se repite, es decir, que después del tiempo T siempre hallaremos al cuerpo oscilando en el mismo lugar del espacio, moviéndose hacia el mismo lado. Después de medio período, el desplazamiento del cuerpo, así como la dirección del movimiento, cambia de signo. Como el período T es el tiempo de una oscilación, el número n de oscilaciones en una unidad de tiempo es igual a $\dfrac{1}{T}$.

¿De qué depende el período de oscilación de un cuerpo que se mueve en las proximidades de la posición de equilibrio estable? Y, en particular, ¿de qué depende el período de oscilación del péndulo? El primero que planteó y resolvió este problema fue Galileo. Ahora deduciremos la fórmula de Galileo.

Mas, con métodos elementales resulta difícil aplicar las leyes de la mecánica al movimiento que no es uniformemente acelerado. Por eso, para vencer esta dificultad vamos a hacer que el grave del péndulo no oscile en el plano vertical, sino que describa una circunferencia, manteniéndose todo el tiempo en una misma altura. No es difícil crear este movimiento; no hay más que dar un golpe inicial al péndulo, separado de la posición de equilibrio, en dirección, exactamente perpendicular al radio de la inclinación, y elegir la fuerza de este golpe.

En la Fig. 42 está representado este «péndulo circular». El grave de masa m se mueve sobre una circunferencia. Por consiguiente, además de la fuerza de gravedad mg, sobre éste actúa la fuerza centrífuga $m \cdot \dfrac{v^2}{r}$, que se puede representar en la forma $4\pi^2 n^2 rm$. Aquí, n es el número de vueltas por segundo. Por eso, la expresión de la fuerza centrífuga se puede escribir también así: $m \cdot \dfrac{4\pi^2 r}{T^2}$. La resultante de estas dos fuerzas estira el hilo del péndulo.

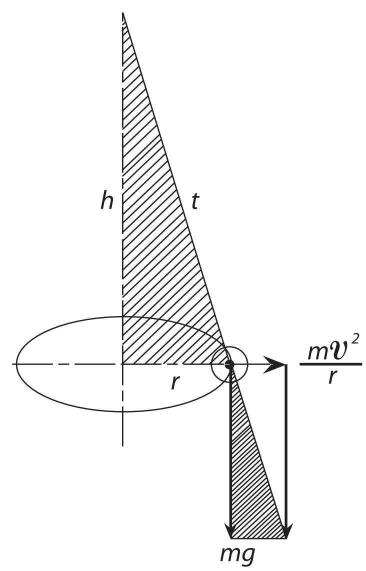


Fig. 42

En la figura están rayados dos triángulos semejantes: el de las fuerzas y el de las distancias. Las razones de los catetos correspondientes son iguales, por lo tanto,

$$\frac{mgT^2}{m4\pi^2 r} = \frac{h}{r} \text{ o } T = 2\pi\sqrt{\frac{h}{g}}.$$

¿De qué causas depende, entonces, el período de oscilación del péndulo? Si efectuamos experimentos en un mismo lugar del globo terrestre (g no varía), el periodo de oscilación dependerá sólo de la diferencia de alturas del punto de suspensión y del punto en que se encuentra el grave. La masa del grave, como siempre ocurre en el campo de gravedad, no influye en el período de oscilación.

Resulta interesante la siguiente circunstancia. Estamos estudiando el movimiento en las proximidades de la posición de equilibrio estable. Para pequeñas oscilaciones, la diferencia h de alturas se puede sustituir por la longitud l del péndulo. Es fácil comprobar esto. Si la longitud del péndulo es 1 m, y el radio de inclinación es 1 cm, se tiene:

$$h = \sqrt{10000 - 1} = 99.995\ cm.$$

La diferencia entre h y l alcanza 1 % sólo para elongaciones de 14 cm. Por lo tanto, el período de las oscilaciones libres del péndulo, para elongaciones no muy grandes de la posición de equilibrio, es igual a

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

es decir, depende solamente de la longitud del péndulo y del valor de la aceleración de la fuerza de gravedad en el lugar donde se realiza el experimento, y no depende de la magnitud de la elongación del péndulo de la posición de equilibrio.

La fórmula $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ha sido deducida para el péndulo circular; y, ¿cuál será la fórmula para el péndulo ordinario «plano»? Resulta que la fórmula conserva su forma. No vamos a hacer una demostración rigurosa, pero si observaremos, que la sombra del grave del péndulo circular sobre la pared oscila casi igual que un péndulo plano; la sombra realiza una oscilación, precisamente, durante el mismo tiempo en que la bolita describe una circunferencia.

La aplicación de las oscilaciones pequeñas alrededor de la posición de equilibrio, da la posibilidad de realizar la medida del tiempo con gran exactitud.

Según la leyenda, Galileo estableció la independencia del período de oscilación del péndulo, de la amplitud y de la masa, observando durante la misa en la catedral el balanceo de dos grandísimas arañas. Así pues, el período de oscilación del péndulo es proporcional a la raíz cuadrada de su longitud. De este modo, el período de oscilación de un péndulo de un metro, es dos veces mayor que el período de oscilación de un péndulo de 25 *cm* de longitud. Luego, de la fórmula para el período de oscilación del péndulo, se deduce que un mismo péndulo oscila con distinta ligereza en diversas latitudes terrestres. A medida que nos acercamos al ecuador, la aceleración de la fuerza de gravedad disminuye y el período de oscilación aumenta.

El período de oscilación se puede medir con gran exactitud. Por eso, los experimentos con péndulos dan la posibilidad de medir la aceleración de la fuerza de gravedad con mucha precisión.

Desarrollo de las oscilaciones

Unamos la mina de un lápiz suave a la parte inferior del grave de un péndulo y colguemos el péndulo encima de una hoja de papel, de modo que la mina del lápiz esté en contacto con el papel (Fig. 43). Inclinemos, ahora, ligeramente el péndulo. Al balancear, la mina del lápiz marcará sobre el papel un segmento pequeño de una recta. En el medio del balanceo, cuando el péndulo pasa por la posición de equilibrio, la línea marcada por la mina será más gruesa, ya que en esta posición la mina presiona más sobre el papel. Si trasladamos la hoja de papel en dirección perpendicular al plano de oscilación, se dibujará una curva, representada en la Fig. 43. Es fácil comprender que las ondulaciones obtenidas se sitúan muy densamente, si se tira del papel con lentitud, y más aisladamente, si la hoja de papel se mueve con una velocidad considerable. Para que la curva resulte perfecta, como en la figura, es necesario que el movimiento de la hoja de papel sea estrictamente uniforme.

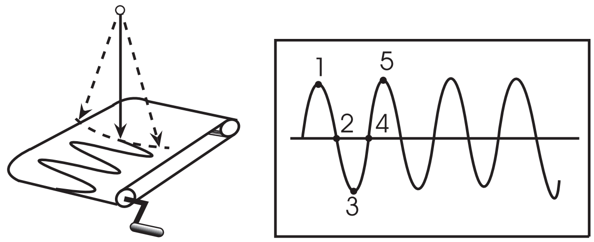


Fig. 43

De este modo, resulta, como si hubiéramos «desarrollado» las oscilaciones.

El desarrollo se necesita para señalar, dónde estaba y hacia adónde se movía el grave del péndulo en tal o cual instante. Figúrense que el papel se mueve con una velocidad de $1\,\dfrac{cm}{seg}$ desde el instante en que el péndulo se encontraba en una posición extrema, por ejemplo, a la izquierda del punto medio. En nuestra figura, esta posición inicial corresponde al punto marcado con la cifra 1. Después de $\dfrac{1}{4}$ de período, el péndulo pasará por el punto medio. En este tiempo, el papel avanzará en un número de centímetros, igual a $\dfrac{1}{4}T$, hasta el punto 2 de la figura. Ahora, el péndulo se moverá hacia la derecha; a la vez, irá corriéndose el papel. Cuando el péndulo ocupe la posición extrema derecha, el papel habrá avanzado en un número de centímetros igual a $\dfrac{1}{2}T$, hasta el punto 3 de la figura. De nuevo irá el péndulo hacia el punto medio y después de $\dfrac{3}{4}T$ llegará a la posición de equilibrio, al punto 4 de la figura. El punto 5 da fin a una oscilación completa y, después, el proceso se repetirá cada T segundos o, en el dibujo, cada T centímetros.

Por consiguiente, la línea vertical de la gráfica es la escala de las elongaciones del punto de la posición de equilibrio; la línea media horizontal es la escala del tiempo.

En esta gráfica se hallan fácilmente dos magnitudes que caracterizan por completo la oscilación. El período se determina como la distancia entre dos puntos equivalentes, por ejemplo, entre dos vértices próximos. También se mide inmediatamente la elongación máxima del punto de la posición de equilibrio. Esta elongación se llama amplitud de la oscilación.

Además, el desarrollo de la oscilación nos da la posibilidad de contestar a la pregunta que anteriormente se hizo: ¿dónde está el punto oscilante, en tal o cual instante? Por ejemplo, ¿dónde estará el punto oscilante después de $11\,seg$, si el período de oscilación es igual a $3\,seg$ y el movimiento comenzó en la posición extrema de la izquierda? Cada $3\,seg$, la oscilación comienza desde el mismo punto. Esto significa que cada $9\,seg$, el cuerpo también estará en la posición extrema de la izquierda.

Por lo tanto, no hay necesidad de la gráfica, en la que la curva esté extendida en unos cuantos períodos: es suficiente un dibujo en el que esté representada la curva correspondiente a una oscilación. La situación del punto oscilante cada 11 *seg*, siendo el período de 3 *seg*, será igual que cada 2 *seg*. Marcando 2 *cm* en el dibujo (pues, habíamos acordado que la velocidad con la que tirábamos del papel era igual a 1 $\frac{cm}{seg}$, o mejor dicho, que la unidad en el dibujo, que es igual a 1 *cm*, equivale a 1 *seg*), vemos que después de 11 *seg*, el punto está en el camino que va de la posición extrema derecha a la posición de equilibrio. La magnitud de la elongación en este instante se halla por el dibujo.

Para hallar la magnitud de la elongación del punto que efectúa oscilaciones pequeñas alrededor de la posición de equilibrio, no es necesario recurrir a la gráfica. La teoría enseña que, en este caso, la curva de la dependencia de la elongación del tiempo, representa una sinusoide. Si la elongación del punto la señalamos con y, la amplitud con a, el período de oscilación con T, entonces, el valor de la elongación durante el tiempo t, después del comienzo de la oscilación, se halla por la fórmula:

$$y = a \text{ sen } 2\pi\frac{t}{T}.$$

La oscilación que se efectúa según esta ley se llama armónica. El argumento del seno es igual al producto de 2π por $\frac{t}{T}$. La magnitud $2\pi\frac{t}{T}$ se llama fase.

Teniendo a mano unas tablas trigonométricas y conociendo el período y la amplitud, es fácil calcular la magnitud de la elongación del punto y, según sea el valor de la fase, se puede averiguar hacia qué lado se mueve el mismo.

No es difícil deducir la fórmula del movimiento oscilatorio, examinando el movimiento de la sombra arrojada sobre la pared por un grave que se mueve sobre una circunferencia.

La elongación de la sombra la vamos a marcar desde la posición media. En las posiciones extremas, la elongación y es igual al radio a de la circunferencia. Ésta es la amplitud de oscilación de la sombra.

Si el grave, desde la posición media, ha recorrido sobre la circunferencia un ángulo φ, su sombra (Fig. 44) se habrá alejado del punto medio en la magnitud $a\,\text{sen}\varphi$.

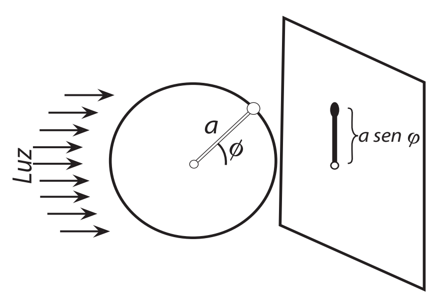


Fig. 44

Supongamos que el período del movimiento del grave (que naturalmente, es también el período de oscilación de la sombra) es igual a T; esto significa que durante el tiempo T, el grave recorre 2π radianes. Se puede escribir la proporción $\dfrac{\varphi}{t} = \dfrac{2\pi}{T}$, en donde t es el tiempo de rotación en el ángulo φ.

Por consiguiente, $\varphi = \dfrac{2\pi\, t}{T}$ y, por lo tanto, $y = a$ sen $2\pi \dfrac{t}{T}$. Esto es lo que queríamos demostrar.

La velocidad del punto oscilante también varía según la ley del seno. A esta conclusión nos lleva el mismo razonamiento sobre el movimiento de la sombra del grave que describe una circunferencia. La velocidad de este grave es un vector de longitud constante v_0. El vector de la velocidad gira junto con el grave.

Figurémonos el vector de la velocidad como una flecha material que es capaz de dar sombra. En las posiciones extremas del grave, el vector se sitúa a lo largo del rayo de luz y no da sombra. Cuando el grave, desde la posición extrema, recorre por la circunferencia un ángulo θ, el vector de la velocidad gira en el mismo ángulo y su proyección se hace igual a v_0 sen θ. Pero, por las mismas razones que antes $\dfrac{\theta}{t} = \dfrac{2\pi}{T}$, y, por lo tanto, el valor de la velocidad instantánea del cuerpo oscilante es:

$$v = v_0 \text{ sen} 2\pi \frac{t}{T}.$$

Tengamos en cuenta que, en la fórmula para la determinación de la magnitud de la elongación, el cálculo del tiempo se efectúa desde la posición media, mientras que en la fórmula de la velocidad, se hace desde la posición extrema. La elongación del péndulo es igual a cero para la posición media del grave, mientras que la velocidad de oscilación es igual a cero para la posición extrema.

Entre la amplitud de la velocidad de oscilación v_0 (a veces dicen, valor de amplitud de la velocidad) y la amplitud de la elongación existe una relación simple: el grave describe una circunferencia de longitud $2\pi a$ durante un tiempo igual al período T de oscilación. Por lo tanto

$$v_0 = \frac{2\pi a}{T} \quad \text{y} \quad v = \frac{2\pi a}{T} \text{sen} 2\pi \frac{t}{T}.$$

La fuerza y la energía potencial en las oscilaciones

En cualquier oscilación en torno de la posición de equilibrio, sobre el cuerpo obra una fuerza (llamada fuerza recuperadora) que «intenta» volver al cuerpo a la posición de equilibrio. Cuando el punto se aleja de la posición de equilibrio, la fuerza retarda el movimiento; cuando el punto se acerca a esta posición, la fuerza acelera el movimiento.

Examinemos esta fuerza en el ejemplo del péndulo. Sobre el grave del péndulo actúa la fuerza de gravedad y la tensión del hilo. Descompongamos la fuerza de gravedad en dos fuerzas: una a lo largo del hilo y otra, perpendicular a ésta, a lo largo de la tangente a la trayectoria. Para el movimiento, sólo es esencial la componente tangente de la fuerza de gravedad. En este caso, ésta es la fuerza que promueve el retorno. En cuanto a la fuerza que va a lo largo del hilo, ésta se equilibra con la reacción del clavo del que está suspendido el péndulo, y se toma en consideración solamente, cuando nos interese saber si aguantaría o no el peso del cuerpo oscilante.

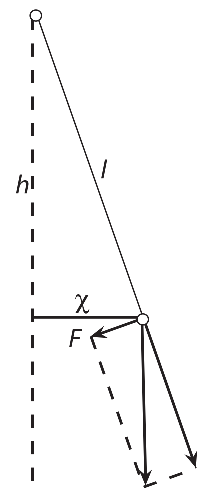
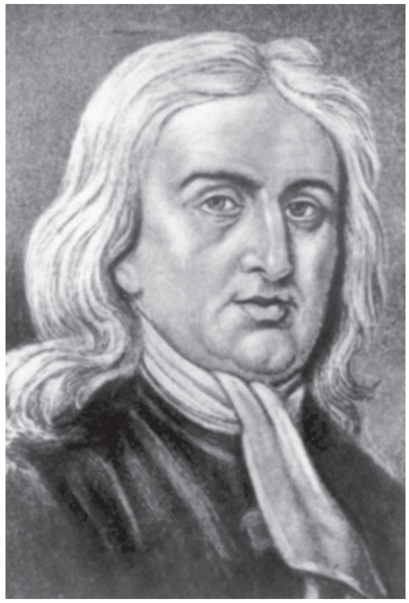


Fig. 45

Indiquemos con x la magnitud de la elongación del grave. La traslación se efectúa sobre el arco, pero hemos convenido estudiar las oscilaciones en las proximidades de la posición de equilibrio. Por eso, no hacemos distinción entre la magnitud de elongación sobre el arco y la elongación del grave de la vertical. Consideremos dos triángulos semejantes (Fig. 45). La razón de los catetos correspondientes es igual a la razón de las hipotenusas, es decir,

$$\frac{F}{x} = \frac{mg}{l}, \text{ o } F = \frac{mg}{l}x\,.$$

La magnitud $\dfrac{mg}{l}$ no varía durante la oscilación. Esta magnitud constante la señalaremos con la letra k; entonces, la fuerza recuperadora será igual a $F = kx$. Luego, llegamos a la importante conclusión siguiente: la magnitud de la fuerza recuperadora es directamente proporcional a la magnitud de la elongación del punto oscilante de la posición de equilibrio. La fuerza recuperadora es máxima en las posiciones extremas del cuerpo oscilante. Cuando el cuerpo pasa por el punto medio, la fuerza se convierte en cero y cambia su signo, o mejor dicho, cambia su dirección. Mientras el cuerpo está desplazado hacia la derecha, la fuerza está dirigida hacia la izquierda, y viceversa.



ISAAC NEWTON (1643–1727), *genial físico y matemático inglés, uno de los más célebres sabios en la historia de la humanidad. Newton formuló los principales conceptos y leyes de la mecánica; descubrió la ley de la gravitación universal, creando por lo tanto el cuadro físico del mundo que se mantuvo intacto hasta comienzos del siglo* XX. *Creó la teoría del movimiento de los cuerpos celestes; explicó las principales particularidades del movimiento de la Luna; dio explicación a las mareas. En la óptica, a Newton se deben los admirables descubrimientos que facilitaron el desarrollo impetuoso de esta rama de la física. Estableció un auténtico método matemático de investigación de la naturaleza; a él le pertenece el honor de la creación del cálculo diferencial e integral. Esto influenció enormemente en todo el desarrollo ulterior de la física, facilitando la aplicación de los métodos matemáticos en ella.*

El péndulo es el ejemplo más simple de oscilación de un cuerpo. Sin embargo, estamos interesados en que las fórmulas y leyes que hallamos se puedan aplicar a cualesquiera oscilaciones.

El período de oscilación del péndulo se expresó mediante su longitud. Tal fórmula es válida sólo para el péndulo. Pero podemos expresar el período de las oscilaciones libres mediante la constante k de la fuerza recuperadora. Como $k = \dfrac{mg}{l}$, se tiene que $\dfrac{l}{g} = \dfrac{m}{k}$, y, por consiguiente,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{g}}.$$

Esta fórmula es válida para todos los casos de oscilación, ya que cualquier oscilación libre se efectúa a causa de una fuerza recuperadora.

Expresemos ahora la energía potencial del péndulo mediante la elongación de la posición de equilibrio x. Cuando el grave pasa por el punto inferior, se puede considerar que la energía potencial es igual a cero, y la medida de la altura se debe efectuar desde este punto. Indicando con la letra h la diferencia de alturas del punto de suspensión y de la posición del grave inclinado, la expresión de la energía potencial toma la forma: $U = mg\,(l - h)$, o bien, aplicando la fórmula de la diferencia de cuadrados,

$$U = mg \cdot \frac{l^2 - h^2}{l + h}.$$

Pero, como se ve en el dibujo, $l^2 - h^2 = x^2$ se diferencian muy poco y, por eso, en vez de $l + h$, se puede poner $2l$. Entonces, $U = \frac{mg}{2l}x^2$, o

$$U = \frac{k}{2}x^2.$$

La energía potencial del cuerpo oscilante es proporcional al cuadrado de la elongación del cuerpo de la posición de equilibrio.

Comprobemos la validez de la fórmula deducida. La pérdida de la energía potencial tiene que ser igual al trabajo de la fuerza recuperadora. Veamos dos posiciones del cuerpo, x_2 y x_1. La diferencia de las energías potenciales será

$$U_2 - U_1 = \frac{k}{2}x_2^2 - \frac{k}{2}x_1^2 = \frac{k}{2}\left(x_2^2 - x_1^2\right).$$

Aquí, la diferencia de cuadrados se puede escribir como el producto de la suma por la diferencia. Por consiguiente,

$$U_2 - U_1 = \frac{k}{2}\left(x_2 + x_1\right)\left(x_2 - x_1\right) = \frac{kx_2 + kx_1}{2}\left(x_2 - x_1\right).$$

Pero, $x_2 - x_1$ es el espacio recorrido por el cuerpo; kx_1 y kx_2 son los valores de la fuerza recuperadora al comienzo y al final del movimiento y $\dfrac{kx_2 + kx_1}{2}$ es igual a la fuerza media. Nuestra fórmula nos ha conducido a un resultado justo: la pérdida de la energía potencial es igual al trabajo realizado.

Vibraciones de los resortes

Es fácil hacer oscilar a una bolita suspendiéndola de un resorte. Sujetemos un extremo del resorte y estiremos de la bolita (Fig. 46). Mientras tiramos de la bolita con la mano, el resorte se mantiene estirado. Si soltamos la mano, el resorte se encoge y la bolita comienza su movimiento hacia la posición de equilibrio. Lo mismo que el péndulo, el resorte no vuelve inmediatamente al estado de reposo. En virtud de la inercia, pasará por la posición de equilibrio y empezará a encogerse.

El movimiento de la bolita se retardará y en un instante determinado se parará, para comenzar al mismo tiempo el movimiento hacia el lado opuesto. Se crea una oscilación con los mismos rasgos típicos que conocimos al estudiar el péndulo.

Si no hubiese rozamiento, las oscilaciones no tendrían fin. Habiendo rozamiento, las oscilaciones se amortiguan y, además, tanto más rápidamente, cuanto mayor sea el rozamiento.

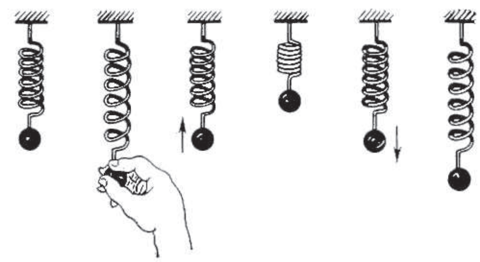


Fig. 46

Frecuentemente, los papeles del resorte y del péndulo son análogos. Tanto uno como otro sirven para mantener constante el período en los relojes. La exactitud de los relojes de muelle contemporáneos queda garantizada por el movimiento oscilatorio de una pequeña rueda (el volante.)

Las oscilaciones son debidas a un muelle que se enrolla y se desenrolla decenas de miles de veces al día.

En el caso de la bolita en el hilo, la componente tangencial de la fuerza de gravedad desempeñaba el papel de fuerza recuperadora. En el caso de la bolita en el resorte, la fuerza recuperadora es la fuerza elástica del resorte encogido o estirado. Por lo tanto, la magnitud de la fuerza elástica es directamente proporcional al alargamiento: $F = kx$.

En este caso, el coeficiente k tiene otro significado. Ahora es la rigidez del resorte. Resorte rígido es aquel que es difícil estirar o encoger. Precisamente este significado tiene el coeficiente k. De la fórmula, queda claro, que k es igual a la fuerza que se necesita para alargar o encoger el resorte en una unidad de longitud.

Conociendo la rigidez del resorte y la masa de la carga suspendida en él, hallamos el período de las oscilaciones libres mediante la fórmula $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$. Por ejemplo, el período de las oscilaciones de un resorte de una rigidez de $10^5 \ \frac{dinas}{cm}$ (es un resorte bastante rígido; una carga de cien gramos lo alargo en 1 cm), del que pende una carga de 10 g de masa, es $T = 6.28 \cdot 10^{-2}$ seg. En un segundo se efectúan 16 oscilaciones.

Cuanto más débil sea el resorte tanto más lentamente se efectuarán las oscilaciones. El aumento de la masa de la carga influye en el mismo sentido.

Apliquemos la ley de conservación de la energía a la bolita en el resorte.

Sabemos que, para el péndulo, la suma de la energía cinética y potencial $K + U$ no se altera:

$$K + U \ \text{ se conserva.}$$

Ya conocemos los valores de K y de U para el péndulo. La ley de conservación de la energía nos enseña que,

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} \ \text{ se conserva.}$$

Pero esto mismo es cierto también para la bolita en el resorte.

La conclusión que forzosamente tenemos que hacer es sumamente interesante.

Además de la energía potencial que conocimos anteriormente, existe también una energía potencial de otro género. La primera, se llama energía potencial de gravitación. Si el resorte estuviese colocado horizontalmente, la energía potencial de gravitación no variaría durante las oscilaciones. La nueva energía potencial con que nos hemos encontrado, se llama energía potencial elástica. En nuestro caso, ésta es igual a $\frac{kx_2}{2}$, es decir, depende de la rigidez del resorte y es directamente proporcional al cuadrado de la magnitud de compresión o alargamiento.

La energía total que se conserva inalterable se puede escribir en la forma: $E = \frac{ka^2}{2}$, o bien, $E = \frac{mv_0^2}{2}$.

Las magnitudes a y v_0 que figuran en las últimas fórmulas, representan los valores máximos del desplazamiento y de la velocidad durante las oscilaciones; éstas son las amplitudes del desplazamiento y de la velocidad. El origen de estas fórmulas es completamente claro. En la posición extrema, cuando $x = a$, la energía cinética de la oscilación es igual a cero y la energía total es igual al valor de la energía potencial. En la posición media, el desplazamiento del punto de la posición de equilibrio y, por consiguiente, la energía potencial, son iguales a cero; en este instante, la velocidad es máxima, $v = v_0$ y la energía total es igual a la cinética.

La ciencia de las oscilaciones es una sección muy amplia de la física. Con bastante frecuencia nos encontramos con péndulos y resortes. Pero, por supuesto, con esto no acaba la lista de los cuerpos en los que se deben estudiar las oscilaciones. Vibran los cimientos en los que están colocadas las máquinas, pueden vibrar los puentes, partes de los edificios, vigas, cables de alta tensión. El sonido es una vibración del aire.

Hemos expuesto unos ejemplos de oscilaciones mecánicas. Sin embargo, el concepto de oscilación, no sólo se puede referir a los desplazamientos mecánicos de los cuerpos o de las partículas de la posición de equilibrio. En muchos fenómenos eléctricos, también nos encontramos con oscilaciones y, además, estas oscilaciones se efectúan según unas leyes muy parecidas a las que estudiamos anteriormente. La ciencia de las oscilaciones penetra en todas las ramas de la física.

Oscilaciones más complicadas

Todo lo que se dijo hasta ahora se refería a las oscilaciones en las proximidades de la posición de equilibrio, que tienen lugar a causa de la acción de la fuerza recuperadora, cuya magnitud es directamente proporcional a la elongación del punto de la posición de equilibrio. Tales oscilaciones se efectúan según la ley del seno. Éstas se llaman armónicas. El período de las oscilaciones armónicas no depende de la amplitud.

Más complicadas son las oscilaciones de gran elongación. Estas oscilaciones ya no tienen lugar según la ley del seno y su desarrollo proporciona curvas más complicadas, diferentes para diversos sistemas de oscilación. El período deja de ser una propiedad característica de la oscilación y comienza a depender de la amplitud.

El rozamiento altera substancialmente cualesquiera oscilaciones. Habiendo rozamiento, las oscilaciones se amortiguan lentamente. Cuanto mayor sea el rozamiento tanto más rápido será el amortiguamiento. Hagan la prueba de hacer vibrar a un péndulo sumergido en el agua. Es casi inútil conseguir que este péndulo efectúe más de una o dos oscilaciones. Si sumergimos el péndulo en un medio más viscoso, puede ocurrir que no haya oscilación alguna. El péndulo inclinado volverá, simplemente, a la posición de equilibrio. En la Fig. 47 se muestra la gráfica típica de las oscilaciones amortiguadas. En la vertical se ha marcado la elongación de la posición de equilibrio y, en la horizontal, el tiempo. La amplitud (elongación máxima) de la oscilación amortiguada disminuye en cada oscilación.

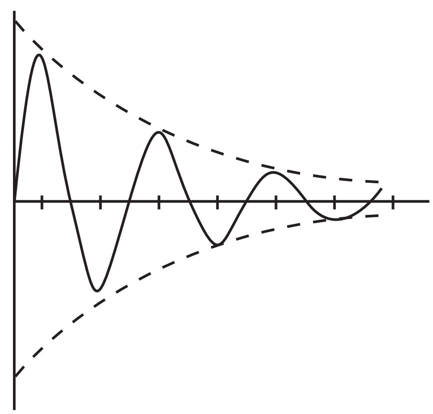


Fig. 47

Resonancia

A un niño le han sentado en un columpio. Éste no llega con los pies al suelo. Claro que para columpiarle, se puede levantar más alto el columpio y, después, soltarlo. Pero esto es bastante pesado y, además, no hay necesidad de ello: es suficiente empujar suavemente el columpio al compás de las oscilaciones para que después de poco tiempo el balanceo sea muy intenso.

Para hacer balancear un cuerpo hay que obrar al compás de las oscilaciones. Mejor dicho, hay que hacer de tal manera, que los empujes se produzcan con el mismo período que las oscilaciones libres del cuerpo. En casos semejantes se dice que hay resonancia.

El fenómeno de la resonancia está muy difundido en la naturaleza y en la técnica y merece especial atención.

Para observar un fenómeno de resonancia muy original y entretenido, se tiende un hilo horizontal y se suspenden de él tres péndulos (Fig. 48): dos cortos, de igual longitud, y uno más largo. Inclinando ahora uno de los péndulos cortos y soltándolo, después de unos segundos se observa cómo empieza lentamente a vibrar también el otro péndulo de igual longitud. Unos segundos más, y el segundo péndulo corto se balancea de tal modo, que ya no se puede saber cuál de los dos comenzó primero el movimiento.

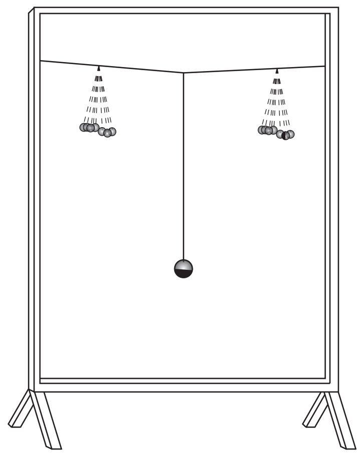


Fig. 48

¿A qué es debido esto? Los péndulos de igual longitud tienen iguales períodos de oscilación libre. El primer péndulo balancea al segundo. Las oscilaciones se transmiten de uno a otro mediante el hilo que les une. Sí, pero en el hilo está suspendido otro péndulo de diferente longitud. Y, ¿qué ocurrirá con él? Con éste no ocurrirá nada. El período de este péndulo es otro y el péndulo pequeño no conseguirá hacerle vibrar. El tercer péndulo presencia un fenómeno interesante de «transmisión» de energía de uno de los péndulos al otro sin tomar parte él mismo.

A menudo, cada uno de nosotros nos encontramos con el fenómeno de resonancia mecánica. Aunque es probable que no nos hayamos dado cuenta, sin embargo, a veces, la resonancia suele ser muy enojosa. El tranvía ha pasado cerca de nuestras ventanas, y en el aparador suena la vajilla. ¿Qué ha ocurrido? Las vibraciones del terreno se han transmitido al edificio y, junto con él, al suelo de nuestra habitación, llegando a vibrar el aparador y con él la vajilla. ¡Tan lejos, y a través de cuántos objetos se han difundido las vibraciones! Esto ocurrió gracias a la resonancia. Las vibraciones exteriores se pusieron en resonancia con las vibraciones libres de los cuerpos. Casi cada rechinamiento que oímos en la habitación, en la fábrica, en el automóvil, se produce a causa de la resonancia.

El fenómeno de la resonancia, como otros muchos fenómenos, puede ser útil y perjudicial.

Las partes móviles de una máquina situada sobre los cimientos están en marcha rítmica con un período determinado. Supóngase que este período coincide con el período propio de los cimientos.

¿Qué resultará? Pues que éstos empezarán a vibrar con bastante rapidez, lo que puede conducir a un fin lamentable.

Es conocido el caso siguiente: por un puente de Petersburgo iba marcando el paso una compañía de soldados. El puente se derrumbó. Se empezaron a hacer investigaciones sobre la causa; parecía que no había razones para preocuparse por la suerte del puente y de la gente. ¡Cuántas veces se reunía en el puente una multitud de gente y pasaban lentamente pesados furgones que sobrepasaban unas cuantas veces el peso de toda la compañía de soldados!

La combadura del puente debida a la acción de la gravedad es insignificante. Sin embargo, se puede conseguir una combadura incomparablemente mayor haciendo balancear al puente. La amplitud de la resonancia de las oscilaciones puede ser mil veces mayor que la magnitud de la elongación bajo la acción de la misma carga inmóvil.

Precisamente esto demostró la investigación: el período propio de las vibraciones del puente coincidió con el período de los pasos ordinarios de la marcha.

Por esto, cuando una unidad militar pasa por un puente, se da la orden de romper filas. Si no hay concordancia en el movimiento de la gente, el fenómeno de resonancia no aparecerá y el puente no se balanceará. De todos modos, los ingenieros recuerdan bien este caso lamentable. Y, ahora, al proyectar puentes, procuran hacerlo de modo que el período de las vibraciones libres del puente sea muy distinto del período del paso militar de parada.

Los constructores de los cimientos de las máquinas obran del mismo modo: procuran hacer los cimientos de modo que su período de vibración se diferencie lo más posible del período de las vibraciones de las partes móviles de la máquina.

VI. Movimiento de cuerpos sólidos

Momento de la fuerza

Hagamos la prueba de hacer girar con la mano un volante pesado. Tiremos de uno de los radios. Si lo cogemos con la mano muy cerca del eje, nos será muy pesado. Traslademos la mano hacia la llanta y nos será más fácil. ¿Qué es lo que ha cambiado? La fuerza en ambos casos es la misma. Lo que ha cambiado es el punto de aplicación de la fuerza.

En todo lo que hemos visto anteriormente no se ha planteado la cuestión sobre el lugar del punto de aplicación de la fuerza, puesto que en los problemas considerados no jugaban ningún papel, ni la forma, ni las dimensiones del cuerpo. En realidad, sustituíamos mentalmente el cuerpo por un punto.

El ejemplo de la rotación del volante muestra que, cuando se trata de la rotación o del giro de un cuerpo, el problema sobre el punto de aplicación de la fuerza está muy lejos de ser vano.

Para comprender el papel del punto de aplicación de la fuerza, calculemos el trabajo que hay que realizar para hacer girar al cuerpo en un ángulo determinado. Claro que, en este cálculo, se supone que las partículas del cuerpo sólido están rígidamente unidas entre sí (dejamos a un lado, por ahora, la capacidad del cuerpo de torcerse, de comprimirse y, en general, de cambiar su forma). Por lo tanto, la fuerza aplicada a un punto del cuerpo, comunica una energía cinética a todas sus partes.

Al calcular este trabajo, se ve con claridad el papel que desempeña el punto de aplicación de la fuerza.

En la Fig. 49, se muestra un cuerpo fijo sobre un eje. Al girar el cuerpo un ángulo pequeño φ, el punto de aplicación de la fuerza se ha trasladado por el arco, es decir, ha recorrido el espacio s.

Proyectando la fuerza sobre la dirección del movimiento, o sea, sobre la tangente a la circunferencia, por la que se mueve el punto de aplicación, escribimos la expresión conocida del trabajo A:

$$A = F_{\text{long.}} \cdot s.$$

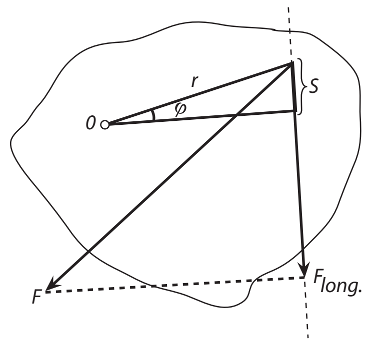


Fig. 49

Pero, el arco s, se puede representar así:

$$s = r\varphi,$$

en donde r es la distancia del eje de rotación hasta el punto de aplicación de la fuerza. Por lo tanto,

$$A = F_{\text{long.}} \cdot r\varphi.$$

Girando el cuerpo de diversos modos en un mismo ángulo, podemos realizar diferente trabajo según donde esté aplicada la fuerza.

Si se ha dado el ángulo, el trabajo se determina por el producto $F_{\text{long.}} \cdot r$. Tal producto se llama momento de la fuerza:

$$M = F_{\text{long.}} \cdot r.$$

A la fórmula del momento de la fuerza se le puede dar otra forma. Sea O el eje de rotación y B el punto de aplicación de la fuerza (Fig. 50). Con la letra d se indica la longitud de la perpendicular bajada desde el punto O a la dirección de la fuerza. Los dos triángulos construidos en el dibujo, son semejantes. Por eso,

$$\frac{F}{F_{\text{long.}}} = \frac{r}{d} \text{ o sea, } F_{\text{long.}} r = Fd.$$

La magnitud d se llama brazo de la fuerza.

La nueva fórmula $M = Fd$ se lee así: el momento de una fuerza es igual al producto de la fuerza por su brazo.

Si el punto de aplicación de la fuerza se desplaza a lo largo de la dirección de la fuerza, el brazo d, y junto con éste, el momento de la fuerza, no se altera. Por consiguiente, es indiferente en qué sitio de la línea de la fuerza esté el punto de aplicación.

Mediante este nuevo concepto se escribe más abreviadamente la fórmula del trabajo:

$$A = M \cdot \varphi,$$

o sea, el trabajo es igual al producto del momento de la fuerza por el ángulo de giro.

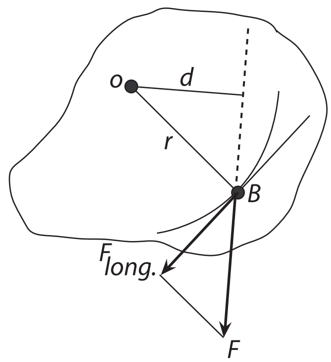


Fig. 50

Supongamos que sobre el cuerpo actúan dos fuerzas cuyos momentos son M_1 y M_2. Al girar el cuerpo un ángulo φ, se realizará el trabajo $M_1\varphi + M_2\varphi = (M_1 + M_2)\varphi$. Esta fórmula muestra que dos fuerzas, que tienen los momentos M_1 y M_2, hacen girar al cuerpo tal como lo haría una sola fuerza que tuviese un momento M igual a la suma $M_1 + M_2$. Los momentos de las fuerzas pueden ayudarse o estorbarse unos a otros. Si los momentos M_1 y M_2 tienden a girar al cuerpo hacia un mismo lado, tendremos que considerar que son cantidades de un mismo signo algebraico. Por el contrario, los momentos de las fuerzas que hacen girar al cuerpo hacia diversos lados, tienen signos diferentes.

Como ya sabemos, el trabajo de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo, se invierte en la variación de la energía cinética.

El retardamiento o la aceleración de la rotación del cuerpo se debe a la alteración de su energía cinética. Esto puede ocurrir solamente en el caso, cuando el momento total de las fuerzas no es igual a cero.

¿Y si el momento total es igual a cero? La respuesta es clara: como no hay alteración de energía cinética, el cuerpo, o gira uniformemente por inercia o está en reposo.

Por lo tanto, el equilibrio de un cuerpo que es capaz de girar, presupone un equilibrio de los momentos de las fuerzas que sobre él actúan. Si obran dos fuerzas, el equilibrio presupone la igualdad

$$M_1 + M_2 = 0.$$

Mientras nos interesaban los problemas en los que el cuerpo se podía considerar como un punto, las condiciones de equilibrio eran simples; para que un cuerpo esté en reposo o en movimiento uniforme, decía la ley de Newton para estos problemas, hace falta que la fuerza resultante sea igual a cero; las fuerzas que actúan hacia arriba, tienen que equilibrarse con las fuerzas que obran hacia abajo; las fuerzas que actúan hacia la derecha, tienen que compensarse con las que obran hacia la izquierda.

Esta ley también tiene valor para nuestro caso. Si el volante está en reposo, las fuerzas que sobre él actúan se equilibran con la reacción del eje sobre el que está colocado.

Pero, estas condiciones necesarias, resultan ser insuficientes. Además del equilibrio de las fuerzas, se requiere también el equilibrio de sus momentos. El equilibrio de los momentos es la segunda condición necesaria para el reposo o la rotación uniforme del cuerpo sólido.

Los momentos de las fuerzas, si es que hay muchos, se dividen sin dificultad en dos grupos; unos tienden a girar el cuerpo hacia la derecha, otros, hacia la izquierda. Estos momentos son los que tienen que compensarse.

La palanca

¿Puede sujetar un hombre un peso de 100 toneladas? ¿Se puede aplastar un trozo de hierro con la mano? ¿Puede oponerse un niño contra un hombre forzudo? Sí, se puede.

Propongamos a un hombre muy fuerte hacer girar un volante hacia la izquierda, cogiendo el radio con la mano cerca del mismo eje. En este caso, el momento de la fuerza no es muy grande: la fuerza es grande, pero el brazo es pequeño. Si un niño tira de la rueda en sentido contrario, cogiendo el radio en la llanta, el momento de la fuerza puede resultar muy grande: la fuerza es pequeña, sin embargo, el brazo es grande. La condición de equilibrio es:

$$M_1 = M_2 = 0 \text{ , o } F_1 d_1 = F_2 d_2.$$

Aplicando la ley de los momentos, se le puede dar al hombre una fuerza fantástica.

El ejemplo más brillante es la acción de la palanca. ¿Desea usted levantar una piedra enorme con una barra?

Resulta que puede resolver este problema, a pesar de que el peso de la piedra sea de unas cuantas toneladas. La barra colocada sobre un apoyo representa el cuerpo sólido de nuestro problema. El punto de apoyo es el centro de rotación. Sobre el cuerpo actúan dos momentos de fuerzas: uno que obstaculiza, originado por el peso de la piedra, y otro que empuja, originado por la mano. Si el índice 1 se refiere a la fuerza de los músculos y el índice 2, al peso de la piedra, la posibilidad de levantar la piedra se expresará abreviadamente así: M_1 tiene que ser mayor que M_2.

Se puede mantener la piedra levantada, si

$$M_1 = M_2 \text{ , o sea } F_1 d_1 = F_2 d_2.$$

Si el brazo pequeño, desde el apoyo hasta la piedra, es 15 veces menor que el brazo grande, desde el apoyo hasta la mano, el hombre puede mantener levantada una piedra de 1 tonelada de peso actuando con todo su peso sobre el extremo largo de la palanca.

La barra colocada sobre el apoyo es el ejemplo más simple y difundido de palanca. La ganancia en fuerza con la ayuda de una barra, suele ser, ordinariamente, de 10 a 20 veces. La longitud de la barra es alrededor de 1.5 m, y, generalmente, es difícil establecer el punto de apoyo más cerca de 10 cm del extremo. Por eso, un brazo será mayor que otro de 15 a 20 veces y, por consiguiente, igual será la ganancia en fuerza.

El chofer con un gato levanta con facilidad el camión con una carga de unas cuantas toneladas. El gato es una palanca del mismo tipo que la barra colocada sobre un apoyo. Los puntos de aplicación de las fuerzas (la mano, el peso del camión) están a ambos lados del punto de apoyo de la palanca del gato. Aquí, la ganancia en fuerza es aproximadamente en $40 - 50$ veces, lo que da la posibilidad de levantar fácilmente un peso enorme.

Las tijeras, el cascanueces, los alicates, las tenazas, y otras muchas herramientas, son ejemplos de palancas. En la Fig. 51 pueden hallar fácilmente el centro de rotación del cuerpo sólido (punto de apoyo) y los puntos de aplicación de las dos fuerzas, la que actúa y la que estorba.

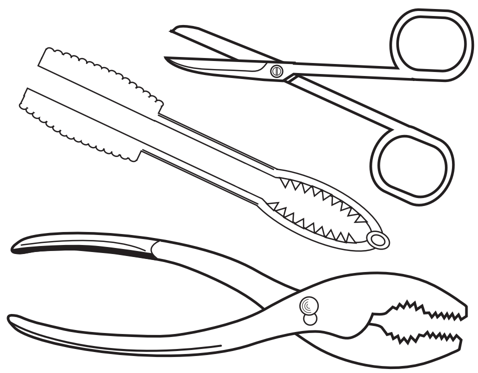


Fig. 51

Cuando cortamos hojalata con las tijeras, procuramos abrirlas cuanto más se pueda. ¿Qué se consigue con esto? Se consigue introducir el metal lo más cerca posible del centro de rotación. El brazo del momento de la fuerza que se supera se hace menor y, por consiguiente, es mayor la ganancia en fuerza. Moviendo los aros de las tijeras o los brazos de los alicates, una persona mayor actúa, generalmente, con una fuerza de $40-50$ kgf. Un brazo puede superar a otro unas 20 veces. Resulta que somos capaces de morder el metal con una fuerza de 1 tonelada. Y esto, con ayuda de herramientas que no son complicadas.

Una variedad de palanca es el torno. En muchas aldeas extraen el agua del pozo con ayuda del torno (Fig. 52).

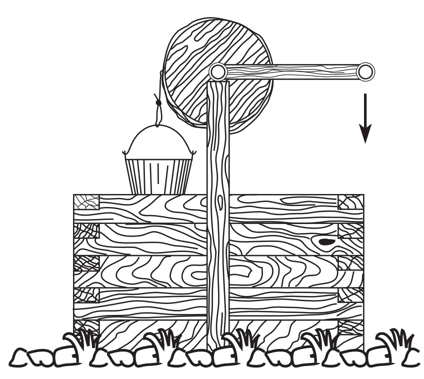


Fig. 52

Pérdida en el camino

Las herramientas hacen más fuerte al hombre; sin embargo, de esto no se puede hacer la conclusión de que las herramientas dan la posibilidad de realizar poco trabajo y conseguir mucho. La ley de conservación de la energía demuestra, que la ganancia en el trabajo, o sea, la creación de trabajo «de la nada», es una cosa imposible.

El trabajo obtenido no puede ser mayor que el gastado. Al contrario, la desconocida pérdida de energía en el roce conduce a que el trabajo que se obtiene con las herramientas sea siempre menor que el trabajo gastado. En el caso ideal, estos trabajos pueden ser iguales.

En realidad, es perder el tiempo en vano dedicarse a explicar esta verdad patente; pues, la regla de los momentos fue deducida de la condición de igualdad de los trabajos de la fuerza que actúa y de la que se supera.

Si los puntos de aplicación de las fuerzas han recorrido los caminos s_1 y s_2, la condición de igualdad de los trabajos se escribirá así:

$$F_1^{\text{long.}} \cdot s_1 = F_2^{\text{long.}} \cdot s_2.$$

Para vencer una fuerza F_2, en el camino s_2, mediante un instrumento de palanca, se necesita una fuerza F_1 mucho menor que F_2. Pero, el desplazamiento s_1 de la mano tiene que ser tantas veces mayor que s_2, cuantas veces es menor la fuerza muscular F_1 que F_2.

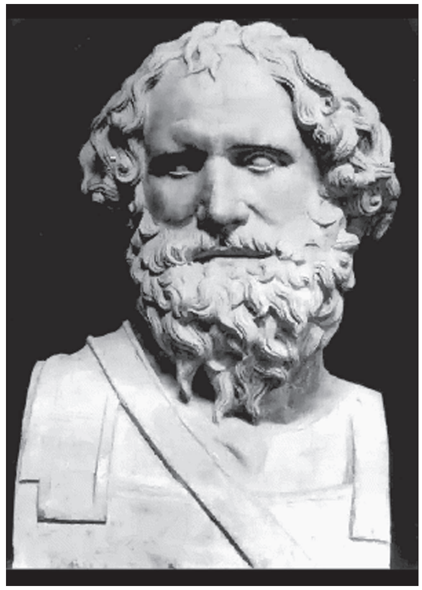
Frecuentemente, se expresa esta ley con la breve frase: lo que se gana en fuerza es igual a lo que se pierde en el camino.

La ley de la palanca fue descubierta por el gran sabio de la Antigüedad Arquímedes. Entusiasmado por la fuerza de la demostración, este admirable sabio de la Antigüedad, escribía al rey Herón de Siracusa: «Si hubiese otra Tierra, yo pasaría a ella y movería nuestra Tierra». Es posible que una palanca muy larga, cuyo punto de apoyo estuviese muy cerca del globo terrestre, daría la posibilidad de resolver este problema.

Nosotros no vamos a acongojarnos con Arquímedes sobre la falta del punto de apoyo que, como él pensaba, es lo único que se necesita para desplazar el globo terrestre.

Dediquémonos a fantasías: tomemos una palanca grandísima, coloquémosla sobre un apoyo, y sobre el extremo corto «colguemos una pequeña bolita» que pese... $6 \cdot 10^{24}$ kgf. Esta cifra módica muestra el peso del globo terrestre, «comprimido en una pequeña bolita». Apliquemos ahora una fuerza muscular al extremo largo de la palanca.

Si consideramos que la fuerza de la mano de Arquímedes es de $60\ kgf$, para desplazar en 1 cm a la «nuez terrestre», la mano de Arquímedes tendría que recorrer un camino que $\dfrac{6 \cdot 10^{24}}{60} = 10^{23}$ veces mayor. ¡10^{23} cm son 10^{18} km, que son tres mil millones de veces más que el diámetro de la órbita terrestre! Este ejemplo anecdótico muestra con claridad las medidas de «la pérdida en el camino» en el trabajo con la palanca.



ARQUÍMEDES (alrededor de los años 287−212 *antes de nuestra era) fue gran matemático, físico e ingeniero de la Antigüedad. Arquímedes calculó el volumen y la superficie de la esfera y de sus partes, del cilindro y de los cuerpos formados por la rotación de la elipse, hipérbola y parábola. Calculó por primera vez, con bastante exactitud, la razón de la longitud de la circunferencia a su diámetro, demostrando que esta razón está comprendida entre los límites* $3\frac{10}{71} \leq \pi \leq 3\frac{1}{7}$. *En la mecánica, estableció las leyes de la palanca, las condiciones de flotación de los cuerpos «principio de Arquímedes», las leyes de la suma de las fuerzas paralelas. Arquímedes inventó una máquina para elevar el agua «la rosca de Arquímedes», que incluso actualmente se emplea para transportar cargas movedizas y viscosas; un sistema de palancas y bloques para levantar grandes pesos y máquinas militares arrojadizas, que actuaron con éxito durante el cerco de su ciudad natal, Siracusa, por los romanos.*

Cualquiera de los ejemplos considerados anteriormente se puede emplear como ilustración, no sólo de la ganancia en la fuerza, sino de la pérdida en el camino. La mano del chofer, al trabajar con el gato, recorre un camino que será tantas veces mayor que la magnitud del alzamiento del camión, cuantas veces la fuerza muscular sea menor que el peso del mismo. Separando los aros de las tijeras para cortar una hoja de lata, efectuamos un trabajo en el camino, que es tantas veces mayor que la profundidad del corte, cuantas veces la fuerza muscular es menor que la resistencia de la hoja de lata. Una piedra levantada con la barra alcanza una altura que es tantas veces menor que la altura en que desciende la mano, cuantas veces la fuerza de los músculos es menor que el peso de la piedra. Esta regla aclara el principio de acción del tornillo. Figurémonos que se ajusta un tornillo, cuyo paso de rosca es de 1 mm, con una llave inglesa de 30 cm de longitud. En una vuelta, el tornillo avanza a lo largo del eje 1 mm, y nuestra mano, durante el mismo tiempo, recorre el camino de 2 m. La ganancia en fuerza es en 2 mil veces, bien sujetemos las piezas con seguridad, bien traslademos grandes pesos con un pequeño esfuerzo de la mano.

Otras máquinas simples

La pérdida en el camino, como pago de la ganancia en la fuerza, es una ley general, no sólo para los instrumentos de palanca, sino también para otros dispositivos y mecanismos empleados por el hombre.

Para levantar cargas se emplean mucho los polipastos. Así se llama un sistema de unas cuantas poleas móviles, unidas con una o varias poleas fijas. En la Fig. 53, la carga está suspendida de seis cuerdas. Claro que el peso se distribuye y la tensión de la cuerda es seis veces menor que el peso. Para levantar una carga de una tonelada se necesita aplicar una fuerza de $\frac{1000}{6} = 167\ kgf$. Sin embargo, no es difícil comprender, que para levantar la carga a $1\,m$ hacen falta 6 m de cuerda. Para levantar la carga a 1 m hacen falta 1000 kgm de trabajo.

Este trabajo tenemos que realizarlo «en cualquier forma»: una fuerza de $\frac{1000}{6}\ kgf$ tiene que actuar en el camino de 6 m; una fuerza de 10 kgf, en el camino de 100 m; una fuerza de 1 kgf, en el camino de 1 km.

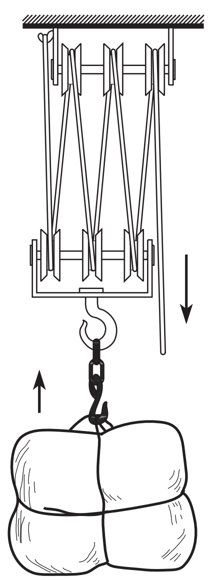


Fig. 53

El plano inclinado mencionado en la pág. 17, también representa un dispositivo que permite ganar en la fuerza, perdiendo en el camino.

El choque es un método particular de multiplicación de la fuerza. Un martillazo, un hachazo, un espolonazo y el simple puñetazo pueden crear una fuerza enorme. El secreto del golpe fuerte no es complicado. Clavando un clavo con un martillo sobre una pared muy dura, hay que levantar mucho el brazo.

La gran amplitud, o sea, el gran espacio en el que actúa la fuerza, crea una energía cinética considerable del martillo. Esta energía rinde en un camino pequeño.

Si la amplitud es de $\frac{1}{2}$ m, y el clavo se introdujo en la pared $\frac{1}{2}$ cm, la fuerza se multiplicó en 100 veces. Pero, si la pared es más dura y el clavo se ha introducido en la pared $\frac{1}{2}$ mm, siendo la misma la amplitud del brazo, el golpe será 10 veces más fuerte que en el primer caso. En una pared dura, el clavo no se introducirá muy profundamente y el mismo trabajo se realizará en un camino menor. Resulta, pues, que el martillo trabaja como un autómata: golpea más fuerte allí donde es más difícil.

Si al martillo se le comunica una fuerza de un kilogramo, éste golpeará el clavo con una fuerza de 100 kgf. Y, partiendo leña con un hacha pesada, partimos la madera con una fuerza de unas cuantas toneladas. Los martillos pilones de los herreros caen desde una pequeña altura, alrededor de un metro. Aplastando la forjadura en $1 - 2$ mm, el martillo pilón de una tonelada de peso se desploma sobre ella con una fuerza inmensa de miles de toneladas.

Cómo sumar fuerzas paralelas que actúan sobre un cuerpo sólido

Cuando en las páginas anteriores resolvíamos problemas de mecánica, en los que sustituíamos el cuerpo por un punto, el problema de la suma de las fuerzas se resolvía fácilmente. La regla del paralelogramo proporcionaba la respuesta, y, si las fuerzas eran paralelas, sumábamos sus magnitudes como números.

Ahora, el asunto es más complicado, pues la acción de la fuerza sobre el cuerpo no sólo se caracteriza por su magnitud y su dirección sino también por su punto de aplicación, o por la línea de acción de la fuerza que, como explicábamos anteriormente, es lo mismo.

Sumar fuerzas, significa sustituirlas por una. Esto no siempre se puede hacer.

La sustitución de fuerzas paralelas por una resultante es un problema que siempre tiene solución (menos en un caso particular, que se mencionará al final de este apartado). Consideremos la suma de fuerzas paralelas. Claro, la suma de fuerzas de 3 kgf y 5 kgf es igual a 8 kgf, si las fuerzas tienen un mismo sentido. El problema consiste en hallar el punto de aplicación (la línea de acción) de la resultante.

En la Fig. 54 están representadas dos fuerzas que obran sobre un cuerpo. La fuerza resultante F sustituye a las fuerzas F_1 y F_2, pero esto no sólo quiere decir que $F = F_1 + F_2$; la acción de la fuerza F será equivalente a la acción de F_1 y F_2, en el caso en que el momento de la fuerza F sea también igual a la suma de los momentos de F_1 y de F_2.

Busquemos la línea de acción de la fuerza resultante F. Claro que ésta es paralela a las fuerzas F_1 y F_2, pero, ¿a qué distancias pasa esta línea de las fuerzas F_1 y F_2?

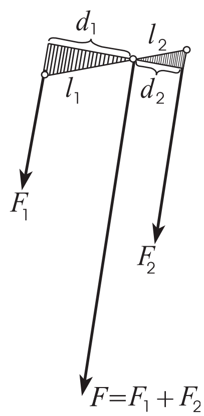


Fig. 54

En el dibujo, como punto de aplicación de la fuerza F, se ha representado un punto que está situado en el segmento que une los puntos de aplicación de las fuerzas F_1 y F_2. Sin duda, el momento de la fuerza F, con respecto al punto elegido, es igual a cero. Pero entonces, la suma de los momentos de F_1 y de F_2, con respecto a este punto, también tiene que ser igual a cero; o sea, los momentos de las fuerzas F_1 y F_2, que son diferentes de signo, tienen que ser iguales en magnitud.

Designando con las letras d_1 y d_2 los brazos de las fuerzas F_1 y F_2, podemos escribir esta condición así:

$$F_1 d_1 = F_2 d_2, \text{ o sea } \frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

De la semejanza de los triángulos rayados se deduce que $\frac{d_2}{d_1} = \frac{l_2}{l_1}$, o sea, que el punto de aplicación de la fuerza resultante divide la distancia entre las fuerzas que se suman en partes l_1 y l_2, inversamente proporcionales a las fuerzas.

Indiquemos con la letra l la distancia entre los puntos de aplicación de las fuerzas F_1 y F_2. Es evidente que $l = l_1 + l_2$.

Resolviendo el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$\begin{aligned} F_1 l_1 - F_2 l_2 &= 0 \\ l_1 + l_2 &= l, \end{aligned}$$

obtenemos:

$$l_1 = \frac{F_2 l}{F_1 + F_2},\ l_2 = \frac{F_1 l}{F_1 + F_2}.$$

Aplicando estas fórmulas, podemos hallar el punto de aplicación de la fuerza resultante, no sólo en el caso en que las fuerzas tienen un mismo sentido, sino también cuando tienen sentido contrario (o, como suele decirse, cuando son antiparalelas). Si las fuerzas tienen direcciones opuestas, serán de signo contrario y la resultante será igual a la diferencia de las fuerzas $F_1 - F_2$, y no a su suma. Suponiendo que es negativa la menor de las dos fuerzas, F_2, vemos por las fórmulas que l_1 resulta negativa. Esto significa que el punto de aplicación de la fuerza F_2 no está como antes, a la izquierda, sino a la derecha del punto de aplicación de la resultante (Fig. 55), y, además, igual que antes,

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}.$$

Cuando las fuerzas son iguales y diametralmente opuestas, se obtiene un resultado interesante. En este caso, $F_1 + F_2$. Las fórmulas muestran que l_1 y l_2 se hacen infinitamente grandes. ¿Qué significado físico tiene esta afirmación? Como no tiene sentido relacionar la resultante al infinito, llegamos a la conclusión de que las fuerzas iguales y diametralmente opuestas no se pueden sustituir por una sola fuerza. Tal combinación de fuerzas se llama par de fuerzas.

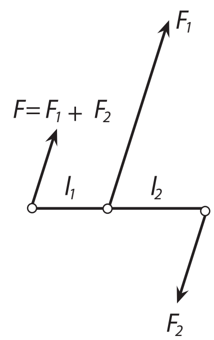


Fig. 55

La acción de un par de fuerzas no se puede reducir a la acción de una sola fuerza. Dos fuerzas cualesquiera, paralelas o diametralmente opuestas, pero de diferentes magnitudes, siempre se pueden equilibrar con una. Equilibrar un par de fuerzas es imposible.

Naturalmente, no sería cierto decir que las fuerzas que forman un par se anulan entre sí. El par de fuerzas ejecuta una acción muy esencial, hace girar un cuerpo; la particularidad de la acción del par de fuerzas consiste en que éste no ocasiona movimiento de traslación.

En algunos casos puede darse el problema, no de la suma de fuerzas paralelas sino de la descomposición de una fuerza dada en dos paralelas.

En la Fig. 56 están representados dos hombres que conjuntamente llevan sobre un palo una maleta pesada. El peso de la maleta se divide entre los dos. Si la carga presiona sobre el medio del palo, ambos experimentan un peso igual. Si las distancias desde el punto de aplicación de la carga hasta los hombros son d_1 y d_2, la fuerza F se descompondrá en dos fuerzas F_1 y F_2, según la regla:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

El más fuerte tiene que agarrar el palo más cerca de la carga.

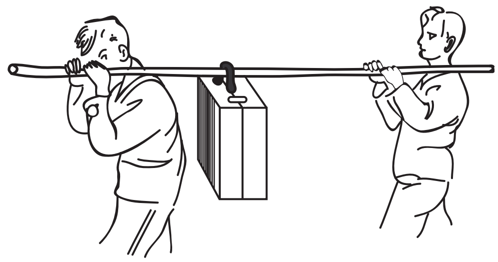


Fig. 56

Centro de gravedad

Todas las partículas de un cuerpo tienen peso. Por eso, sobre el cuerpo sólido actúan una infinidad de fuerzas de gravedad. Además, todas las fuerzas son paralelas. Ya que esto es así, éstas se pueden sumar de acuerdo a las reglas que acabamos de considerar y sustituirlas por una fuerza. El punto de aplicación de la fuerza resultante se llama centro de gravedad. Es como si todo el peso del cuerpo estuviera concentrado en un punto.

Suspendamos al cuerpo de uno de sus puntos. ¿Cómo se sitúa? Está claro que, como podemos mentalmente sustituir el cuerpo por un peso concentrado en el centro de gravedad, en condiciones de equilibrio, este peso se situará en la vertical que pasa por el punto de apoyo. Mejor dicho, en condiciones de equilibrio, el centro de gravedad estará situado en la vertical que pasa por el punto de apoyo y ocupará la posición más inferior.

También se puede colocar el centro de gravedad por encima del punto de apoyo, en la vertical que pasa por el eje. Esto se consigue hacer con gran trabajo y sólo gracias a la existencia de rozamiento. El equilibrio es inestable.

Ya se dijo que para la condición de equilibrio estable, la energía potencial tiene que ser mínima. Esto ocurre en el caso en que el centro de gravedad está situado por debajo del punto de apoyo. Cualquier desviación eleva el centro de gravedad y, por consiguiente, aumenta la energía potencial. Por el contrario, cuando el centro de gravedad está situado por encima del punto de apoyo, cualquier acción que retire al cuerpo de esta posición conduce a la disminución de la energía potencial. Esta posición es inestable.

Recortemos una figura de cartón. Para hallar su centro de gravedad, la colgamos dos veces, fijando el hilo de suspensión, primero en uno y luego en otro punto del cuerpo.

Fijemos la figura en un eje que pase por el centro de gravedad. Giremos la figura en una posición, en la segunda, en la tercera... Se observa una indiferencia total del cuerpo respecto a nuestras operaciones. En cualquier posición se registra un caso especial de equilibrio. A éste le llaman indiferente.

La causa es clara, en cualquier posición de la figura, el punto material que la sustituye está situado en un mismo sitio.

En una serie de casos, el centro de gravedad se puede hallar sin hacer experimentos y sin cálculos. Está claro, por ejemplo, que, en virtud de su simetría, los centros de gravedad de la esfera, del círculo, del cuadrado y del rectángulo, están situados en sus centros respectivos. Si dividimos mentalmente un cuerpo simétrico en partículas, a cada una de éstas corresponderá otra simétrica situada al otro lado del centro. Y para cada par de tales partículas, el centro de la figura será el centro de gravedad.

En el triángulo, el centro de gravedad está situado en la intersección de las medianas. En efecto, dividamos el triángulo en fajas estrechas, paralelas a uno de los lados. La mediana dividirá por la mitad a cada una de estas fajas. Pero el centro de gravedad de una faja está, sin duda, en el medio de ella, o sea, en la mediana. Los centros de gravedad de todas las fajas se sitúan en la mediana y, cuando sumemos las fuerzas de sus pesos, llegaremos a la conclusión de que el centro de gravedad del triángulo estará situado en algún lugar de la mediana. Estos razonamientos se pueden aplicar a cualquier mediana. Por consiguiente, el centro de gravedad tiene que estar situado en la intersección de ellas.

Pero, ¿puede ser que no estemos seguros de que las tres medianas se corten en un punto? Esto se demuestra en la geometría; nuestro razonamiento también demuestra este interesante teorema. En efecto, un cuerpo no puede tener varios centros de gravedad y, siendo único el centro de gravedad, como éste está situado en la mediana, sea cual fuera el ángulo desde el que la tracemos, resulta que las tres medianas se cortan en un punto. El planteamiento de un problema físico nos ha ayudado a demostrar un teorema geométrico.

Es más difícil hallar el centro de gravedad de un cono homogéneo. Por razones de simetría, queda solamente claro que el centro de gravedad está situado en la línea axial. Los cálculos muestran que éste está situado de la base a $\frac{1}{4}$ de la altura.

El centro de gravedad no siempre está dentro del cuerpo.

Por ejemplo, el centro de gravedad de un anillo está en su centro, o sea, fuera del anillo.

¿Se puede poner un alfiler en equilibrio, en posición vertical, sobre un soporte de cristal?

En la Fig. 57 se muestra cómo se hace esto. Hay que sujetar bien al alfiler en una armadura de alambre no muy grande, en forma de una balanza doble con cuatro pesos pequeños. Como los pesos están suspendidos más abajo del apoyo y el peso del alfiler es pequeño, el centro de gravedad estará situado por debajo del punto de apoyo. La posición es estable.

Hasta ahora tratábamos de cuerpos que tenían un punto de apoyo. ¿Qué ocurriría si el cuerpo se apoyase sobre una superficie entera?

Está claro que, en este caso, la disposición del centro de gravedad por encima del apoyo no significa que el equilibrio sea inestable. ¿Cómo podrían estar, de otro modo, los vasos sobre la mesa? Para el equilibrio es necesario que la superficie de apoyo del cuerpo presione sobre el plano en que reposa. Por eso, el cuerpo que se apoya sobre una superficie estará estabilizado si la línea de acción de la fuerza de gravedad, trazada desde el centro de gravedad, pasa por la superficie de apoyo. Por el contrario, si la línea de acción de la fuerza pasa por fuera de la superficie de apoyo, el cuerpo se cae.

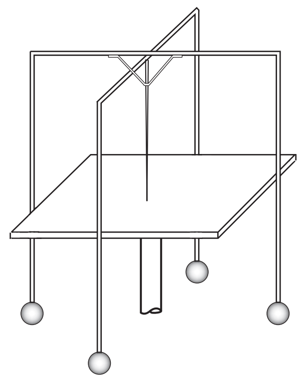


Fig. 57

El grado de estabilidad puede ser muy diverso, según la altura en que esté situado el centro de gravedad sobre el apoyo. Solamente una persona muy torpe llega a volcar un vaso de té, sin embargo, una jarra de flores con una base pequeña, se puede volcar tocándola un poco descuidadamente. ¿A qué es debido esto?

Vean la Fig. 58. Si el centro de gravedad está bajo, la misma fuerza que tiende a volcar el cuerpo, al sumarla con la fuerza de gravedad, proporciona la fuerza total que aprisiona al cuerpo contra el apoyo, mientras que si el centro de gravedad está alto, la fuerza total no pasa por la superficie de apoyo, sino que está dirigida hacia un lado.

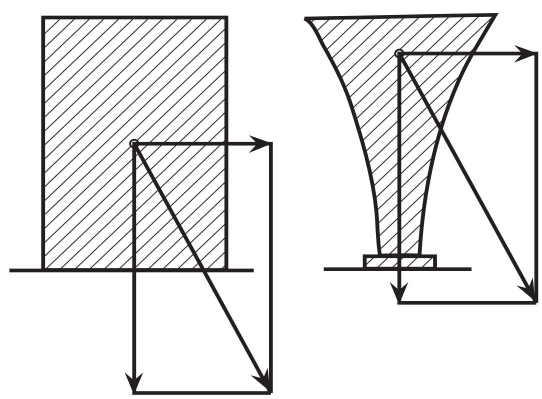


Fig. 58

Ya se advirtió que para la estabilidad de un cuerpo, la fuerza que se le aplica tiene que pasar por la superficie de apoyo. Pero la superficie de apoyo, que se necesita para el equilibrio, no siempre concuerda con la base real de sustentación. En la Fig. 59 está representado un cuerpo cuya base de sustentación tiene la forma de media luna. Es fácil comprender que, completando la media luna hasta un semicírculo entero, la estabilidad del cuerpo no se altera. Por lo tanto, la superficie de apoyo determinada por la condición de equilibrio puede ser realmente mayor.

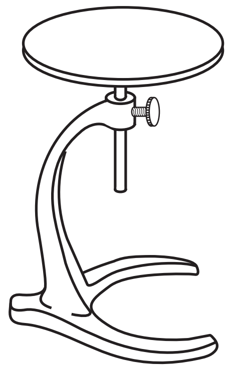


Fig. 59

Para hallar la superficie de apoyo del trípode representado en la Fig. 60, hay que unir sus extremos con rectas. ¿Por qué es tan difícil andar por una cuerda? Porque la superficie de apoyo disminuye demasiado. No es fácil andar por una cuerda, pues, no en vano se recompensa con aplausos el arte de un funámbulo. Sin embargo, a veces, el público yerra y aclama algunos trucos ingeniosos que facilitan el problema, como si fuera la culminación del arte. El artista toma una barra muy encorvada con dos baldes de agua en sus extremos; los baldes quedan a la altura de la cuerda. Con una cara muy seria, parando de tocar la orquesta, el artista empieza a caminar por la cuerda. ¡Qué complicado es el truco! —piensa el espectador ignorante. En realidad, el artista ha facilitado su tarea rebajando el centro de gravedad.

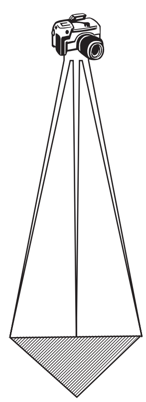


Fig. 60

Centro de inercia

Es lógico preguntar: ¿Dónde está situado el centro de gravedad de un grupo de cuerpos? Si en una balsa hay mucha gente, el equilibrio de ésta depende de la posición del centro de gravedad común (junto con la balsa).

El significado de este concepto es el mismo. El centro de gravedad es el punto de aplicación de la suma de las fuerzas de gravedad de todos los cuerpos del grupo considerado.

Ya sabemos el resultado del cálculo para dos cuerpos. Si dos cuerpos, que tienen los pesos F_1 y F_2, están a la distancia x, el centro de gravedad estará situado a la distancia x_1 del primero y a la distancia x_2 del segundo, además,

$$x_1 + x_2 = x \ \text{ y } \frac{F_1}{F_2} = \frac{x_2}{x_1}.$$

Como el peso se puede representar como el producto mg, el centro de gravedad de un par de cuerpos satisface a la condición:

$$m_1 x_1 = m_2 x_2,$$

o sea, está situado en el punto que divide la distancia entre las masas en segmentos inversamente proporcionales a las masas.

Recordemos ahora los disparos del cañón situado en una plataforma. Los impulsos del cañón y del proyectil son iguales y tienen dirección contraria. Se verifican las igualdades:

$$m_1 v_1 = m_2 v_2 \ , \text{ o } \frac{m_2}{m_1} = \frac{v_1}{v_2},$$

conservando este valor la razón de las velocidades durante todo el tiempo de acción mutua. Durante el movimiento creado por la repercusión, el cañón y el proyectil se desplazan hacia diversos lados, con respecto a la posición inicial, a las distancias x_1 y x_2. Las distancias x_1 y x_2, que son los espacios recorridos por ambos van creciendo pero, manteniéndose constante la razón de las velocidades; las distancias x_1 y x_2 también estarán en la misma razón:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{m_1}{m_2}, \ \ x_1 m_1 = x_2 m_2.$$

Aquí, x_1 y x_2, son las distancias del cañón y del proyectil desde los puntos iniciales en que ellos se encontraban. Comparando esta fórmula con la que determina la posición del centro de gravedad, vemos que son absolutamente idénticas. De aquí se deduce directamente, que el centro de gravedad del proyectil y del cañón permanece en el punto inicial durante todo el tiempo después del disparo.

En otras palabras, hemos obtenido un resultado muy interesante: el centro de gravedad del cañón y del proyectil continúa en reposo después del disparo.

Esta conclusión siempre es cierta; si al principio, el centro de gravedad de los cuerpos estaba en reposo, su acción mutua, sea cual fuera el carácter de ella, no puede alterar la posición del centro de gravedad. Precisamente por esto, no se puede levantar uno a sí mismo por los pelos, o alcanzar la Luna por el método del escritor francés Cyrano de Bergerac, que para este fin propuso (claro que en broma) sujetar con las manos un trozo de hierro y echar a lo alto un imán para que atrajera a aquél.

El centro de gravedad en reposo, desde el punto de vista de otro sistema inercial, se mueve uniformemente. Por consiguiente, el centro de gravedad, o está en reposo, o bien participa en un movimiento uniforme y rectilíneo.

Lo dicho sobre el centro de gravedad de dos cuerpos, es justo también para un grupo de muchos cuerpos. Claro que cuando se aplica la ley del impulso, siempre se supone que se trata de un grupo aislado de cuerpos.

Por lo tanto, para cada grupo de cuerpos que están en acción mutua, existe un punto que está en reposo o se mueve uniformemente; este punto es su centro de gravedad.

Queriendo subrayar la propiedad nueva de este punto, a éste le dan otra denominación más, llamándole centro de inercia. En efecto, sobre la gravedad del sistema solar (y, por consiguiente, sobre el centro de gravedad) sólo se puede hablar condicionalmente.

Como quiera que se muevan los cuerpos que forman un sistema cerrado, el centro de inercia (de gravedad) estará en reposo o, en otro sistema de referencia, se moverá por inercia.

Momento de rotación

Ahora estudiaremos otro concepto mecánico, cuyo conocimiento da la posibilidad de enunciar otra nueva e importante ley del movimiento.

Este concepto se llama momento de rotación, o momento del impulso, o momento de la cantidad de movimiento. Ya las denominaciones dan a entender que se trata de una magnitud parecida al momento de la fuerza.

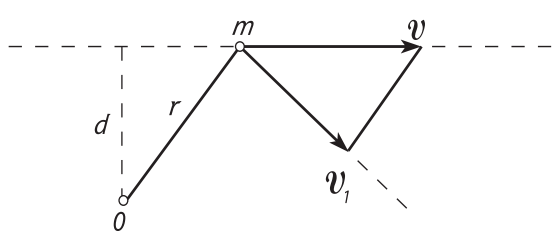


Fig. 61

El momento del impulso, igual que el momento de la fuerza, demanda la indicación de un punto con respecto al cual se determina el momento. Para determinar el momento del impulso con respecto a algún punto, hay que trazar el vector del impulso y bajar a éste una perpendicular desde el punto (Fig. 61). El producto del impulso mv por el brazo d es el momento del impulso, que lo indicaremos con la letra N:

$$N = mvd.$$

Si el cuerpo se mueve libremente, su velocidad no se altera; también se mantiene inalterable el brazo con respecto a cualquier punto, pues el movimiento se efectúa en línea recta. Por consiguiente, en este movimiento también se mantiene inalterable el momento del impulso.

Igual que para el momento de la fuerza, para el momento de rotación se puede escribir también otra fórmula. Unamos con un radio el lugar en que está situado el cuerpo con el punto, con respecto al cual se busca el momento (Fig. 61). Hallemos también la proyección de la velocidad sobre la dirección perpendicular al radio. De la semejanza de los triángulos construidos en el dibujo, se deduce: $\dfrac{v}{v_\perp} = \dfrac{r}{d}$. Por lo tanto $vd = v_\perp r$, y la fórmula para el momento de rotación se puede escribir también en la forma siguiente: $N = mv_\perp r$.

Como acabamos de decir, en el movimiento libre se mantiene inalterable el momento de rotación. Pero, ¿y si sobre el cuerpo actúa una fuerza? Los cálculos muestran que la variación del momento de rotación en un segundo es igual al momento de la fuerza.

La ley obtenida se aplica sin dificultad también para un sistema de cuerpos. Si se suman las variaciones de los momentos de rotación de todos los cuerpos que forman el sistema, esta suma resultará igual a la suma de los momentos de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo. Por lo tanto, para un grupo de cuerpos se verifica la regla siguiente: la variación total del momento del impulso en una unidad de tiempo es igual a la suma de los momentos de todas las fuerzas.

La ley de conservación del momento de rotación

Si se unen dos piedras con una cuerda y se lanza una de ellas con fuerza, la segunda irá detrás de la primera con la cuerda estirada. Una piedra alcanzará a la otra y la traslación hacia adelante irá acompañada de una rotación. Olvidémonos del campo de gravitación; supongamos que el lanzamiento se ha efectuado en el espacio cósmico.

Las fuerzas que actúan sobre las piedras son iguales entre sí y están dirigidas a lo largo de la cuerda, una al encuentro de la otra (pues, éstas son las fuerzas de acción y reacción). Pero, entonces, los brazos de ambas fuerzas, con respecto a cualquier punto, serán iguales. Brazos iguales y fuerzas iguales, pero en direcciones contrarias proporcionan momentos iguales de fuerza y de signo contrario.

El momento total de las fuerzas será igual a cero. De aquí se deduce, que la variación del momento de rotación es igual a cero, es decir, que el momento de rotación de tal sistema se mantiene constante.

La cuerda que unía las piedras nos servía para mayor claridad. La ley de conservación del momento de rotación es válida para cualquier par de cuerpos que están en acción mutua, independientemente de la naturaleza de esta acción.

Y, no sólo para un par. Si se estudia un sistema cerrado de cuerpos, las fuerzas que actúan entre ellos siempre se pueden dividir en cantidades iguales de fuerzas de acción y reacción, cuyos momentos se anulan por pares.

La ley de conservación del momento de rotación total es universal, se verifica para cualquier sistema cerrado de cuerpos.

Si un cuerpo gira alrededor de un eje, su momento de rotación es igual a

$$N = mvr,$$

en donde m es la masa, v la velocidad y r la distancia al eje. Expresando la velocidad mediante el número de vueltas n en un segundo, se tiene:

$$v = 2\pi nr \text{ y } N = 2\pi mnr^2,$$

es decir, el momento de rotación es proporcional al cuadrado de la distancia hasta el eje.

Siéntese en un banco cuyo asiento es giratorio. Tome en las manos unas pesas, abra ampliamente los brazos y pida a alguien que le haga girar lentamente. Encoja ahora, rápidamente, los brazos sobre el pecho e inesperadamente comenzará a girar con mayor rapidez. Abra los brazos y el movimiento se retardará; acerque las manos al pecho y el movimiento se acelerará. Mientras el banco, por el roce, no pare de girar, tendrá tiempo de alterar unas cuantas veces la velocidad.

¿Por qué ocurre esto?

Cuando se aproximan las pesas al eje, siendo constante la cantidad de vueltas, el momento de rotación disminuye. Para «compensar» esta disminución, se aumenta la velocidad de rotación.

Los acróbatas aprovechan con éxito la ley de conservación del momento de rotación. ¿Cómo efectúan el salto, o sea, las vueltas en el aire? Primero, reciben un empujón de la tarima de muelle o de las manos de un compañero. Durante el empuje, el cuerpo se inclina hacia adelante y el peso, junto con la fuerza del empuje, crea un momento instantáneo de fuerza. La fuerza del empuje desarrolla un movimiento hacia adelante y el momento de la fuerza engendra la rotación. Sin embargo, esta rotación es lenta, no causa impresión al público. El acróbata encoge las rodillas. «Recogiendo su cuerpo» lo más cerca posible del eje de rotación, el acróbata aumenta considerablemente la velocidad de rotación, y rápidamente, da la voltereta. Tal es la mecánica del «salto».

Los movimientos de una bailarina que realiza vueltas rápidas, una tras otra, se basan en este mismo principio. Por lo general, el compañero de la bailarina, es el que origina el momento inicial de rotación. En este instante, el cuerpo de la bailarina está inclinado luego, empieza a girar lentamente, después, el movimiento es ligero y gracioso y la bailarina se pone derecha. Ahora, todos los puntos del cuerpo están cerca del eje de rotación y la conservación del momento de rotación conduce a un aumento repentino de la velocidad.

El momento de rotación como vector

Hasta ahora hemos hablado de la magnitud del momento de rotación. Pero el momento de rotación posee las propiedades de una magnitud vectorial.

Consideremos el movimiento de un punto con relación a algún «centro». En la Fig. 62 están representadas dos posiciones cercanas del punto. El movimiento que nos interesa se caracteriza por la magnitud del momento de rotación y el plano en que se efectúa. El plano del movimiento está rayado en el dibujo: es la superficie recorrida por el radio, trazado desde el «centro» hasta el punto móvil.

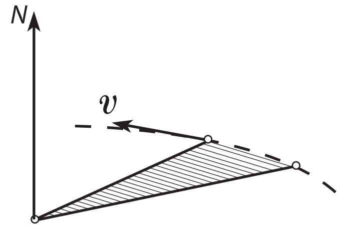


Fig. 62

Se pueden unir los conocimientos sobre la dirección del plano del movimiento y sobre la amplitud del momento del impulso. Para esto sirve el vector del momento, que tiene la dirección de la normal al plano del movimiento y es igual, en magnitud, al valor absoluto del momento. Sin embargo, esto todavía no es todo; hay que tener en cuenta la dirección del movimiento en el plano, pues el cuerpo puede girar alrededor del centro, tanto en dirección de las agujas del reloj, como en dirección contraria.

Se ha convenido representar el vector del momento del impulso de tal modo que, mirando de frente al vector, se vea la rotación en dirección contraria a las agujas del reloj. Se puede explicar de otro modo: la dirección del vector del momento del impulso está relacionada con la dirección de la rotación, igual que la dirección del sacacorchos está relacionada con la dirección del movimiento de su mango.

Por consiguiente, si conocemos el vector del momento del impulso, podemos juzgar sobre la magnitud del momento, sobre la posición del plano del movimiento en el espacio y sobre la dirección de la rotación respecto al «centro».

Si el movimiento se efectúa en un mismo plano, pero el brazo y la velocidad varían, el vector del momento del impulso conserva su dirección en el espacio, pero varía su longitud. Y, en caso de un movimiento arbitrario, el vector del impulso varía, tanto en magnitud, como en dirección.

Se puede sospechar que la unión en un concepto de la dirección del plano del movimiento y de la magnitud del momento de rotación, sirve sólo para economizar palabras. En realidad, sin embargo, cuando tenemos que vernos con un sistema de cuerpos que no se mueven en un plano, obtenemos la ley de conservación del momento solamente cuando sumamos los momentos de rotación como vectores.

Este hecho muestra que la atribución de un carácter vectorial al momento de rotación tiene un contenido profundo.

El momento de rotación siempre se determina con respecto a un «centro» cualquiera, apropiadamente elegido. Es natural que, por lo general, su magnitud depende de la elección de este punto. Sin embargo, se puede demostrar que, si el sistema considerado de cuerpos está en reposo como un todo (su impulso total es igual a cero), el vector del momento de rotación no depende de la elección del «centro». Este momento de rotación se puede llamar momento interior de rotación del sistema de cuerpos.

La ley de conservación del vector del momento del impulso es la tercera y última ley de conservación en la mecánica. A pesar de todo, cuando hablamos de tres leyes de conservación, no somos muy exactos. Pues, el impulso y el momento del impulso son magnitudes vectoriales, y la ley de conservación de una magnitud vectorial significa que se mantiene invariable, no sólo el valor numérico de la magnitud, sino también su dirección, o de otra manera, se mantienen invariables las tres componentes del vector sobre tres direcciones del espacio, perpendiculares entre sí. La energía es una magnitud escalar, el impulso es una magnitud vectorial, el momento de rotación también es una magnitud vectorial. Por eso, sería más exacto decir que en la mecánica existen siete leyes de conservación.

Giroscopios

Hagan la prueba de colocar un plato, por su parte inferior, sobre un bastón fino y mantenerlo en equilibrio. No le saldrá nada. Sin embargo, este truco es el preferido de los malabaristas chinos. Éstos consiguen realizarlo actuando con muchos bastones a la vez. El malabarista no intenta mantener los finos palos en posición vertical. Parece un milagro que los platos no se caigan y estén casi colgando en el aire, apoyándose ligeramente sobre los extremos de los palos, horizontalmente inclinados.

Si se tiene la posibilidad de observar de cerca cómo trabajan los malabaristas, debemos fijarnos en un detalle importante: él da vueltas a los platos de tal modo que éstos giren con rapidez en su plano.

Manipulando con las mazas, con los aros, con los sombreros, en todos los casos, el artista les hace girar. Solamente en estas condiciones los objetos vuelven a sus manos en la misma posición que se les había dado al comienzo.

¿En qué consiste la causa de esta estabilidad de la rotación? Ésta está ligada a la ley de conservación del momento. Pues, al cambiar la dirección del eje de rotación, varía también la dirección del vector del momento de rotación. Del mismo modo que se necesita una fuerza para cambiar la dirección de la velocidad, se necesita un momento de fuerza para cambiar la dirección de la rotación y, además, tanto mayor cuanto más ligero gire el cuerpo.

La tendencia de un cuerpo, que gira rápidamente, a mantener constante la dirección del eje de rotación, se puede observar en muchos casos semejantes a los citados. Así, pues, una peonza en rotación no se cae, incluso en el caso de que su eje esté inclinado.

Hagamos la prueba de volcar una peonza en rotación; resulta que no es tan fácil hacerlo.

La estabilidad del cuerpo en rotación se emplea en la artillería. Probablemente hayan oído que en el tubo del cañón se hace un rayado de hélice. El proyectil disparado gira alrededor de su eje y, gracias a esto, no da «volteretas» en el aire. El cañón rayado proporciona una puntería incomparablemente mejor y es de mayor alcance que el no rayado.

El piloto y el navegante marítimo tienen que saber siempre donde está la verdadera vertical terrestre en el instante dado, con respecto a la posición del avión o de la nave marítima. El empleo de la plomada no sirve para esto, puesto que en el movimiento acelerado aquélla se inclina. Por eso, se emplea un giroscopio de una construcción especial que gira con mucha rapidez, llamado «giro-horizonte». Si su eje de rotación se establece en la vertical terrestre, éste se mantiene en esta posición, a pesar de que el avión cambie su posición en el espacio.

Pero, ¿en qué está situado el giroscopio? Si está sobre un soporte que gira junto con el avión, ¿cómo puede mantener su dirección el eje de rotación?

Sirve de soporte un dispositivo de la llamada suspensión de Cardano (Fig. 63). En este dispositivo, siendo mínimo el rozamiento en los apoyos, la peonza se porta como si estuviese suspendida en el aire.

Con ayuda de giroscopios en rotación se puede mantener automáticamente una dirección dada de un torpedo o de un avión. Esto se hace con ayuda de unos mecanismos que «vigilan» la inclinación de la dirección del eje del torpedo de la dirección del eje del giroscopio.

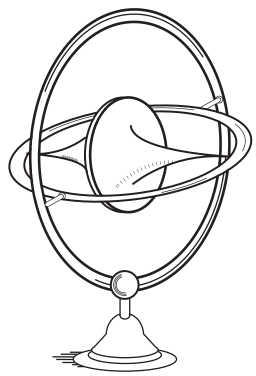


Fig. 63

La construcción de un aparato tan importante como la brújula giroscópica está basada en la aplicación del giroscopio en rotación. Se puede demostrar, que con la acción de la fuerza de Coriolis y de las fuerzas de rozamiento, el eje del giroscopio, al fin y al cabo, se coloca paralelo al eje terrestre y, por consiguiente, indica al norte.

Las brújulas giroscópicas se emplean con amplitud en la flota marítima. Su parte principal consiste en un motor con un pesado volante que hace hasta $25\,000\,\dfrac{vueltas}{minuto}$.

A pesar de una serie de dificultades para eliminar diversos obstáculos, debidos, en particular, al balanceo del barco, las brújulas giroscópicas tienen ciertas ventajas sobre las brújulas magnéticas. El defecto de estas últimas es el error cometido en las indicaciones a causa de la influencia de los objetos de hierro y de las instalaciones eléctricas del barco.

Árbol flexible

Los árboles de las modernas turbinas de vapor son piezas importantes de estas máquinas grandiosas. La construcción de tales árboles, que alcanzan 10 m de longitud y 0.5 de espesor, es un problema complicado de la tecnología. Un árbol de una turbina potente puede llevar una carga de cerca de 200 Tn y girar con una velocidad de $3000\,\dfrac{vueltas}{minuto}$.

A primera vista, se puede creer que este árbol tiene que ser exclusivamente duro y resistente. Sin embargo, esto no es así. Al hacer decenas de miles de vueltas por minuto, un árbol, rígidamente fijo y no propenso a torcerse, inevitablemente se rompe, sea cual fuere su resistencia.

No es difícil comprender por qué no sirven los árboles rígidos. Por mucha que sea la exactitud con la que trabajen los constructores de las máquinas, éstos no pueden evitar aunque sea una pequeña asimetría de la rueda de la turbina. Al girar esta rueda, se crean fuerzas centrífugas colosales; recordemos que sus valores son proporcionales al cuadrado de la velocidad de rotación. Si éstas no están exactamente equilibradas, el árbol comienza a «golpear» a los cojinetes (pues, las fuerzas centrífugas no equilibradas «giran» junto con la máquina), los rompe y destruye toda la turbina.

Este fenómeno creaba en su tiempo unas dificultades insuperables en el aumento de la velocidad de rotación de la turbina. La salida de la situación se encontró a finales del siglo pasado y a comienzos de éste. En la técnica de la construcción de turbinas se introdujeron los árboles flexibles.

Para comprender en qué consiste la idea de este invento admirable, tenemos que calcular la acción total de las fuerzas centrífugas. ¿Cómo sumar estas fuerzas? Resulta, que la resultante de todas las fuerzas centrífugas está aplicada al centro de gravedad del árbol y tiene una magnitud tal, que parece que toda la masa de la rueda de la turbina estuviese concentrada en el centro de gravedad.

Indiquemos con a la distancia del centro de gravedad de la rueda de la turbina al eje, que es diferente de cero, en virtud de una pequeña asimetría de la rueda. Al girar, sobre el árbol actúan las fuerzas centrífugas y éste se tuerce. Indiquemos con l el desplazamiento del árbol. Calculemos esta magnitud. La fórmula para la fuerza centrífuga es conocida (véase la pág. 44 – 46), esta fuerza es proporcional a la distancia del centro de gravedad hasta el eje, que ahora es y es igual a $4\pi^2n^2M\,(a+l)$ en donde n es el número de vueltas por minuto y M es la masa de las piezas que giran. La fuerza centrífuga se equilibra con la fuerza elástica, que es proporcional a la magnitud del desplazamiento del árbol e igual a kl, donde el coeficiente k es la característica de la rigidez del árbol. Así, pues,

$$4\pi^2n^2M\,(a+l)\,,$$

de donde,

$$l = a\frac{1}{\frac{k}{4\pi^2n^2M}-1}.$$

Según esta fórmula, un árbol flexible tiene capacidad para hacer multitud de vueltas. Para valores muy grandes (incluso, infinitamente grandes) de n, la flexión l del árbol no crece indefinidamente. La cantidad $\dfrac{k}{4\pi^2n^2M}$ que figura en la última fórmula, se convierte en cero, y la flexión l del árbol se hace igual a la magnitud de asimetría con signo contrario.

Este resultado del cálculo significa que, para muchas vueltas, la rueda asimétrica, en vez de destruir el árbol, lo encorva de tal manera que se elimina la influencia de la asimetría. El árbol flexible centra las piezas que están en revolución y con su flexión traslada el centro de gravedad al eje de rotación, de modo que reduce a cero la acción de la fuerza centrífuga.

La flexibilidad del árbol, no sólo no es un defecto sino que, por el contrario, es la condición necesaria para el equilibrio. Pues, para el equilibrio, el árbol tiene que encorvarse en la magnitud a y no romperse.

El lector atento puede observar un error en los razonamientos expuestos. Si un árbol que se «centra» a grandes vueltas se traslada de la posición hallada de equilibrio, y se consideran solamente las fuerzas centrífuga y elástica, es fácil de observar que este equilibrio es inestable. Resulta, sin embargo, que las fuerzas de Coriolis salvan la situación y hacen que este equilibrio sea completamente estable.

La turbina comienza a girar lentamente. Al principio, cuando n es muy pequeño, el quebrado $\dfrac{k}{4\pi^2 n^2 M}$, tiene un valor grande. Mientras este quebrado, al ir aumentando el número de vueltas, sea mayor que la unidad, la magnitud de flexión del árbol tendrá el mismo signo que la magnitud del desplazamiento inicial del centro de gravedad del volante. Por lo tanto, en estos instantes iniciales del movimiento, el árbol flexionado no centra la rueda; por el contrario, con su flexión aumenta el desplazamiento general del centro de gravedad y, por consiguiente, la fuerza centrífuga. A medida que aumenta el número de vueltas n (pero con la condición de que $\dfrac{k}{4\pi^2 n^2 M} > 1$), el desplazamiento crece y, por fin, llega el momento crítico. Para $\dfrac{k}{4\pi^2 n^2 M} = 1$, el denominador de la fórmula del desplazamiento l se anula y, por consiguiente, la flexión del árbol se hace, formalmente, infinitamente grande. A tal velocidad de rotación, el árbol se rompe. Al poner en marcha una turbina, este instante hay que pasarlo rápidamente, hay que sobrepasar el número crítico de vueltas y establecer un movimiento considerablemente más rápido de la turbina para que comience el fenómeno de autocentración que describíamos anteriormente.

Pero, ¿qué instante crítico es éste? La condición se puede escribir de la forma siguiente:

$$4\pi^2 \frac{M}{k} = \frac{l}{n^2},$$

o, sustituyendo el número de vueltas por el período de rotación mediante la relación $n = \dfrac{1}{T}$ y extrayendo la raíz, en tal forma:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}}.$$

¿Qué magnitud es la que hemos obtenido en el segundo miembro de la igualdad? La fórmula parece muy conocida. Volviendo a la pág. 88, vemos que en el segundo miembro figura el período propio de oscilación de la rueda en el árbol. Precisamente $2\pi\sqrt{\dfrac{M}{k}}$ es el período con que oscilaría la rueda de una turbina de masa M en un árbol de rigidez k, si apartáramos la rueda a un lado para que oscilase por su cuenta.

Así pues, el instante peligroso es cuando coincide el período de rotación de la rueda de la turbina con el período de oscilación propia del sistema turbina–árbol. El fenómeno de la resonancia tiene la culpa de que exista el número crítico de vueltas.

VII. Gravitación

¿En qué se sostiene la Tierra?

En tiempos remotos, a esta pregunta daban una respuesta simple: en tres ballenas. Naturalmente, no quedaba claro en qué se sostenían las ballenas. Sin embargo, a nuestros inocentes tatarabuelos esto no les desconcertaba.

Los conceptos fidedignos sobre el carácter del movimiento de la Tierra, sobre la forma de la Tierra, sobre muchas de las leyes del movimiento de los planetas alrededor del Sol, aparecieron mucho antes de que se diese la respuesta a la pregunta sobre las causas del movimiento de los planetas.

Y, en efecto, ¿en qué se «sostienen» la Tierra y los planetas? ¿Por qué éstos se mueven alrededor del Sol por unas trayectorias determinadas y no se escapan de ellas?

Durante largo tiempo no había respuesta a estas preguntas, y la iglesia, que luchaba contra el sistema de Copérnico del mundo, se aprovechaba de esto para negar el hecho del movimiento de la Tierra.

El descubrimiento de la verdad lo debemos al gran sabio inglés Isaac Newton (1643 – 1727).

Una anécdota histórica dice que, estando sentado en el jardín debajo de un manzano observando cómo caían a la tierra las manzanas, una tras otra, a causa del viento, a Newton le vino la idea de la existencia de las fuerzas de gravitación entre todos los cuerpos del universo.

Como resultado del descubrimiento de Newton, quedó claro que todo el conjunto de fenómenos, que podríamos decir que son de carácter diverso, como por ejemplo, la caída de cuerpos libres a la tierra, los movimientos visibles de la Luna y del Sol, las mareas oceánicas, etc., representan la manifestación de una misma ley de la naturaleza: de la ley de gravitación universal.

Según esta ley, entre todos los cuerpos del Universo, ya sean granos de arena, guisantes, piedras o planetas, actúan fuerzas de atracción mutua.

A primera vista, parece que la ley no es cierta, pues, nunca nos hemos dado cuenta de que los objetos que nos rodean se atrajesen entre sí. La Tierra atrae hacia sí cualquier cuerpo, de esto nadie tiene duda. Pero, ¿puede ser que esto sea una propiedad particular de la Tierra? No, esto no es así. La atracción de dos objetos cualesquiera es pequeña y no salta a la vista. Sin embargo, se puede revelar con experimentos especiales. Pero, esto lo trataremos más adelante.

La existencia de la gravitación universal, y sólo ésta, explica el equilibrio del sistema solar, el movimiento de los planetas y de otros cuerpos celestes.

La Luna se mantiene en la órbita por las fuerzas de la gravitación terrestre; la Tierra se mantiene en su trayectoria por las fuerzas de gravitación del Sol.

El movimiento circular de los cuerpos celestes se efectúa del mismo modo que el movimiento circular de la piedra atada a la cuerda.

Las fuerzas de gravitación universal son «cuerdas» invisibles que obligan a los cuerpos celestes a moverse por unas trayectorias determinadas.

La afirmación de la existencia de las fuerzas de gravitación universal de por sí significaba poco. Newton halló la ley de gravitación y mostró de qué dependen estas fuerzas.

La ley de gravitación universal

La primera pregunta que se hacía Newton era: ¿en qué se diferencia la aceleración de la Luna de la aceleración de la manzana? Mejor dicho, ¿qué diferencia hay entre la aceleración g que crea el globo terrestre en su superficie, o sea, a la distancia r del centro, y la aceleración creada por la Tierra a la distancia R, en que está la Luna de la Tierra?

Para calcular esta aceleración $\frac{v^2}{R}$, hay que saber la velocidad del movimiento de la Luna y su distancia a la Tierra. Newton conocía estas dos cantidades. La aceleración de la Luna resultó ser igual a 0.27 $\frac{cm}{seg^2}$, aproximadamente. Esto es unas 3600 veces menos que el valor de $g = 980\ \frac{cm}{seg^2}$.

Por lo tanto, la aceleración creada por la Tierra disminuye a medida que nos alejamos del centro de ella. Pero, ¿con qué rapidez? La distancia es de sesenta radios terrestres. Pero, 3600 es el cuadrado de 60. Aumentando esta distancia en 60 veces, disminuimos la aceleración en $(60)^2$ veces.

Newton llegó a la conclusión de que la aceleración y, por consiguiente, la fuerza de gravitación, varía en proporción inversa al cuadrado de la distancia. Además, ya sabemos que la fuerza que actúa sobre un cuerpo en un campo gravitatorio es proporcional a su masa. Por eso, el primer cuerpo atrae al segundo con una fuerza que es proporcional a la masa del segundo cuerpo; el segundo cuerpo atrae al primero con una fuerza que es proporcional a la masa del primero.

Se trata de fuerzas idénticamente iguales, de las fuerzas de acción y reacción. Por lo tanto, la fuerza de gravitación mutua tiene que ser proporcional tanto a la masa del primero como a la masa del segundo y, por lo tanto, al producto de las masas.

En resumen,

$$F = \gamma \frac{Mm}{r^2}.$$

Ésta es la ley de gravitación universal. Newton suponía que esta ley era cierta para cualquier par de cuerpos. Ahora, esta audaz hipótesis expuesta por él está ya demostrada. Por lo tanto, la fuerza de atracción de dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.

Y, ¿qué es la letra γ que se introdujo en la fórmula? Ésta es el coeficiente de proporcionalidad. Pero, ¿no se puede suponer que es igual a la unidad, del mismo modo que hemos hecho con frecuencia? No, no se puede, pues hemos convenido en medir la distancia en centímetros, la masa en gramos y la fuerza en *dinas*. El valor de γ es igual a la fuerza de atracción entre dos masas de 1 g que están a la distancia de 1 cm. Si se quiere calcular una fuerza que sea igual a algo, por ejemplo, a la fuerza de una *dina*, el coeficiente de γ tiene que ser medido.

No hay duda que para hallar γ no es obligatorio medir la fuerza de atracción de dos pesas de unos cuantos gramos. Estamos interesados en realizar las mediciones con cuerpos muy macizos, pues, entonces, la fuerza será mayor.

Determinando las masas de dos cuerpos, conociendo la distancia entre ellos y midiendo la fuerza de atracción, el valor de γ se halla mediante un simple cálculo.

Tales experimentos se hicieron muchas veces. Éstos demostraron que el valor de γ siempre es el mismo, independientemente del material de los cuerpos que se atraen y de las propiedades del medio en que se encuentren. Este valor se llama constante de gravitación y es igual a $\gamma = 6.67 \cdot 10^{-8}\ \dfrac{cm^3}{g \cdot seg^2}$.

El esquema de uno de los experimentos para medir el valor de γ se muestra en la Fig. 64. En los extremos de una balanza se han suspendido dos bolitas de igual masa. Una de ellas está situada sobre una losa de plomo, la otra, por debajo de la losa. El plomo (para el experimento se tomaron 100 Tn de plomo), con su atracción, aumenta el peso de la bolita de la derecha y disminuye el de la izquierda. La bolita de la derecha se hace más pesada que la de la izquierda. El valor de γ se calcula por la magnitud de la inclinación de la balanza.

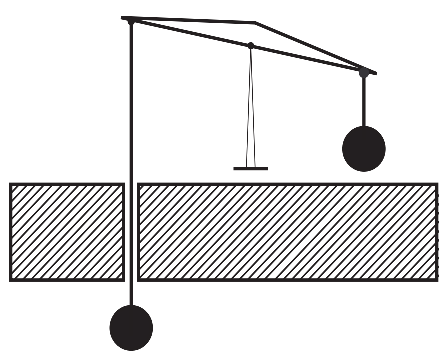


Fig. 64

Al valor tan pequeño de γ se debe la dificultad que hay para observar las fuerzas de gravitación entre dos objetos.

Dos cargas colosales, de 1000 kilogramos, se atraen entre sí con una fuerza insignificante, que es solamente igual a 6.7 *dinas*, o sea, a 0.007 g, estando estos objetos uno de otro a la distancia de 1 m.

Pero, ¡qué enormes son las fuerzas de atracción entre los cuerpos celestes! La fuerza con que se atraen la Luna y la Tierra es

$$F = 6.7 \cdot 10^{-8} \frac{6 \cdot 10^{27} \cdot 0.74 \cdot 10^{26}}{(38 \cdot 10^9)^2} = 2 \cdot 10^{25} dinas \approx 2 \cdot 10^{19}\ kgf;$$

y con la que se atraen la Tierra y el Sol es

$$F = 6.7 \cdot 10^{-8} \frac{2 \cdot 10^{33} \cdot 6 \cdot 10^{27}}{(15 \cdot 10^{12})^2} = 3.6 \cdot 10^{27} dinas \approx 3.6 \cdot 10^{21}\ kgf.$$

El peso de la Tierra

Antes de comenzar a aplicar la ley de la gravitación universal, analicemos un detalle importante.

Acabamos de calcular la fuerza de atracción de dos cargas, situadas una de otra a la distancia de 1 m. ¿Y, si estos cuerpos estuviesen a la distancia de 1 cm? ¿Qué es lo que habría que poner en la fórmula, la distancia entre las superficies de estos cuerpos o la distancia entre los centros de gravedad, o alguna tercera cosa?

La ley de gravitación universal, $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$, se puede aplicar rigurosamente cuando no hay vacilaciones semejantes. La distancia entre los cuerpos tiene que ser mucho mayor que las dimensiones de ellos; tenemos que tener el derecho de considerar a los cuerpos como puntos. ¿Cómo se aplica la ley a dos cuerpos próximos? De principio, es muy simple: hay que dividir mentalmente el cuerpo en trozos pequeñitos; hay que calcular para cada par la fuerza F y, después, hay que sumar (vectorialmente) todas las fuerzas.

En principio, esto es fácil, pero en la práctica es bastante complicado.

Sin embargo, la naturaleza nos ha ayudado. Los cálculos muestran que: si las partículas de los cuerpos están en acción mutua con una fuerza que es proporcional a $\frac{1}{r^2}$, los cuerpos de forma esférica poseen la propiedad de atraerse como puntos situados en los centros de las esferas. Para dos esferas próximas, la fórmula $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$, es justa igualmente que para dos esferas lejanas, si r es la distancia entre los centros de las esferas. Esta regla ya la hemos aplicado antes, calculando la aceleración en la superficie de la Tierra.

Tenemos ahora el derecho de aplicar la fórmula de la gravitación para calcular la fuerza de atracción de los cuerpos por la Tierra. Por r se debe de entender la distancia del centro de la Tierra hasta el cuerpo.

Sea M la masa y R el radio de la Tierra. Entonces, en la superficie terrestre la fuerza de atracción de un cuerpo de masa m es:

$$F = \gamma \frac{M}{r^2} m.$$

Pero, esto no es más que el peso del cuerpo, que siempre lo expresamos como mg. Por lo tanto, para la aceleración de la fuerza de gravedad, se tiene,

$$g = \gamma \frac{M}{R^2}.$$

Ahora ya podemos decir cómo se pesó la Tierra. La masa de la Tierra se puede calcular Con esta fórmula, pues, g, γ y R son cantidades conocidas. Del mismo modo se puede pesar el Sol.

Pero, ¿es que se puede llamar a tal cálculo pesar? Claro que se puede; en la física, las mediciones indirectas juegan un papel tan grande como las directas.

Resolvamos ahora un problema curioso.

En los planes de creación de una televisión mundial, juega un papel importante la creación de un satélite «suspendido», es decir, de un satélite que estuviese todo el tiempo sobre un mismo punto de la superficie terrestre. ¿Sufrirá tal satélite un rozamiento esencial? Eso depende de lo lejos de la Tierra que tenga que efectuar sus rotaciones.

El satélite «suspendido» tiene que girar con un período T, igual a 24 horas. Sí r es la distancia del satélite hasta el centro de la Tierra, su velocidad $v = \dfrac{2\pi r}{T}$ y su aceleración $\dfrac{v^2}{r} = \dfrac{4\pi^2 r}{T^2}$. Por otra parte, esta aceleración, originada por la atracción terrestre, es igual a $\gamma\dfrac{M}{r^2} = g\dfrac{R^2}{r^2}$. Igualando los valores de las aceleraciones, tenemos:

$$g\frac{R^2}{r^2} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}, \text{ es decir } r^3 = \frac{gR^2T^2}{4\pi^2}.$$

Poniendo en cifras redondas los valores, $g = 10\ \dfrac{m}{seg^2}$, $R = 6 \cdot 10^6\ m$ y $T = 9 \cdot 10^4\ seg$, obtenemos: $r^3 = 7 \cdot 10^{22}\ m$, o sea, que $r \approx 4 \cdot 10^7\ m = 40000\ km$. A esta altura no hay rozamiento atmosférico y el satélite «suspendido», no retardaría su «carrera inmóvil».

Las mediciones de *g* al servicio de la exploración

No se trata de un reconocimiento militar. En este caso, el conocimiento de la aceleración de la fuerza de gravedad no haría falta para nada. Se trata de la exploración geológica cuyo objeto es descubrir yacimientos de minerales útiles bajo la tierra, sin cavar hoyos, sin abrir minas.

Existen unos cuantos métodos de determinación muy exacta de la aceleración de la fuerza de gravedad. Se puede hallar g simplemente, pesando una carga determinada en una balanza de resorte. Las balanzas geológicas tienen que ser extremadamente sensibles, su resorte registra una alteración en una carga menor de una millonésima de gramo. Las balanzas de torsión de cuarzo ofrecen un resultado excelente. En principio, su construcción no es complicada. A un hilo horizontal de cuarzo en tensión se ha soldado una palanca, con cuyo peso el hilo se tuerce ligeramente (Fig. 65).

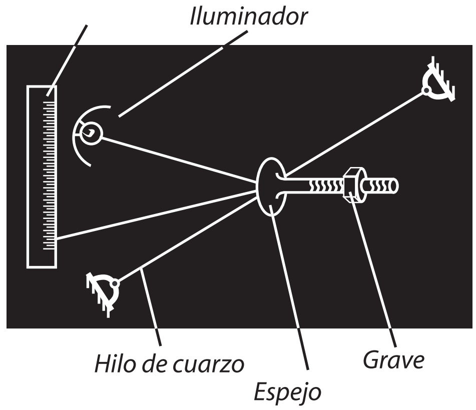


Fig. 65

Para estos mismos fines se emplea también el péndulo. No hace mucho todavía que los únicos métodos que existían para medir g eran los del péndulo, y solamente en los últimos 10−20 años, éstos fueron sustituidos por otros de balanza más cómodos y más exactos. De todos modos, midiendo el período de oscilación del péndulo, se puede hallar con bastante exactitud el valor de g valiéndose de la fórmula:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Midiendo el valor de g con un aparato en diferentes lugares, se puede juzgar sobre las variaciones relativas de fuerza de gravedad con una exactitud hasta de millonésimas partes.

Midiendo el valor de g en algún lugar de la superficie terrestre, el observador hace la conclusión: aquí el valor es anormal, es menor que lo debido en un tanto, o es mayor que lo debido en cierta cantidad.

Pero, ¿cuál es la norma para la magnitud de g?

El valor de la aceleración de la fuerza de gravedad tiene dos alteraciones auténticas en la superficie terrestre, que ya hace mucho que se han observado y que son bien conocidas por los exploradores.

Ante todo, g disminuye regularmente al trasladarse del polo al ecuador. De esto ya se habló anteriormente. Recordemos, solamente, que esta alteración es debida a dos causas: en primer lugar, la Tierra no es una esfera, y un cuerpo, estando en el polo, se hallará más cerca del centro de la Tierra; en segundo lugar, a medida que nos acercamos al ecuador, la fuerza de gravedad se va debilitando más y más por la fuerza centrífuga.

La otra alteración auténtica de g es su disminución con la altura. Según la fórmula $g = \gamma \frac{MR^2}{(R+h)^2}$, en la que R indica el radio de la Tierra y h la altura sobre el nivel del mar, el valor de g será tanto menor, cuanto más nos alejemos del centro de la Tierra. Por lo tanto, en una misma latitud y a una misma altura sobre el nivel del mar, la aceleración de la fuerza de gravedad tiene que ser la misma.

Las mediciones exactas muestran que muy a menudo se encuentran desviaciones de esta norma: anomalías de gravitación. La causa de la anomalía consiste en la distribución heterogénea de la masa en las proximidades del lugar de medición.

Como ya se explicó, la fuerza gravitatoria de un cuerpo grande se puede representar, mentalmente, como la suma de fuerzas que actúan por parte de sus partículas. La atracción del péndulo por la Tierra es el resultado de la acción de todas las partículas de ésta. Pero, está claro, que las partículas cercanas toman una participación mayor en la fuerza total, pues la atracción es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Si cerca del lugar de medición están concentradas masas pesadas, g será mayor de la norma, en caso contrario, g será menor.

Si, por ejemplo, se mide g en una montaña o en un avión que vuela sobre el mar a la altura de la montaña, en el primer caso resultará un número mayor. Por ejemplo, el valor de g en el monte Etna, en Italia, es $0.292 \frac{cm}{seg^2}$ mayor que la norma. También es mayor que la norma el valor de g en las islas solitarias del océano. Naturalmente, en ambos casos, el aumento de g se explica por la concentración de masas complementarias en el lugar de medición.

No sólo la magnitud de g, sino también la dirección de la fuerza de gravedad se puede desviar de la norma. Si se suspende un peso de un hilo, éste, estando estirado, indicará la vertical de este lugar. Esta vertical se puede desviar de la norma. La dirección vertical «normal», la conocen los geólogos por unos mapas especiales en los que, por los datos sobre los valores de g, se ha construido una figura «ideal» de la Tierra.

Figúrense que se realizan experimentos con la plomada al pie de una montaña grande. El grave de la plomada es atraído por la Tierra hacia su centro y, por la montaña, hacia un lado. En estas condiciones, la plomada tiene que desviarse de la dirección de la vertical normal (Fig. 66). Como la masa de la Tierra es mucho mayor que la masa de la montaña, estas desviaciones no son mayores de unos cuantos segundos angulares.

La vertical «normal» se determina por las estrellas, puesto que para cualquier punto geográfico está calculado en qué lugar del cielo en cada instante dado del día y del año se «apoya» la vertical de la figura «ideal» de la Tierra.

La desviación de la plomada conduce a veces a resultados extraños. Por ejemplo, en Florencia, la influencia de los Apeninos no contribuye a la atracción, sino a la repulsión de la plomada. La explicación sólo puede ser una: en los montes hay vacíos inmensos.

Las mediciones de la aceleración de la fuerza de gravedad en continentes y océanos enteros, dan un excelente resultado. Los continentes son mucho más pesados que los océanos, por eso, se podría creer que los valores de g sobre los continentes tendrían que ser mayores que sobre los océanos. En realidad, los valores de g, medidos a lo largo de una latitud sobre los océanos y sobre los continentes, por término medio, son iguales.

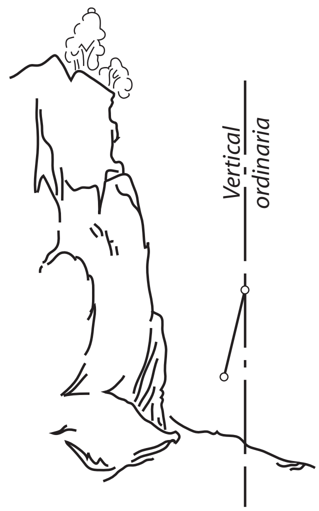


Fig. 66

Otra vez más, la explicación es única: los continentes reposan sobre rocas más ligeras y los océanos sobre rocas más firmes. En efecto, allí donde las exploraciones inmediatas son posibles, los geólogos comprueban, que los océanos descansan sobre rocas pesadas de basalto y los continentes sobre granito ligero.

Pero, inmediatamente, surge la pregunta: ¿por qué las rocas pesadas y ligeras compensan tan exactamente la diferencia de pesos de los continentes y océanos? Esta compensación no puede ser casual, la causa tiene su raíz en el origen de la constitución de la corteza de la Tierra.

Los geólogos suponen que las capas superiores de la corteza terrestre están como nadando sobre una masa plástica extendida (o sea, fácilmente deformable, como la arcilla húmeda). En las profundidades de cerca de 100 km, la presión tiene que ser en todos los sitios igual, del mismo modo que es igual la presión en el fondo de un recipiente de agua sobre el que flotan trozos de madera de diferente peso. Por eso, una columna de substancia de 1 m^2, desde la superficie hasta la profundidad de 100 km, tiene que pesar igual bajo el océano que bajo el continente.

Esta nivelación de la presión (llamada isostasia) da lugar a que los valores de la aceleración de la fuerza de gravedad g, a lo largo de un paralelo, sobre el océano y sobre el continente, no se diferencien esencialmente.

Las anomalías locales de la fuerza de gravedad nos sirven igual que le servía al pequeño Muk del cuento de Hauff *el palo encantado* con el que pegaba en el suelo allí donde había oro o plata.

Los minerales pesados hay que buscarlos en los lugares donde g es mayor. Por el contrario, los yacimientos de sales ligeras se descubren en los lugares donde la magnitud de g es menor. El valor de g se puede medir con una precisión de una cienmilésima de $1\ \dfrac{cm}{seg^2}$.

Los métodos de exploración basados en el empleo de péndulos y pesos superexactos se llaman gravitatorios. Éstos tienen una gran importancia práctica, particularmente para el descubrimiento del petróleo. Es que, con los métodos gravitatorios de exploración, es fácil descubrir las aglomeraciones de sal bajo la tierra y, frecuentemente ocurre, que allí donde hay sal, hay también petróleo. Además, éste está a mayor profundidad, mientras que la sal está más cerca de la superficie terrestre. Con el método gravitatorio de exploración fue descubierto el petróleo en el Kazajstán y en otros lugares.

La gravedad bajo tierra

Queda por aclarar una cuestión interesante. ¿Cómo varía la fuerza de gravedad al profundizarse bajo tierra?

El peso de un objeto es el resultado de la tensión de unos hilos invisibles tendidos a él desde cada trozo de substancia de la Tierra. El peso es una suma de fuerzas, el resultado de la suma de fuerzas elementales que actúan sobre el objeto por parte de las partículas de la Tierra. Todas estas fuerzas, aunque sus direcciones formen diversos ángulos, tiran del cuerpo hacia «abajo», hacia el centro de la Tierra.

Y, ¿cuál es la gravedad de un objeto situado en un laboratorio bajo tierra? Sobre él actúan las fuerzas de atracción de las capas interiores y exteriores de la Tierra.

Examinemos las fuerzas de gravitación que actúan sobre un punto situado dentro del globo terrestre por parte de la capa exterior. Si se divide esta capa en otras finas, se corta en una de ellas un cuadradito de lado a_1, Y desde el perímetro del cuadradito se trazan líneas por el punto O en aquel lugar en que nos interesa la gravedad, en el lugar opuesto de la capa resultará un cuadradito de otras dimensiones, de lado a_2 (Fig. 67). Por la ley de gravitación, las fuerzas de atracción que actúan en el punto O por parte de los dos cuadraditos, tienen direcciones contrarias y son proporcionales $\frac{m_1}{r_1^2}$ y $\frac{m_2}{r_2^2}$. Pero, las masas m_1 y m_2 los cuadraditos son proporcionales a sus áreas. Por eso, las fuerzas de gravitación son proporcionales a las expresiones, $\frac{a_1^2}{r_1^2}$ y $\frac{a_2^2}{r_2^2}$.

Sin embargo, estas razones son iguales. En la Fig. 67 se ve, que $\frac{a_1}{r_1}$ y $\frac{a_2}{r_2}$ son las razones de los lados correspondientes de los triángulos OA_1B_1 y OA_2B_2, que serán semejantes si se toman muy pequeños los lados A_1B_1 y A_2B_2 de los cuadraditos. Y esto, siempre se puede hacer.

En efecto, si los cuadraditos son pequeños, las direcciones de los segmentos A_1B_1 y A_2B_2 se diferencian muy poco de las direcciones de las tangentes en estos puntos. Entonces, se puede suponer que son iguales el ángulo B_1A_1O y el ángulo complementario a A_2B_2O, como ángulos formados por la tangente y la cuerda que subtienden un mismo arco.

Por consiguiente, $\measuredangle B_1A_1O = \measuredangle OA_2B_2$. Además, son también iguales los ángulos del vértice. Por lo tanto, los triángulos son semejantes.

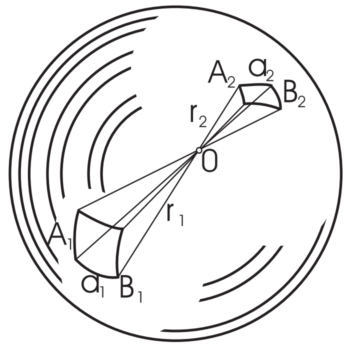


Fig. 67

De esta demostración geométrica se deduce, que $\dfrac{a_1}{r_1} = \dfrac{a_2}{r_2}$, lo que significa que se equilibran las fuerzas de atracción que actúan sobre el punto O por parte de los dos cuadraditos.

Dividiendo la capa fina en pares semejantes de cuadraditos «opuestos», hemos establecido un resultado admirable: la capa fina homogénea esférica no actúa sobre ningún punto situado dentro de ella. Pero esto, es cierto para todas las capas finas en que hemos dividido la zona esférica situada sobre el punto subterráneo que nos interesa.

Por lo tanto, la capa terrestre situada sobre el cuerpo, es como si no existiese. La acción sobre el cuerpo de sus partes separadas se equilibran y la fuerza total de atracción por parte de la capa exterior es igual a cero.

Claro, en estos razonamientos se suponía que la densidad de la Tierra era constante dentro de cada capa.

El resultado de nuestros razonamientos nos da la posibilidad de obtener la fórmula para la fuerza de gravedad que actúa a la profundidad H bajo tierra. El punto, situado a la profundidad H, experimenta una atracción sólo por parte de las capas interiores de la Tierra. La fórmula para la aceleración de la fuerza de gravedad, $g = \gamma \dfrac{M}{R^2}$, también, es válida para este caso, ahora que M y R no representan la masa y el radio de toda la Tierra, sino sólo de su parte «interior» con respecto a este punto.

Si la Tierra tuviese una misma densidad en todas las capas, la fórmula para g tomaría la forma:

$$g = \gamma \frac{\rho \frac{4}{3}\pi \left(R_T - H\right)^3}{\left(R_T - H\right)^2} = \frac{4}{3}\pi\gamma\rho \left(R_T - H\right),$$

donde ρ es la densidad y R_T, el radio de la Tierra.

Esto significa, que g cambiaría directamente proporcional a $(R_T - H)$: cuanto mayor sea la profundidad H, tanto menor será g.

En realidad, el comportamiento de g cerca de la superficie terrestre (que se puede observar hasta las profundidades de 5 km bajo el nivel del mar), no obedece a esta regla. Los experimentos muestran que en estas capas, g, por el contrario, aumenta con la profundidad. La divergencia entre el experimento y la fórmula se explica porque no se había tenido en cuenta la diferencia de densidad a diversas profundidades.

La densidad media de la Tierra se halla fácilmente dividiendo la masa por el volumen del globo terrestre. Esto nos proporciona el número 5.52 $\dfrac{g}{cm^3}$. A su vez, la densidad de las rocas superficiales es mucho menor, ésta es igual a 2.75 $\dfrac{g}{cm^3}$. La densidad de las capas terrestres aumenta con la profundidad. En las capas de la superficie de la Tierra, este efecto es superior a la disminución ideal que se deduce de la fórmula y la magnitud de g aumenta.

Energía gravitatoria

Ya nos hemos encontrado, en un ejemplo simple, con la energía gravitatoria. Un cuerpo, levantado sobre la tierra a la altura h, posee una energía potencial mgh.

Sin embargo, esta fórmula se puede aplicar solamente cuando la altura h es mucho menor que el radio de la Tierra.

La energía de la gravitación es una cantidad importante. Es interesante obtener una fórmula para la energía que sirviese para los cuerpos levantados sobre la tierra a cualquier altura y, en general, para dos masas que se atraen de acuerdo a la ley universal:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Supongamos que por la acción de la atracción mutua, los cuerpos se hayan acercado un poquito. Entre ellos había una distancia r_1 y ahora es de r_2. En este caso, se realiza un trabajo $A = F\left(r_1 - r_2\right)$. El valor de la fuerza hay que tomarlo en un punto medio. De este modo:

$$A = \gamma \frac{m_1 m_2}{r_{\text{medio}}^2} \left(r_1 - r_2\right).$$

Si r_1 y r_2 se diferencian poco entre sí, se puede sustituir r_{medio}^2 por el producto $r_1 r_2$. Obtenemos:

$$A = \gamma \frac{m_1 m_2}{r_2} - \gamma \frac{m_1 m_2}{r_1}.$$

Este trabajo se realiza a cuenta de la energía gravitatoria:

$$A = U_1 - U_2,$$

donde U_1 es el valor inicial de la energía potencial de gravitación y U_2 el valor final de la misma.

Comparando estas dos fórmulas, para la energía potencial hallamos la expresión

$$U = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r}.$$

Ésta se parece a la fórmula para la fuerza de gravitación, pero en el denominador figura r a la primera potencia.

Según esta fórmula, para valores muy grandes de r, la energía potencial $U = 0$. Esto es comprensible puesto que a tales distancias ya no se siente la atracción. Pero al acercarse los cuerpos, la energía potencial tiene que disminuir, pues a cuenta de ella tiene que realizarse trabajo.

Pero, ¿hacia dónde tiene que disminuir desde cero? En dirección negativa. Por eso, en la fórmula figura el signo menos. Pues, -5 es menor que cero y -10 es menor que -5.

Si solamente se tratase del movimiento cerca de la superficie terrestre, la expresión general para la fuerza de gravitación se podría sustituir por el producto mg. Entonces, con gran precisión, $U_1 = U_2 = mgh$.

Pero, en la superficie de la Tierra, el cuerpo tiene una energía potencial $-\gamma\dfrac{Mm}{R}$, donde R es el radio de la Tierra.

Por lo tanto, a la altura h sobre la superficie terrestre,

$$U = -\gamma\frac{Mm}{R} + mgh.$$

Cuando, por primera vez, se dedujo la fórmula para la energía potencial , se había convenido medir la altura y la energía desde la superficie terrestre. Al aplicar la fórmula $U = mgh$, se desprecia el término constante $-\gamma\dfrac{Mm}{R}$, se supone condicionalmente que es igual a cero. Como sólo nos interesan las diferencias de energías (pues ordinariamente se mide el trabajo, que es la diferencia de energías), la presencia de un término constante $-\gamma\dfrac{Mm}{R}$ en la fórmula de la energía potencial, no juega ningún papel.

La energía gravitatoria determina la rigidez de las cadenas «que ligan» al cuerpo con la Tierra. ¿Cómo romper estas cadenas? ¿Cómo conseguir que un cuerpo, lanzado desde la Tierra, no vuelva a ella? Claro que, para esto, hay que comunicar al cuerpo una velocidad inicial muy grande. Pero, ¿qué es lo mínimo que se pide?

A medida que se aleja de la Tierra, la energía potencial de un cuerpo lanzado desde la Tierra (un proyectil, un cohete), va aumentando (el valor absoluto de U disminuye); la energía cinética va disminuyendo. Si la energía cinética se convierte en cero antes de tiempo, antes de que rompamos las cadenas de gravitación del globo terrestre, el proyectil despedido cae de vuelta a la Tierra.

Es necesario que el cuerpo conserve su energía cinética mientras su energía potencial no se haga, prácticamente, igual a cero. Antes del lanzamiento, el proyectil tenía la energía potencial $-\gamma\dfrac{Mm}{R}$ (M y R son la masa y el radio de la Tierra). Por eso, hay que comunicarle al proyectil una velocidad tal, que se haga positiva la energía total del proyectil despedido. Un cuerpo, con una energía total negativa (el valor absoluto de la energía potencial es mayor que el valor de la cinética) no puede salir de los límites de la esfera de gravitación.

Por consiguiente, llegamos a una condición sencilla. Para separar de la Tierra un cuerpo de masa m, hay que vencer una energía potencial de gravitación igual a

$$\gamma\frac{Mm}{R}.$$

La velocidad del proyectil tiene que alcanzar el valor llamado segunda velocidad cósmica v_2, que es fácil hallar de la igualdad de las energías potencial y cinética:

$$\frac{mv_2^2}{2} = \gamma\frac{Mm}{R}, \text{ es decir, } \ v_2^2 = 2\gamma\frac{M}{R},$$

o bien,

$$v_2^2 = 2gR,$$

puesto que

$$g = \gamma\frac{M}{R^2}.$$

El valor de v_2 calculado por esta fórmula, alcanza 11 $\frac{km}{seg}$, claro, prescindiendo de la resistencia de la atmósfera. Esta velocidad es $\sqrt{2} = 1.41$ veces mayor que la primera velocidad cósmica $v_1 = \sqrt{gR}$ de un satélite artificial que gira cerca de la superficie terrestre, o sea, que $v_2 = \sqrt{2}v_1$.

La masa de la Luna es 81 veces menor que la masa de la Tierra; su radio es cuatro veces menor que el terrestre. Por eso, la energía gravitatoria en la Luna es veinte veces menor que en la Tierra, y para desprenderse de la Luna es suficiente una velocidad de 2.5 $\frac{km}{seg}$.

La energía cinética $\frac{mv^2}{2}$ se gasta en romper las cadenas gravitatorias del planeta que sirve de estación de partida. Si quisiéramos que el cohete se moviese con una velocidad v, venciendo la gravedad, tendríamos que comunicarle una velocidad complementaria $\frac{mv^2}{2}$. En este caso, para mandar de viaje al cohete habría que comunicarle una energía $\frac{mv_0^2}{2} = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{mv^2}{2}$. Por lo tanto, las tres velocidades de que se trata están ligadas con la simple relación:

$$v_0^2 = v_2^2 + v^2.$$

¿Qué velocidad mínima se necesita para que un proyectil, enviado a las estrellas lejanas, supere la gravitación de la Tierra y del Sol? Esta velocidad la señalaremos con v_3, puesto que se llama tercera velocidad cósmica.

Determinemos, ante todo, el valor de la velocidad que se necesita para vencer solamente la atracción del Sol.

Como acabamos de ver, la velocidad necesaria para que un proyectil disparado salga fuera de la esfera de atracción terrestre es $\sqrt{2}$ veces mayor que la velocidad necesaria para poner un satélite en una órbita terrestre. Estos mismos razonamientos se refieren también al Sol, es decir, la velocidad necesaria para salir fuera de la esfera de atracción solar es $\sqrt{2}$ veces mayor que la velocidad del satélite del Sol (o sea, de la Tierra). Como la velocidad del movimiento de la Tierra alrededor del Sol es, aproximadamente, de 30 $\frac{km}{seg}$, la velocidad necesaria para salir de la esfera de atracción del Sol es de 42 $\frac{km}{seg}$. Esto es muchísimo; sin embargo, para mandar un proyectil a las estrellas lejanas, hay que aprovechar, naturalmente, el movimiento del globo terrestre y lanzar el cuerpo en dirección del movimiento de la Tierra. Entonces, tenemos que comunicarle solamente una velocidad de $42 - 30 = 12\ \dfrac{km}{seg}$.

Ahora podemos calcular definitivamente la tercera velocidad cósmica. Ésta es la velocidad con la que hay que lanzar al cohete para que, saliendo de la esfera de atracción terrestre, alcance una velocidad de $12\ \dfrac{km}{seg}$. Aplicando la fórmula que acabamos de mencionar, obtenemos:

$$v_3^2 = (11)^2 + (12)^2\,,$$

de donde, $v_3 = 16\ \dfrac{km}{seg}$.

Resumiendo, con una velocidad de $11\ \dfrac{km}{seg}$, el cuerpo abandona la Tierra, pero no se marcha «muy lejos»; la Tierra le deja escapar, pero el Sol no le deja en libertad. El cohete se convierte en un satélite del Sol.

Resulta que la velocidad necesaria para viajar por el espacio estelar es, solamente, vez y media mayor que la que se necesita para viajar por el sistema solar dentro de la órbita terrestre. Claro que, como ya se advirtió, un aumento sensible de la velocidad inicial del proyectil va acompañado de muchas dificultades técnicas (véase la pág. 64).

Cómo se mueven los planetas

A la pregunta de cómo se mueven los planetas, se puede contestar abreviadamente: de acuerdo a la ley gravitatoria. Las únicas fuerzas aplicadas a los planetas son las gravitatorias.

Como la masa de los planetas es mucho menor que la del Sol, las fuerzas de interacción de los planetas no desempeñan un gran papel. El movimiento de cada uno de los planetas está casi totalmente dictado por la fuerza de atracción del Sol, como si los demás planetas no existiesen.

Las leyes del movimiento de los planetas alrededor del Sol se deducen de la ley de gravitación universal.

Históricamente, esto no ocurrió así. Las leyes del movimiento de los planetas fueron descubiertas por el célebre astrónomo alemán Johannes Kepler antes de Newton, sin emplear la ley de gravitación, basándose en el estudio de las observaciones astronómicas realizadas durante casi veinte años.

Las trayectorias, o como suelen decir los astrónomos, las órbitas, que describen los planetas alrededor del Sol, son muy parecidas a una circunferencia.

¿Cómo está relacionado el período de rotación de un planeta con el radio de su órbita?

La fuerza de gravitación, que actúa sobre el planeta por parte del Sol, es igual a

$$F = \gamma \frac{Mm}{r^2},$$

donde M es la masa del Sol, m es la masa del planeta y r la distancia entre ellos.

Pero, según la ley principal de la mecánica, $\dfrac{F}{m}$ es la aceleración y, además, la centrípeta:

$$\frac{F}{m} = \frac{v^2}{r}.$$

La velocidad del planeta se puede expresar como la longitud de la circunferencia $2\pi r$, dividida por el período de rotación T. Poniendo $v = \dfrac{2\pi r}{T}$ y el valor de la fuerza F en la fórmula de la aceleración, obtenemos:

$$\frac{4\pi^2 r}{T^2} = \gamma \frac{M}{r^2}\text{ , es decir, }\ T^2 = \frac{4\pi^2 r^3}{\gamma M}.$$

El coeficiente de proporcionalidad ante r^3, es una cantidad que depende sólo de la masa del Sol, y es igual para cualquier planeta. Por consiguiente, para dos planetas, se verifica la relación:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{r_1^3}{r_2^3}.$$

La razón de los cuadrados de los tiempos de rotación de los planetas es igual a la razón de los cubos de los radios de sus órbitas. Kepler dedujo esta interesante ley del experimento. La ley de gravitación universal explicaba esta observación de Kepler.

El movimiento circular de un cuerpo celeste alrededor de otro, es solamente una de las posibilidades.

Las trayectorias de un cuerpo que gira alrededor de otro a causa de las fuerzas gravitatorias, pueden ser muy diversas. Sin embargo, como muestra el cálculo y como había sido observado por Kepler sin ningún cálculo, todas éstas pertenecen a una clase de curvas llamadas elipses.

Si atamos un hilo a dos alfileres, hincados en un papel de dibujo, y se estira del hilo con la punta de un lapicero, moviéndolo de modo que el hilo se mantenga en tensión, en el papel se marcará una curva: ésta es la elipse (Fig. 68). Los lugares donde se hallan los alfileres son los focos de la elipse.

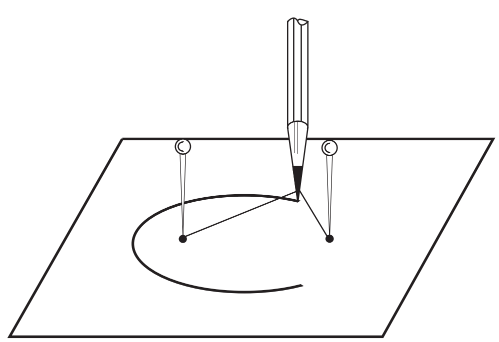


Fig. 68

Las elipses pueden tener diversas formas. Si tomamos un hilo mucho más largo que la distancia entre los alfileres, resultará una elipse muy parecida a un círculo.

Por el contrario, si la longitud del hilo es solamente un poco mayor que la distancia entre los alfileres, entonces se obtiene una elipse alargada, parecida a un palito.

Los planetas describen elipses, en uno de cuyos focos está el Sol.

¿Qué elipses describen los planetas? Resulta que éstas son muy parecidas a circunferencias.

La trayectoria más distinta de la circunferencia es la del planeta más próximo al Sol: la de Mercurio. Pero, en este caso, el diámetro más largo de la elipse es solamente el 2 % mayor que el más corto. Otra cosa ocurre con los satélites artificiales. Vean la Fig. 69. La órbita de Marte no se distingue de la circunferencia.

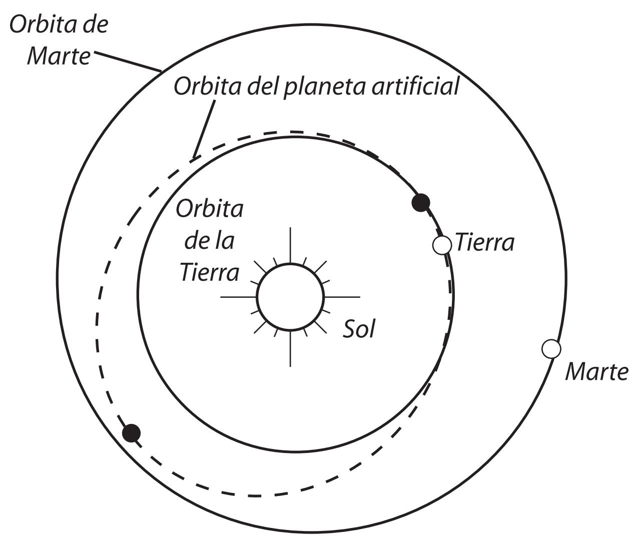


Fig. 69

Sin embargo, como el Sol está en uno de los focos de la elipse y no en su centro, la variación de la distancia del planeta al Sol es más notable. Tracemos una línea por los dos focos de la elipse. Esta línea se cortará con la elipse en dos lugares. El punto más próximo al Sol se llama perihelio, el más alejado del Sol, afelio. Mercurio está en el perihelio 1.5 veces más próximo del Sol que el afelio.

Los planetas principales describen elipses alrededor del Sol muy parecidas a circunferencias. Sin embargo, existen cuerpos celestes que se mueven alrededor del Sol por elipses muy alargadas. Entre éstos se encuentran los cometas. Sus órbitas, refiriéndose a su alargamiento, no se pueden comparar con las de los planetas. Se puede decir que los cuerpos celestes que se mueven por elipses pertenecen a la familia del Sol. Sin embargo, a veces, en nuestro sistema penetran forasteros casuales.

Se han observado cometas que describen unas curvas alrededor del Sol, que juzgando por su forma, se puede hacer la conclusión de que ellos jamás volverán, pues no pertenecen a la familia del sistema solar. Las curvas «abiertas» que describen los cometas se llaman hipérbolas.

Sobre todo, se mueven con mucha rapidez los cometas que pasan cerca del Sol. Esto es comprensible: la energía total del cometa es constante y, al acercarse al Sol, aquél tiene la energía potencial mínima. Esto quiere decir que, en este caso, la energía cinética del movimiento es máxima. Claro que esto tiene lugar para todos los planetas y para la Tierra inclusive. Pero este efecto no es muy grande, ya que la diferencia de las energías potenciales en el afelio y en el perihelio es pequeña.

De la ley de conservación del momento del impulso se deduce una ley interesante del movimiento de los planetas.

En la fig. 70 están representadas dos posiciones de un planeta. Desde el Sol, o sea, desde el foco de la elipse, se han trazado dos radios hasta las posiciones del planeta, y el sector formado, se ha rayado. Hay que determinar la magnitud del área que describe el radio en una unidad de tiempo. Si el ángulo es pequeño, el sector descrito por el radio en un segundo se puede sustituir por un triángulo. La base del triángulo es igual a la velocidad v (el espacio recorrido en un segundo) y la altura igual al brazo d de la velocidad. Por eso, el área del triángulo es igual a $\frac{vd}{2}$.

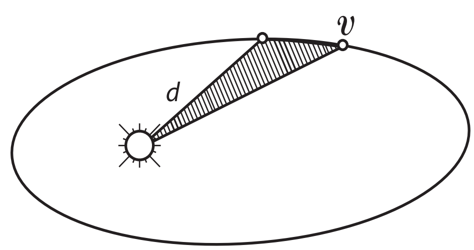


Fig. 70

De la ley de conservación del momento se deduce que la magnitud mvd permanece constante durante el movimiento. Pero, si mvd es constante, tampoco varía el área $\frac{vd}{2}$ del triángulo. Podemos dibujar sectores para cualesquiera momentos; éstos resultarán de igual área. La velocidad del planeta varía, pero, lo que se puede llamar velocidad sectorial, se mantiene inalterable.

No todas las estrellas tienen un cerco planetario. En el cielo hay bastantes estrellas dobles. Dos cuerpos celestes inmensos giran uno alrededor de otro.

La gran masa del Sol le convierte en el centro de la familia. En las estrellas dobles, los dos cuerpos celestes tienen masas parecidas. En este caso, no se puede suponer que una de las dos estrellas está en reposo. ¿Cómo ocurre entonces el movimiento? Ya sabemos que cada sistema cerrado tiene un punto en reposo (o que se mueve uniformemente); éste es el centro de inercia. Las dos estrellas se mueven alrededor de este punto. Éstas describen elipses semejantes, como se deduce de la condición $\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_1}{r_2}$, escrita en la pág. 108. La elipse de una estrella es tantas veces mayor que la elipse de la otra, cuantas veces la masa de la segunda es mayor que la masa de la primera (Fig. 71). Si las masas son iguales, éstas describirán trayectorias iguales alrededor del centro de inercia.

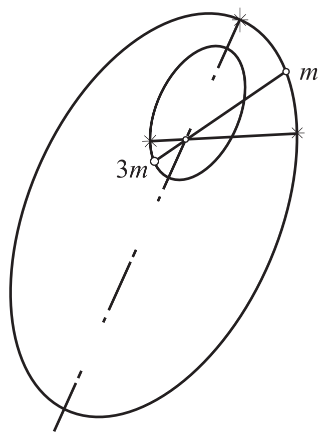


Fig. 71

Los planetas del sistema solar se encuentran en condiciones ideales, pues no sufren rozamiento alguno.

Los pequeños cuerpos celestes artificiales creados por el hombre, los satélites, no están en tal situación ideal, ya que las fuerzas de rozamiento, aunque insignificantes al principio, son, de todos los modos, sensibles e intervienen resueltamente en el movimiento.

La energía total del planeta se mantiene inalterable. Con cada vuelta, disminuye un poquito la energía total del satélite. A primera vista, parece que el rozamiento tiene que retardar el movimiento del satélite. En realidad, ocurre lo contrario.

Recordemos, ante todo, que la velocidad del satélite es igual a $\sqrt{gR}$, o a $\sqrt{\gamma\dfrac{M}{R}}$, donde R es la distancia hasta el centro de la Tierra y M, su masa.

La energía total del satélite es igual a:

$$E = -\gamma\frac{Mm}{R} + \frac{mv_2^2}{2}.$$

Poniendo el valor de la velocidad del satélite, para la energía cinética, hallamos la expresión $\gamma\dfrac{mM}{2R}$. Vemos, pues, que el valor absoluto de la energía cinética es dos veces menor que la potencial, y la energía total es igual a

$$E = -\frac{\gamma}{2}\frac{Mm}{R}.$$

Habiendo rozamiento, la energía total disminuye (puesto que es negativa), es decir, crece en valor absoluto; la distancia R comienza a disminuir: el satélite desciende. ¿Qué ocurre, en este caso, con el sumando de la energía? La energía potencial decrece (crece en valor absoluto); la energía cinética aumenta.

De todos modos, el balance total es negativo, puesto que la energía potencial decrece dos veces más rápidamente que crece la energía cinética.

El rozamiento conduce al aumento de la velocidad del movimiento del satélite y no a su disminución.

Ahora se comprende por qué el cohete conductor adelanta al pequeño satélite. El cohete grande tiene mayor rozamiento.

Si no hubiese Luna...

Aquí no vamos a discutir las tristes consecuencias que traería la falta de la Luna para los poetas y enamorados. El título del párrafo debe entenderse de un modo más prosaico: ¿cómo influye la presencia de la Luna en la mecánica terrestre?

Cuando, anteriormente, hablábamos de las fuerzas que actúan sobre un libro situado en la mesa, decíamos con seguridad, que éstas eran la atracción de la Tierra y la fuerza de reacción. Estrictamente hablando, el libro situado sobre la mesa es atraído por la Luna, por el Sol y hasta por las estrellas.

La Luna es nuestro vecino más próximo. Olvidémonos del Sol y de las estrellas, y veamos en cuánto se altera el peso del cuerpo en la Tierra por la acción de la Luna.

La Tierra y la Luna están en movimiento relativo. Con respecto a la Luna, la Tierra, como un todo (o sea, todos los puntos de la Tierra) se mueve con una aceleración $\gamma\frac{m}{r^2}$, donde m es la masa de la Luna y r la distancia del centro de la Luna al centro de la Tierra.

Examinemos ahora un cuerpo situado en la superficie de la Tierra. A nosotros nos interesa, en cuánto se altera su peso a causa de la acción de la Luna. El peso terrestre se determina por la aceleración con respecto a la Tierra. Por lo tanto, en otras palabras, nos interesa saber en cuánto se altera, por la acción de la Luna, la aceleración de un cuerpo situado en la superficie terrestre con respecto a la Tierra.

La aceleración de la Tierra con respecto a la Luna es $\gamma\frac{m}{r^2}$, la aceleración de un cuerpo situado en la superficie de la Tierra, con respecto a la Luna es $\gamma\frac{m}{r_1^2}$, donde r_1 es la distancia del cuerpo a la Luna (Fig. 72).

Nos hace falta una aceleración complementaria del cuerpo con respecto a la Tierra: ésta será igual a la diferencia geométrica de las aceleraciones correspondientes.

La magnitud $\gamma\frac{m}{r^2}$ es constante para la Tierra, mientras que para diversos puntos de la superficie terrestre, la magnitud $\gamma\frac{m}{r_1^2}$, es diferente. Por lo tanto, la diferencia geométrica que nos interesa es diferente para diversos lugares del globo terrestre.

¿Cuál es la gravedad terrestre en el lugar de la superficie de la Tierra más próximo a la Luna, en el más lejano de ella y en el medio?

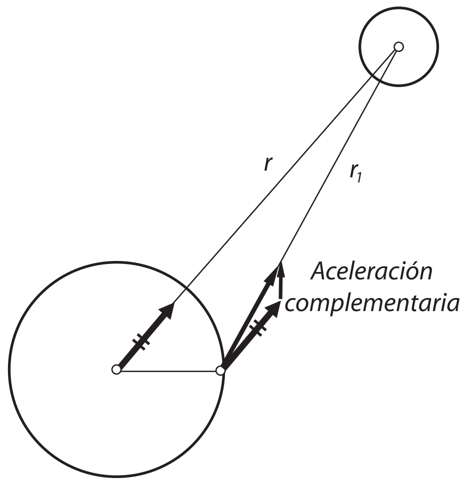


Fig. 72

Para hallar la aceleración del cuerpo con respecto al centro de la Tierra, debida a la acción de la Luna, o sea, la corrección a la g terrestre, hay que restar la cantidad constante $\gamma\dfrac{m}{r^2}$ de la cantidad $\gamma\dfrac{m}{r_1^2}$ en los sitios indicados del globo terrestre (las flechas claras en la Fig. 73). Además, hay que recordar, que la aceleración, $\gamma\dfrac{m}{r^2}$ de la Tierra hacia la Luna está dirigida paralelamente a la línea del centro Tierra—Luna. Restar un vector es equivalente a sumar el vector opuesto. En el dibujo, los vectores $-\gamma\dfrac{m}{r_1^2}$ están marcados con flechas en negrilla.

Sumando los vectores señalados en el dibujo, hallamos lo que nos interesa: la variación de la aceleración de la caída libre sobre la superficie de la Tierra, debida a la influencia de la Luna.

En el sitio más próximo a la Luna, la aceleración complementaria resultante es igual a:

$$\gamma\frac{m}{(r-R)^2}-\gamma\frac{m}{r^2},$$

y está dirigida hacia la Luna. El peso terrestre disminuye; el cuerpo se hace más ligero en el punto A que en ausencia de la Luna.

Teniendo en cuenta que R es mucho menor que r, la fórmula escrita se puede simplificar. Reduciendo a un común denominador, obtenemos:

$$\frac{\gamma mR\,(2r-R)}{r^2\,(r-R)^2}.$$

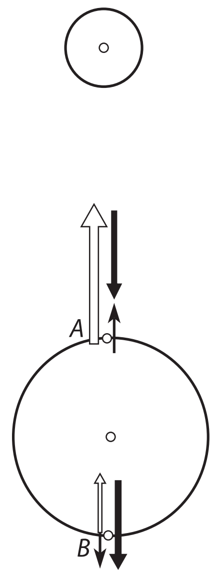


Fig. 73

Despreciando, entre los paréntesis, la cantidad relativamente pequeña R, que se resta de unas cantidades mucho más grandes, r y $2r$, obtenemos:

$$\frac{2\gamma mR}{r^3}.$$

Traslademónos a los antípodas. En el punto B (Fig. 73), la aceleración por parte de la Luna no es mayor, sino menor que la aceleración general terrestre. Pero ahora, estamos situados en la parte del globo terrestre más lejana a la Luna. La disminución de la atracción de la Luna en esta parte del globo terrestre, conduce a los mismos resultados a que conducía el aumento de la atracción en el punto A, a saber: a la disminución de la aceleración de la fuerza de gravedad. ¿Verdad que el resultado es sorprendente? Pues, aquí también, como resultado de la acción de la Luna, el cuerpo se hace más ligero. La diferencia

$$\gamma\frac{m}{(r-R)^2} - \gamma\frac{m}{r^2} \approx -\frac{2\gamma mR}{r^3},$$

resulta ser, en su valor absoluto, igual que en el punto A.

Otra cosa ocurre en la línea media. Aquí, las aceleraciones forman ángulos entre sí y la resta de la aceleración general de la Tierra, por la Luna, $\gamma\frac{m}{r^2}$ y de la aceleración, por la Luna, de un cuerpo situado en la Tierra, $\gamma\frac{m}{r_1^2}$ hay que efectuarla geométricamente (Fig. 74).

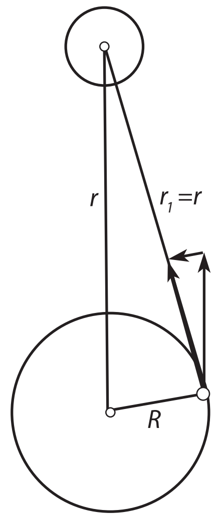


Fig. 74

Si situamos al cuerpo en la Tierra, de modo que r_1 y r sean de igual magnitud, nos separaremos un poquito de la línea media. La diferencia vectorial de las aceleraciones representa la base del triángulo isósceles. De la semejanza de los triángulos representados en la Fig. 74 se ve, que la aceleración buscada es tantas veces menor que $\gamma\dfrac{m}{r^2}$, cuantas veces R es menor que r.

Por consiguiente, el complemento de g que se busca, en la línea media de la superficie terrestre, es igual a

$$\frac{\gamma m R}{r^3};$$

su valor numérico es dos veces menor que el debilitamiento de la fuerza de gravedad en los puntos extremos. En lo que se refiere a la dirección de esta aceleración complementaria, ésta, como se ve el dibujo, también en este caso coincide prácticamente con la vertical en el punto dado de la superficie terrestre. Su dirección es hacia abajo, es decir, conduce a un aumento de peso.

Así pues, la influencia de la Luna en la mecánica terrestre consiste en la alteración del peso de los cuerpos situados en la superficie terrestre. Además, el peso disminuye en el punto más próximo y en el más alejado de la Luna y aumenta en la línea media; la alteración del peso en el último caso, es dos veces menor que en el anterior.
Naturalmente, que las razones expuestas son verídicas para cualquier planeta, para el Sol, para las estrellas.

Un cálculo sencillo muestra que ni los planetas, ni las estrellas, no proporcionan una ínfima parte de la aceleración lunar.

Es muy fácil comparar la acción de cualquier cuerpo celeste con la de la Luna: hay que dividir las aceleraciones complementarias de este cuerpo por «el complemento lunar»:

$$\frac{\gamma m R}{r^3} : \frac{\gamma m_{\text{Luna}} R}{r^3_{\text{Luna}}}.$$

Resulta

$$\frac{m}{m_{\text{Luna}}} \cdot \frac{r^3}{r^3_{\text{Luna}}}.$$

Solamente para el Sol esta razón no es mucho menor de la unidad. Éste está mucho más alejado de nosotros que la Luna, pero la masa de la Luna es decenas de millones de veces menor que la del Sol.

Poniendo los valores numéricos hallamos, que la gravedad terrestre por la influencia del Sol se altera 2.17 veces menos que por la influencia de la Luna.

Veamos ahora en cuánto variaría el peso de los cuerpos terrestres si la Luna abandonase la órbita de la Tierra. Poniendo los valores numéricos en la expresión $\frac{2\gamma m R}{r^3}$ hallamos, que la aceleración lunar es del orden de 0.0001 $\frac{cm}{seg^2}$, o sea, representa una diez millonésima parte de g.

Parece como si esto no fuese nada. ¿Valía la pena de prestar tanta atención a un problema tan complicado de mecánica, siendo el efecto tan ínfimo? ¡No debemos de apresurarnos en hacer conclusiones semejantes! Este efecto «insignificante» es la causa de las potentes olas de las mareas. Trasladando inmensas masas de agua, se crea diariamente una energía cinética de 10^{16} $kgmf$. Ésta es equivalente a la energía que llevan todos los ríos del globo terrestre.

En efecto, el porcentaje de la alteración de la cantidad que hemos calculado es pequeñísimo. Un cuerpo que se hiciese más ligero en una cantidad tan «insignificante», se alejaría del centro de la Tierra. Pero, como el radio de la Tierra es de 6000000 metros, una desviación insignificante se mediría en decenas de centímetros.

Figúrense que la Luna hubiese parado su movimiento con respecto a la Tierra y que brillase sobre el océano. Los cálculos muestran que en este sitio, el nivel del agua se elevaría en 54 cm. La misma elevación de agua resultaría en los antípodas. En la línea media entre estos puntos extremos, el nivel del agua en el océano disminuiría en 27 cm.

Gracias a la rotación de la Tierra alrededor de su eje, los «lugares» de subidas y descensos del océano se desplazan continuamente. Éstas son las mareas. Durante seis horas, aproximadamente, se produce una subida del nivel del agua; el agua avanza hacia la costa: es el flujo. Después comienza el reflujo, que también dura unas seis horas. En cada día lunar se efectúan dos flujos y dos reflujos. El cuadro del fenómeno de las mareas se complica mucho debido al rozamiento de las partículas del agua, a la forma del fondo del mar y al contorno del litoral.

Por ejemplo, en el mar Caspio son imposibles las mareas, por la simple razón de que toda la superficie del mar está simultáneamente en las mismas condiciones.

Tampoco existen mareas en los mares interiores, unidos con el océano por estrechos y largos corredores, como el mar Negro y el mar Báltico.

Particularmente grandes suelen ser las mareas en las bahías estrechas, donde la ola de pleamar que viene del océano se levanta a mucha altura. Por ejemplo, en la bahía

Guizhiguinskaya, en el mar Ojotsk, la altura de la pleamar alcanza unos cuantos metros.

Si las costas del océano son bastante planas (como, por ejemplo, en Francia), la subida del agua durante la pleamar puede cambiar en muchos kilómetros la frontera de la tierra y el mar.

Los fenómenos de las mareas dificultan la rotación de la Tierra, pues, el movimiento de las olas de las mareas está ligado al rozamiento. Para superar este rozamiento —llamado de marea—, se tiene que realizar un trabajo. Por esto, disminuye la energía de rotación, y con ella, la velocidad de rotación de la Tierra alrededor de su eje.

Este fenómeno da lugar al alargamiento del día, de que se habló en la pág. 4.

El rozamiento de marea nos ayuda a comprender por qué la Luna presenta siempre una misma cara a la Tierra.

Probablemente, en cierto tiempo, la Luna era fluida. La rotación de este globo fluido alrededor de la Tierra iba acompañada de un grandísimo frotamiento de marea que, poco a poco, retardaba el movimiento de la Luna. Por fin, la Luna acabó de girar con respecto a la Tierra, las mareas se terminaron y la Luna escondió de nuestra vista la mitad de su superficie.

VIII. Presión

Prensa hidráulica

La prensa hidráulica es una máquina antigua que ha conservado su valor hasta nuestros días.

Vean la Fig. 75 donde está representada la prensa hidráulica. En un recipiente cerrado con agua pueden moverse dos émbolos. Si se empuja con la mano uno de ellos, la presión se transmite al otro y éste se levanta. El agua, empujada por el primer émbolo dentro del recipiente, obliga a levantar la misma cantidad de agua sobre la marca inicial del segundo émbolo.

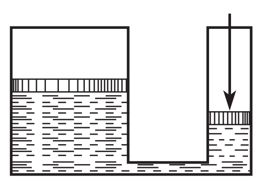


Fig. 75

Si las superficies de los émbolos son S_1 y S_2, y los desplazamientos, l_1 y l_2, entonces, por la igualdad de volúmenes, se tiene:

$$S_1 l_1 = S_2 l_2, \text{ o bien, } \frac{l_1}{l_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Tenemos que conocer la condición de equilibrio de los émbolos.

Esta condición la hallaremos sin dificultad, partiendo de que el trabajo de las fuerzas en equilibrio tiene que ser igual a cero. Siendo esto así, al desplazar los émbolos, los trabajos de las fuerzas que obran sobre ellos tienen que ser iguales (pero de signo contrario). Por consiguiente,

$$F_1 l_1 = F_2 l_2, \text{ o bien, } \frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Comparando con la igualdad anterior, vemos que

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Esta sencilla ecuación manifiesta la posibilidad de una multiplicación muy grande de la fuerza. El émbolo que transmite la presión puede tener cientos o miles de veces menor superficie. En esta misma cantidad de veces se diferenciará de la fuerza muscular, la fuerza que actúa sobre el émbolo grande.

Con ayuda de la prensa hidráulica se pueden forjar y estampar los metales, prensar uvas, levantar pesos, etcétera.

Claro que la ganancia en fuerza irá acompañada de pérdida en el camino. Para comprimir con la prensa un cuerpo en 1 cm, habrá que hacer un recorrido con la mano tantas veces mayor, cuantas veces se diferencian las fuerzas F_2 y F_1.

La razón de la fuerza a la superficie $\dfrac{F}{S}$, se llama en física, presión. En vez de decir: la fuerza de $1\,kgf$ actúa sobre la superficie de 1 cm^2, diremos abreviadamente: la presión (ésta se designa con la letra p), $p = 1\ \dfrac{kgf}{cm^2}$.

En vez de la razón $\dfrac{F_2}{F_1} = \dfrac{S_2}{S_1}$, podemos escribir ahora:

$$\frac{F_2}{S_2} = \frac{F_1}{S_1}, \text{ o sea, } p_1 = p_2.$$

Así, pues, la presión sobre los dos émbolos es la misma.

Nuestro razonamiento no depende de la posición de los émbolos, ya sean sus superficies horizontales, verticales u oblicuas. Y, en general, el asunto no está en los émbolos. Podemos figurarnos que se han elegido dos partes cualesquiera de una superficie que contiene líquido, y afirmar, que la presión sobre esta superficie es la misma en todos los sitios.

De este modo, resulta que la presión dentro del líquido es igual en todos sus puntos y en todas las direcciones. O, en otras palabras, sobre una superficie de una medida determinada actúa una fuerza igual, donde quiera y como quiera que esté situada la superficie. Esta regla lleva el nombre de principio de Pascal.

Presión hidrostática

El principio de Pascal es justo para los líquidos y los gases. Sin embargo, éste no tiene en consideración una circunstancia muy importante, la existencia del peso.

En las condiciones terrestres no se puede olvidar esto. El agua también pesa. Es comprensible por esto, que dos superficies situadas a diversa profundidad bajo el agua, experimentan presiones distintas. ¿A qué es igual esta diferencia? Figurémonos que se ha elegido dentro del líquido un cilindro recto con las bases horizontales. El agua situada dentro de él presiona sobre el agua que la rodea. La fuerza total de esta presión es igual al peso mg del líquido en el cilindro (Fig. 76). Esta fuerza total se descompone en dos fuerzas que actúan sobre las bases del cilindro y sobre su superficie lateral. Pero las fuerzas que actúan sobre las paredes opuestas de la superficie lateral son iguales en valor absoluto y de dirección contraria. Por eso, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre la superficie lateral es igual a cero. Por lo tanto, el peso mg será igual a la diferencia de las fuerzas $F_2 - F_1$. Si la altura del cilindro es igual a h, el área de la base igual a S y la densidad del líquido igual a ρ, entonces, en lugar de mg se puede escribir ρghS. La diferencia de las fuerzas es igual a esta cantidad. Para obtener la diferencia de presiones, hay que dividir el peso por el área S. La diferencia de presiones resulta ser igual a ρgh.

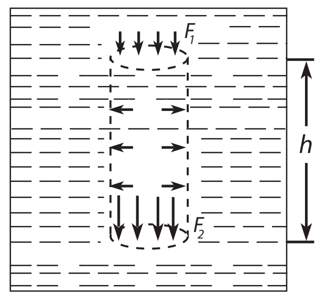


Fig. 76

Según el principio de Pascal, la presión sobre superficies de diversa orientación, pero situadas a una misma profundidad, es la misma. Esto significa, que la diferencia de presiones en dos puntos del líquido, situados uno sobre otro a la altura h, es igual al peso de una columna de líquido de sección igual a la unidad y la altura h:

$$p_2 - p_1 = \rho gh.$$

La presión del agua debida a su gravedad, se llama hidrostática.

Frecuentemente, en las condiciones terrestres, sobre la superficie libre del líquido presiona el aire. La presión del aire se llama atmosférica. La presión en la profundidad de un líquido, se compone de la presión atmosférica y de la hidrostática.

Para calcular la fuerza de la presión del agua, sólo hay que saber la medida de la superficie sobre la que presiona y la altura de la columna de líquido sobre ella. Todo lo demás, en virtud del principio de Pascal, no juega ningún papel.

Esto puede parecer muy raro. ¿Es posible que sean iguales las fuerzas que actúan sobre fondos iguales (Fig. 77) de los dos recipientes representados? Hay que tener presente que en el de la izquierda hay mucho más agua. A pesar de esto, las fuerzas que actúan sobre los fondos son, en ambos casos, iguales a ρghS. Esto es más que el peso del agua en el recipiente de la derecha y menos que el peso del agua del recipiente de la izquierda. En el recipiente de la izquierda, las paredes aguantan el peso del agua «que sobra», y en el de la derecha, por el contrario, agregan al peso del agua la fuerza de reacción. A veces, a esta interesante circunstancia la denominan paradoja hidrostática.

Si dos recipientes de diferente forma, pero con un mismo nivel de agua, se unen con un tubo, el agua no pasa de un recipiente a otro. Este paso podría ocurrir, en el caso en que las presiones en los recipientes fuesen diferentes. Pero esto no es así; en los vasos comunicantes, el líquido siempre estará a un mismo nivel, independientemente de sus formas.

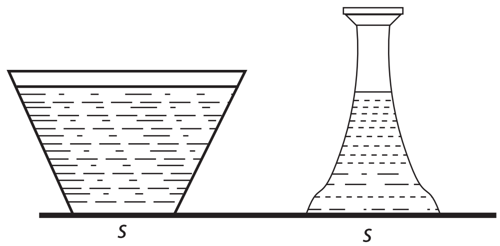


Fig. 77

Por el contrario, si son diferentes los niveles de agua en los vasos comunicantes, el agua comienza a desplazarse y los niveles se igualan.

La presión del agua es mucho mayor que la del aire. A la profundidad de 10 m el agua presiona sobre 1 cm^2 con una fuerza de 1 kgf, por encima de la presión atmosférica. A la profundidad de 1 km, con una fuerza de 100 kgf, sobre 1 cm^2.

En algunos lugares, el océano tiene una profundidad de más de 10 km. Las fuerzas de presión del agua en estas profundidades son enormes. Un trozo de madera sumergido a la profundidad de 5 km, se comprime de tal modo, a causa de esta presión colosal, que después de tal «bautizo», se hunde en una barrica de agua como un ladrillo.

Esta enorme presión crea muchas dificultades a quienes estudian la vida del mar. Los descensos a grandes profundidades se efectúan en globos de acero, llamados batisferas con los que se aguantan presiones de más de 1 tonelada sobre 1 cm^2.

Los submarinos pueden sumergirse solamente a una profundidad de $100 - 200$ m.

La presión de la atmósfera

Nosotros vivimos en el fondo de un océano de aire, llamado atmósfera. Cualquier cuerpo, cualquier granito de arena, todo objeto situado en la Tierra está sometido a la presión del aire.

La presión atmosférica no es tan pequeña. Sobre cada centímetro cuadrado de la superficie de un cuerpo actúa una fuerza de cerca de 1 kgf.

La causa de la presión atmosférica es evidente. El aire, así como el agua, tiene peso y, por consiguiente, efectúa una presión igual (así como para el agua) al peso de la columna de aire situada sobre el cuerpo. Cuanto a más altura subamos en un monte, tanto menos aire habrá sobre nosotros y, por lo tanto, tanto menor será la presión atmosférica.

Para la vida y para la ciencia es necesario saber medir la presión. Para esto sirven unos aparatos especiales llamados barómetros.

No es difícil construir un barómetro. En un tubo cerrado por un extremo, se echa mercurio. Tapando el extremo abierto con el dedo, se invierte el tubo y se introduce por el extremo abierto en una vasija con mercurio. Claro, el mercurio del tubo descenderá, pero éste no se vacía. No hay duda de que no hay aire en el espacio situado por encima del mercurio. El mercurio se mantiene en el tubo gracias a la presión del aire exterior (Fig. 78).

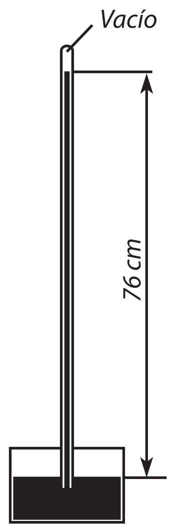


Fig. 78

El mercurio siempre se eleva a la misma altura, a 76 *cm*, aproximadamente, sean cuales fueren las dimensiones de la vasija con mercurio y el diámetro del tubo.

Si se toma un tubo menor de 76 *cm*, éste se llenará de mercurio y no veremos el vacío. La columna de mercurio de 76 *cm* de altura presiona sobre la base con la misma fuerza que la atmósfera.

Una columna de mercurio de 76 *cm* de altura sobre una superficie de 1 cm^2 pesa cerca de un kilogramo, o más exactamente, 1.033 kgf. Este número es el volumen de mercurio de 1×76 cm^3, multiplicado por su densidad, que es 13.6. Un kilogramo por un centímetro cuadrado es, precisamente, el valor de la presión atmosférica.

El número 76 *cm* significa que con esta columna de mercurio se equilibra una columna de aire de toda la atmósfera, situada sobre la misma superficie.

Calculando la medida de la superficie terrestre por la fórmula $4\pi R^2$, hallamos que el peso de toda la atmósfera se expresa por un número grandísimo, $5 \cdot 10^{18}$ kgf.

Al tubo del barómetro se le puede dar cualquier forma; lo principal es que uno de los extremos esté cerrado de tal modo, que sobre la superficie del mercurio dentro del tubo no haya aire. Sobre el otro nivel del mercurio actúa la presión de la atmósfera.

Con el barómetro de mercurio se puede medir la presión atmosférica con mucha exactitud. Claro que no es obligatorio tomar mercurio, se puede emplear cualquier otro líquido. Pero él mercurio es el líquido más pesado y la altura de la columna de mercurio, siendo normal la presión, es la mínima.

Para medir las presiones se usan diferentes unidades. A veces se indica, simplemente, la altura de la columna de mercurio en milímetros. Por ejemplo, se suele decir: hoy la presión es mayor que la normal, es igual a 768 mm Hg (o sea, de mercurio).

Sabiendo la densidad del mercurio, siempre se puede hacer el cálculo de la presión en $\dfrac{kgf}{cm^2}$. Cada milímetro de la columna de mercurio equivale a 1.36 $\dfrac{gf}{cm^2}$.

La presión de 760 $mm\ Hg$, se llama atmósfera física. La presión de 1 $\dfrac{kgf}{cm^2}$, se llama atmósfera técnica.

Los físicos frecuentemente utilizan también la unidad de presión llamada bar. 1 bar $= 106\ \dfrac{dinas}{cm^2}$. Como 1 $gf = 981\ dinas$, resulta que 1 bar es, aproximadamente, igual a una atmósfera. Más exactamente, la presión normal atmosférica es, aproximadamente, igual a 1013 $milibars$.

El barómetro de mercurio no es un aparato muy cómodo. No es conveniente dejar abierta la superficie del mercurio (los vapores de mercurio son venenosos), además, el aparato no es portátil.

Los barómetros metálicos (o sea, vacíos) carecen de estos defectos.

Todos habrán visto tal barómetro. Representa una pequeña caja metálica redonda con una graduación y una aguja indicadora. En la escala van marcadas las magnitudes de la presión, generalmente en centímetros de la columna de mercurio.

De la caja metálica se ha extraído el aire. La tapa de la caja está sujeta por un resorte muy fuerte, ya que, en caso contrario, está aplastada por la presión atmosférica. Al cambiar la presión, la tapa, bien se contrae, bien se estría. Ésta va unida con una aguja, de modo que, al contraerse, la aguja va hacia la derecha.

Este barómetro se gradúa comparándolo con las indicaciones del de mercurio.

También se basa en la presión atmosférica un aparato muy sencillo, llamado sifón.

El chofer de un automóvil quiere ayudar a su compañero, a quien se le ha acabado la gasolina. ¿Cómo trasvasar la gasolina del depósito de su automóvil? ¿No habrá que inclinarlo como una tetera?

Un tubo de goma nos saca del apuro. Uno de sus extremos se introduce en el depósito y por el otro extremo se extrae el aire con la boca. Después, rápidamente se tapa con el dedo el extremo abierto y se establece a una altura menor que la del depósito. Ahora se puede quitar el dedo, la gasolina se irá vertiendo sola de la manga improvisada (Fig. 79).

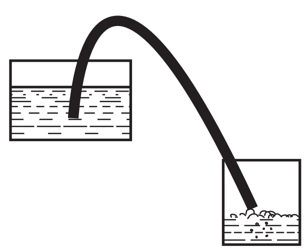


Fig. 79

El tubo doblado de goma es un sifón. La causa del movimiento del líquido es la misma que en el caso de un tubo recto inclinado. En ambos casos, el líquido, al fin y al cabo, corre hacia abajo.

Para la acción del sifón es necesaria la presión atmosférica: ésta «empuja» al líquido y evita que se rompa la columna de líquido en el tubo. Si no hubiese presión atmosférica, la columna se rompería en el punto de encorvación y el líquido se vertería en ambos recipientes.

El sifón comienza su trabajo cuando el líquido de la rama derecha (la que «vierte») desciende más abajo del nivel del líquido que se trasvasa, en el que se ha colocado el extremo izquierdo del tubo. En caso contrario, el líquido fluirá de vuelta.

Cómo se conoció la presión atmosférica

Ya las civilizaciones antiguas conocían las bombas aspirantes. Sirviéndose de ellas, levantaban el agua a alturas considerables. El agua, asombrosamente obediente, era conducida por el émbolo de tal bomba.

Los filósofos de la antigüedad, pensando sobre las causas de esto, llegaban a la conclusión ingeniosa de que el agua va detrás del émbolo, porque la naturaleza tiene miedo al vacío, y que, por eso, entre el émbolo y el agua no queda espacio libre.

Cuentan que un artesano construyó una bomba aspirante para los jardines del duque de Toscana en Florencia y que el émbolo tenía que levantar el agua a una altura de más de 10 m. Pero, por mucho que se esforzaban en absorber con esta bomba el agua, no resultó nada. Hasta los 10 m, el agua iba tras el émbolo, después el émbolo se separaba del agua y se formaba el mismo vacío que la naturaleza temía.

Cuando se dirigieron a Galileo a explicar las causas del fracaso, éste respondió que la naturaleza, verdaderamente, no tolera el vacío, pero hasta cierto límite. Probablemente, Torricelli, discípulo de Galileo, utilizó este caso como motivo para efectuar en el año 1643 su célebre experimento con el tubo lleno de mercurio. Este experimento ya lo hemos descrito, consiste en la construcción del barómetro de mercurio.

Tomando un tubo de más de 76 cm, Torricelli formó el vacío sobre el mercurio (a veces, en su honor, lo llaman el vacío de Torricelli) y de este modo demostró la existencia de la presión atmosférica.

Con este experimento, Torricelli resolvió las dudas del artesano del duque de Toscana. En efecto, es claro que el agua irá, obedientemente, detrás del émbolo de la bomba aspirante a lo largo de unos cuantos metros. Este movimiento continuará hasta que la columna de agua de 1 cm^2 de sección alcance el peso de 1 kgf. Esta columna de agua tendrá una altura de 10 m. Por esto, es por lo que la naturaleza tiene miedo al vacío..., pero no más que hasta 10 m.

En el año 1654, después de 11 años del descubrimiento de Torricelli, el burgomaestre de Magdeburgo, Otto van Herik, mostró palpablemente la acción de la presión atmosférica. El autor se hizo célebre, no tanto por la esencia física del experimento, como por la teatralidad con que lo expuso.

Dos hemisferios de cobre fueron unidos por un aro intermedio. Del globo formado se extrajo el aire mediante una válvula instalada en uno de los hemisferios, después de lo cual, resultaba imposible separar los hemisferios. Se ha conservado la descripción detallada del experimento de Herik. Ahora se puede calcular la presión de la atmósfera sobre los hemisferios; siendo el diámetro del globo de 37 cm, la fuerza era igual a cuatro toneladas, aproximadamente. Para separar los hemisferios, Herik ordenó arrear dos troncos de ocho sendos caballos. Tras el atelaje iban las cuerdas, atadas a los aros que estaban sujetos en los hemisferios. Resultó que los caballos no tuvieron fuerza para separar los hemisferios.

La fuerza de ocho caballos (precisamente de ocho y no de dieciséis, ya que los otros ocho fueron arreados para mayor efecto, pues podían haber sido sustituidos por un gancho clavado en la pared, manteniendo la misma fuerza que actuaba sobre el hemisferio) fue insuficiente para romper los hemisferios de Magdeburgo.

Si entre dos cuerpos contiguos hay un vacío, éstos no se pueden separar, debido a la presión atmosférica.

La presión atmosférica y el tiempo

La oscilación de la presión debida al tiempo, tiene un carácter muy irregular. Antes se creía que el tiempo se determinaba sólo por la presión. Por eso, hasta hoy día, en los barómetros ponen las indicaciones: claro, seco, lluvia, tempestad. Se encuentra incluso la indicación: «terremoto».

El cambio de presión, verdaderamente, juega un gran papel en el cambio del tiempo. Pero este papel no es decisivo. La presión media o normal sobre el nivel del mar, es igual a 1013 mili*bars*. Las oscilaciones de la presión son relativamente pequeñas. Raramente desciende la presión de $935 - 940$ mili*bars* y se eleva hasta $1055 - 1060$.

La presión más baja se observó el 18 de agosto de 1927, en el mar de la China, que fue de 885 mili*bars*. La más alta, de cerca de 1080 mili*bars*, se observó el 23 de enero de 1900 en Siberia, en la estación de Barnaul (todas las cifras se han tomado con respecto al nivel del mar).

En la Fig. 80 está representado un mapa que usan los meteorólogos para analizar los cambios del tiempo. Las líneas trazadas en el mapa se llaman isobaras. En cada una de estas líneas la presión es la misma (su magnitud está indicada con un número). Observemos los lugares de menor y de mayor presión, las «cumbres» y «depresiones» de la presión.

La dirección y la fuerza del viento están ligadas con la presión atmosférica.

La presión no es la misma en diferentes lugares de la superficie terrestre y la presión más alta «empuja» al aire hacia los lugares de menor presión. Se podría pensar que el viento tenía que soplar en dirección perpendicular a las *isobaras*, o sea, hacia allí donde la presión disminuye con mayor rapidez. Sin embargo, el mapa de los vientos muestra otra cosa. En los asuntos de la presión del aire se inmiscuye la fuerza de Coriolis, que introduce una corrección bastante considerable.

Como sabemos, sobre cualquier cuerpo que se mueve en el hemisferio norte actúa la fuerza de Coriolis, dirigida hacia la derecha del movimiento. Esto también se refiere a las partículas del aire. Expulsada de los lugares de mayor presión hacia los lugares donde la presión es menor, la partícula tendría que moverse transversalmente a las isobaras, pero la fuerza de Coriolis la desvía hacia la derecha, y la dirección del viento forma con la isobara un ángulo, aproximadamente, de 45^o.

Es asombroso el gran efecto de esta fuerza tan pequeña. La explicación está en que los obstáculos a la acción de la fuerza de Coriolis, el frotamiento de las capas del aire, son insignificantes.

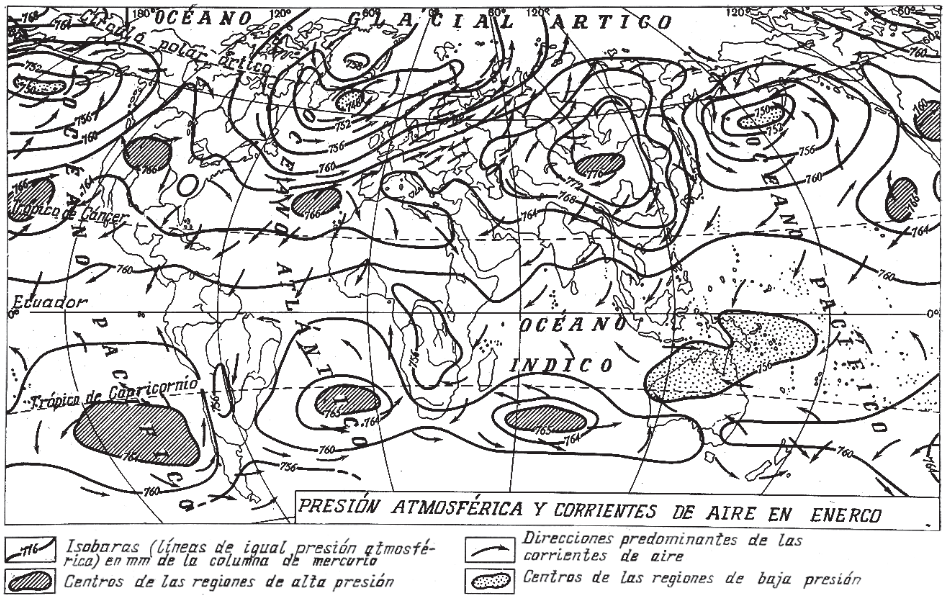


Fig. 80

Es todavía más interesante la influencia de la fuerza de Coriolis en la dirección de los vientos en las «cumbres» y en los «hoyos» de la presión. El aire, debido a la acción de la fuerza de Coriolis, al separarse de las «cumbres» de presión, no fluye en todas las direcciones por los radios, sino que se mueve en espiral. Estas corrientes de aire en espiral giran hacia un mismo lado y crean un torbellino circular en las regiones de alta presión, trasladando las masas de aire en sentido de las agujas de un reloj. La Fig. 28 (véase la pág. 54) muestra claramente cómo el movimiento radial se convierte en espiral a causa de la acción de una fuerza de desviación constante.

Lo mismo ocurre con las regiones de baja presión. Si no hubiese la fuerza de Coriolis, el aire fluiría hacia esta región, uniformemente por todos los radios. Sin embargo, por el camino, las masas de aire se desvían hacia la derecha. En este caso, como se ve claro en el dibujo, se forma un torbellino circular que mueve el aire en sentido contrario al de las agujas de un reloj.

Los vientos en las regiones de baja presión se llaman ciclones; los vientos en las regiones de alta presión, anticiclones.

No hay que creer que todo ciclón significa un huracán o una tempestad. El paso de los ciclones y de los anticiclones por la ciudad donde vivimos, es un fenómeno ordinario, claro que, ligado, en gran parte, con la alteración del tiempo. En muchos casos, la aproximación de un ciclón significa la llegada del mal tiempo, y la aproximación de un anticiclón, la llegada del buen tiempo.

Desde luego, no vamos a convertirnos en pronosticadores del tiempo.

La ley de Arquímedes

Colguemos una pesa de una romana. El resorte se estirará e indicará su peso. Sin quitar la pesa, sumerjamos la romana en el agua. ¿Han cambiado las indicaciones de la romana? Sí, parece como si el peso del cuerpo hubiese disminuido. Si se hace el experimento con una pesa de hierro de un kilogramo, la «disminución» del peso será, aproximadamente, de gramos.

¿Qué es lo que ha ocurrido? Pues, es claro, que no se pudo alterar ni la masa del grave, ni la atracción de la Tierra. La causa de la pérdida de peso puede ser solamente una: sobre el cuerpo sumergido en el agua actúa hacia arriba una fuerza de 140 gf. ¿De dónde aparece esta fuerza de empuje, descubierta por el célebre sabio de la Antigüedad, Arquímedes? Antes de examinar un cuerpo sólido en el agua, veamos «el agua en el agua». Figurémonos que se ha elegido un volumen de agua. Este volumen tiene peso, pero no cae al fondo. ¿Por qué? La respuesta es clara: a esto se opone la presión hidrostática del agua que le rodea. Esto significa que la resultante de esta presión en el volumen considerado es igual al peso del agua y está dirigida verticalmente hacia arriba.

Está claro que si ahora, este mismo volumen se ocupa con un cuerpo sólido, la presión hidrostática se mantiene igual.

Así pues, sobre un cuerpo, sumergido en un líquido, como resultado de la presión hidrostática, actúa una fuerza que va dirigida verticalmente hacia arriba y cuya magnitud es igual al agua que desaloja el cuerpo. Éste es el principio de Arquímedes.

Cuentan que Arquímedes estaba tomando un baño, pensando el modo de averiguar si había mezcla de plata en una corona de oro, o no. Al tomar el baño, la persona siente palpablemente la fuerza de empuje. La ley fue descubierta inesperadamente por Arquímedes, ésta se presentó de la forma más simple. Con el grito de «Eureka» (que quiere decir «hallé»), Arquímedes salió del baño y fue corriendo a la habitación por la preciosa corona, para determinar inmediatamente la pérdida de su peso en el agua.

La pérdida de peso de un cuerpo en el agua, expresada en gramos, es igual al peso del agua desalojada por él. Sabiendo el peso del agua, inmediatamente se halla su volumen, que es igual al volumen de la corona. Conociendo el peso de la corona, se puede hallar, rápidamente, la densidad del material del que está hecha y, sabiendo la densidad del oro y de la plata, se puede hallar el porcentaje de la mezcla.

Es natural que el principio de Arquímedes es justo para cualquier líquido. Si en un líquido de densidad ρ se ha sumergido un cuerpo de volumen V, el peso del líquido desalojado, que precisamente es la fuerza de empuje, será igual a $\rho g V$.

La acción de muchos aparatos simples que controlan las propiedades de los productos líquidos, está basada en el principio de Arquímedes. Si se mezcla alcohol o leche con agua, su densidad se altera, y por esta densidad se puede juzgar sobre su composición. Esta medición se efectúa simple y rápidamente con el areómetro (Fig. 81). Al introducirlo en el líquido, el areómetro se sumerge a mayor o menor profundidad, en dependencia de la densidad.

El areómetro se mantiene en equilibrio cuando la fuerza de Arquímedes se hace igual a su peso.

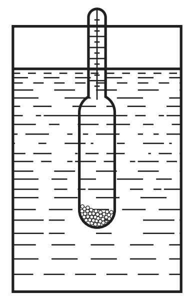


Fig. 81

En el areómetro hay marcadas unas divisiones, y la densidad del líquido se indica por la graduación que corresponde al nivel del líquido. Los areómetros se emplean para controlar el alcohol, para controlar la leche: el pesa–leches.

La densidad media del cuerpo del hombre es un poco mayor que la unidad. Quien no sabe nadar, se hunde en agua dulce. La densidad del agua salada es mayor que la unidad. En la mayoría de los mares, la salinidad del agua es insignificante y la densidad del agua, aunque es mayor que la unidad, sin embargo, es menor que la densidad media del cuerpo humano. La densidad del agua en el golfo de Kara–Bogas–Gol, en el mar Caspio, es igual a 1.18. Esto es más que la densidad media del cuerpo humano. En este golfo es imposible hundirse. Se puede tumbar uno en el agua y leer un libro.

El hielo flota en el agua. La preposición «en», no es aquí oportuna. La densidad del hielo es, aproximadamente, el 10 % menor que la del agua; por eso, del principio de Arquímedes, se deduce, que el trozo de hielo está sumergido en el agua, aproximadamente, en 0.9 de su volumen. Precisamente por esto es muy peligroso el encuentro de los barcos de mar con los icebergs.

Una balanza de palanca puede estar en equilibrio en el aire, mas esto no significa que ella se mantiene también en equilibrio en el vacío. El principio de Arquímedes se refiere al aire del mismo modo que al agua. En el aire, sobre el cuerpo actúa una fuerza de empuje, que es equivalente al peso de un volumen de aire igual al volumen del cuerpo. El cuerpo «pesa» menos en el aire que en el vacío. Cuanto mayor sea el volumen, tanto mayor será la pérdida de peso. Una tonelada de madera pierde más peso que una tonelada de plomo. A la pregunta, en broma, de cuál es más ligero, se da la siguiente respuesta: una tonelada de plomo es más pesada que una tonelada de madera, si se pesan en el aire.

Mientras se trata de cuerpos pequeños, la pérdida de peso en el aire no es grande. Sin embargo, pesando un trozo de las dimensiones de una habitación, «perderíamos» unas cuantas decenas de kilogramos. En las mediciones exactas de peso se tiene que contar la corrección en la pérdida de peso en el aire.

La fuerza de Arquímedes en el aire ofrece la posibilidad de construir globos, aeróstatos y dirigibles de diversas formas. Para esto hay que disponer de un gas que sea más ligero que el aire.

Si se llena de hidrógeno un globo de 1 m^3 de volumen, cuyo peso es de 0.09 kgf, la fuerza ascensional –que es la diferencia de la fuerza de Arquímedes y del peso del gas–, será igual a:

$$1.29\ kgf\ - 0.09\ kgf\ = 1.20\ kgf;$$

la densidad del aire es 1.29 $\dfrac{kg}{m^3}$.

Por lo tanto, a este globo se le puede colocar cerca de un kilogramo de carga, y esto no representa una molestia para volar por encima de las nubes.

Está claro que con volúmenes no muy grandes, de unos cuantos cientos de metros cúbicos, los globos de hidrógeno son capaces de levantar al aire una carga considerable.

Un defecto serio de los aeróstatos de hidrógeno es que el hidrógeno es inflamable. Éste forma con el aire una mezcla explosiva. En la historia de la creación de aeróstatos se han señalado casos trágicos.

Por esto, cuando se descubrió el helio, empezaron a llenar los globos con él. El helio es dos veces más pesado que el hidrógeno y el empuje ascendente de un globo lleno de este gas es menor. Sin embargo, ¿es esencial esta diferencia?

La fuerza ascensional de un globo de 1 m^3, lleno de helio, es igual a la diferencia: 1.29 kgf −0.18 kgf = 1.11 kgf. La fuerza ascensional ha disminuido solamente en un 8 %. Por otra parte, las cualidades del helio son evidentes.

El aeróstato fue el primer aparato con el que los hombres se elevaron de la tierra. Hasta ahora se emplean los aeróstatos con una góndola cerrada herméticamente, para las investigaciones de las capas superiores de la atmósfera. Éstos se llaman estratóstatos. Los estratóstatos se levantan hasta una altura de más de 20 km.

Actualmente tienen mucho empleo los globos provistos de diversos aparatos para mediciones, los cuales informan por radio sobre los resultados obtenidos (Fig. 82). Estas radiosondas llevan consigo una radioemisora con pilas, que con señales convencionales da informaciones sobre la humedad, temperatura y presión de la atmósfera en diferentes alturas.

Se puede mandar a navegar muy lejos un aeróstato sin guía y determinar con bastante exactitud el sitio de aterrizaje. Para esto, hace falta que el aeróstato se eleve a mucha altura, de unos 20−30 km. En estas alturas las corrientes de aire son muy estables, y, previamente, se puede calcular la ruta del aeróstato con bastante exactitud.

Si es necesario, se puede cambiar automáticamente la fuerza ascensional del aeróstato, soltando el gas o arrojando el lastre.

Antes, para volar por el aire, se empleaban unos aeróstatos en los que iba instalado un motor con una hélice. A estos aeróstatos, llamados dirigibles, les daban una forma aerodinámica. Los dirigibles no pudieron competir con los aviones; comparándolos, incluso con los aviones de 30 años atrás, resultan muy voluminosos, incómodos de dirigir, se mueven lentamente y tienen «un techo muy bajo».

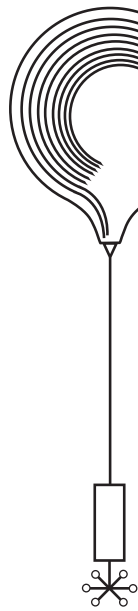


Fig. 82

Presión de millones de atmósferas

Diariamente nos encontramos con grandes presiones sobre superficies pequeñas. Veamos, por ejemplo, cuál es la presión que se ejerce sobre el extremo de una aguja. Supongamos que el extremo de la aguja o del clavo tiene una medida lineal de 0.1 mm. Esto significa que el área de la punta es igual a 0.0001 cm^2. Pero, si se actúa sobre este clavito con una fuerza no muy grande, de 10 kgf, el extremo del clavo ejercerá una presión de 100 000 atmósferas. No tiene nada de extraordinario que los objetos puntiagudos se introduzcan tan fácilmente en los cuerpos sólidos.

De este ejemplo se deduce que la creación de grandes presiones sobre pequeñas superficies es una cosa muy ordinaria. Otra cosa es, si se trata de crear presiones altas sobre superficies grandes.

Las presiones altas se crean en los laboratorios con ayuda de prensas potentes, como la hidráulica (Fig. 83). El esfuerzo de la prensa se transmite por un émbolo de poca superficie, éste se introduce en un depósito, dentro del cual se desea crear alta presión.

De este modo, sin gran trabajo, se pueden crear presiones de unos cuantos miles de atmósferas. Para obtener presiones superaltas, el experimento se tiene que complicar, ya que el material del depósito no aguanta tales presiones.

Aquí, la naturaleza viene a nuestro encuentro. Resulta que, a presiones de cerca de 20 000 atmósferas, los metales se endurecen considerablemente. Por eso, el aparato para la obtención de presiones superaltas lo sumergen en un líquido que está bajo una presión de alrededor de 30 000 atmósferas. En este caso, en el depósito interior, se consigue crear (otra vez con el émbolo) una presión de unos cuantos cientos de miles de atmósferas. La presión más alta, de 400 000 atmósferas, fue obtenida por el físico americano Bridsmen.

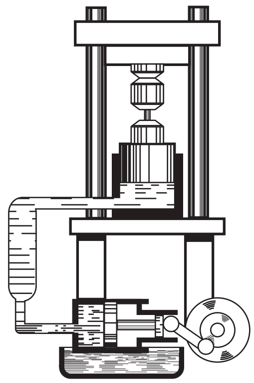


Fig. 83

No es vano el interés de la obtención de presiones superaltas. A tales presiones pueden ocurrir fenómenos que no se pueden producir de otro modo. En el año 1955 se obtuvieron diamantes artificiales. Para esto, se necesitó una presión de 100 000 atmósferas y, además, una temperatura de 2300 ^oC.

Las presiones de cerca de 300 000 atmósferas sobre grandes superficies, se crean con las explosiones de cuerpos sólidos y líquidos explosivos, como la nitroglicerina, la trilita y otros.

Durante la explosión de la bomba atómica, dentro de ella se crean presiones incomparablemente más altas, que alcanzan hasta 10^{13} atmósferas. La presión durante la explosión dura muy poco tiempo. Dentro de los cuerpos celestes, incluyendo, naturalmente, la Tierra, hay constantemente altas presiones. La presión en el centro de la Tierra es, aproximadamente, de 3 millones de atmósferas.

Fuerzas superficiales

¿Se puede salir seco del agua? Claro, pero para eso hay que untarse con alguna substancia que no se moje en el agua.

Froten el dedo con parafina y sumérjanlo en el agua. Cuando lo saquen, resultará que en el dedo no habrá agua, a lo sumo dos o tres gotas. Hagan un pequeño movimiento y las gotas se caerán.

En este caso se dice que el agua no moja a la parafina. El mercurio se comporta de este modo con casi todos los cuerpos sólidos: no moja a la piel, al cristal, a la madera...

El agua es más caprichosa. Ésta se aproxima mucho a unos cuerpos y procura no tener contacto con otros. El agua no moja las superficies grasientas, pero moja bien el cristal limpio. El agua moja la madera, el papel, la lana.

Si se echa una gota de agua sobre un cristal limpio, ésta se derrama y forma un charquito muy fino. Si esta gota se echa sobre parafina, debido a la fuerza de gravedad, se forma una gota de forma casi esférica, un poco aplastada.

Entre las substancias que «se pegan» a casi todos los cuerpos forma parte el petróleo de lámpara. Propenso a derramarse por el cristal o por el metal, el petróleo de lámpara es capaz de escaparse de un depósito mal cerrado. Un charquito de petróleo de lámpara que se ha derramado puede envenenar la existencia durante mucho tiempo; el petróleo abarcará una superficie muy grande, se introducirá por las rendijas, penetrará en la ropa. Por eso es tan difícil librarse de su olor desagradable.

La inmojabilidad de los cuerpos puede dar lugar a fenómenos curiosos. Tomen una aguja, engrásenla y, con cuidado, colóquenla de plano en el agua. La aguja no se hunde. Mirando atentamente, se puede observar que la aguja encorva un poco el agua y se mantiene horizontal tranquilamente en la depresión formada. Sin embargo, es suficiente un ligero empuje para que la aguja vaya al fondo. Para esto hace falta que una parte considerable de ella se encuentre en el agua.

Esta interesante propiedad la emplean los insectos acuáticos que corren ligeramente por el agua sin mojarse las patas.

La mojabilidad se emplea en el método de enriquecimiento de los minerales por flotación. La esencia de este fenómeno consiste en lo siguiente. El mineral, finamente desmenuzado, se echa en una cuba con agua, se agrega una pequeña cantidad de un aceite especial, que tiene que poseer la propiedad de mojar los granitos del mineral útil y de no mojar los granitos del «mineral vacío» o «ganga» (así se llama la parte despreciable del mineral). Al hacer la mezcla, los granitos del mineral útil se cubren de una capa fina de aceite.

En la mezcla de mineral, agua y aceite, se hace pasar una corriente de aire, formándose una multitud de diminutas burbujas de aire que forman la espuma. Las burbujas de aire flotan. El proceso de flotación está basado en el hecho de que los granitos cubiertos de aceite se enganchan a las burbujas de aire. La burbuja grande eleva consigo al granito como un globo.

El mineral útil pasa a la espuma de la superficie, mientras que el mineral vacío se queda en el fondo. La espuma se quita y se lleva para un tratamiento sucesivo de obtención del llamado «concentrado», cuya parte de mineral vacío es decenas de veces menor.

Las fuerzas de adhesión de las superficies son capaces de perturbar el nivel de los líquidos en los vasos comunicantes. Es muy fácil comprobar esto.

Si se sumerge en el agua un tubo fino de vidrio (de una parte de milímetro de diámetro), en contraposición con la ley de los vasos comunicantes, el agua comenzará a elevarse rápidamente y se establecerá un nivel bastante más alto que en la vasija amplia (Fig. 84).

¿Qué es lo que ha ocurrido? ¿Qué fuerzas sujetan, a la columna de líquido elevada? El ascenso se ha efectuado a causa de las fuerzas de adhesión del agua con el vidrio.

Las fuerzas de adhesión superficial se manifiestan claramente sólo cuando el líquido se eleva en tubos suficientemente finos. Cuanto más fino sea el tubo, a tanta mayor altura se elevará el líquido y tanto más visible será el fenómeno. La denominación de estos fenómenos superficiales se debe a la denominación de los tubos. El canal de uno de estos tubos tiene un diámetro que se mide en partes de milímetro; tal tubo se llama capilar (que quiere decir «fino como un pelo»). El fenómeno de elevación del líquido en los tubos finos se llama capilaridad.

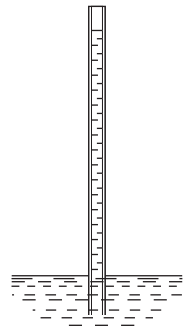


Fig. 84

¿A qué altura son capaces de elevar el líquido los tubos capilares? Resulta, que en un tubo de 1 *mm* de diámetro, el agua se eleva a altura de 1.5 *mm*. Si el diámetro es de 0.01 *mm*, la altura de ascensión crece en tantas veces, en cuantas ha disminuido el diámetro del tubo, o sea, hasta 15 *cm*.

Naturalmente que la ascensión del líquido es posible solamente en condiciones de mojabilidad. No es difícil darse cuenta de que el mercurio no asciende en los tubos de vidrio, sino que, por el contrario, desciende. El mercurio no «aguanta» el contacto con el vidrio y tiende a reducir la superficie total hasta el mínimo que permite la fuerza la gravedad.

Existe una multitud de cuerpos que representan algo parecido a un sistema de tubos finísimos. En estos cuerpos siempre se observan los fenómenos capilares.

Las plantas y los árboles tienen todo un sistema de largos canales y poros. Los diámetros de estos canales son menores de centésimas de milímetro. Gracias a esto, las fuerzas capilares levantan la humedad del suelo a una altura considerable y distribuyen el agua por el cuerpo de la planta.

El papel secante es una cosa muy cómoda. Hemos hecho un borrón y tenemos que pasar la página. ¡No vamos a esperar hasta que se seque el borrón! Tomamos una hojita de papel secante, sumergimos su extremo en la gota y la tinta corre ligeramente hacia arriba, en contra de la fuerza de gravedad.

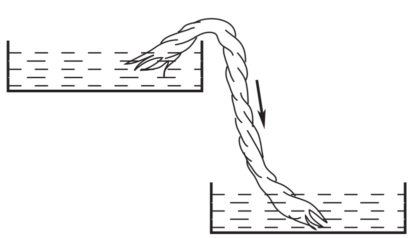


Fig. 85

Se efectúa un fenómeno capilar típico. Examinando el papel secante por el microscopio, se puede ver su estructura. Este papel se compone de una red no muy densa de fibras de papel, que forman unas con otras unos canales finos y largos. Estos canales desempeñan el papel de tubos capilares.

En la mecha de un quinqué también hay un sistema de poros largos o canales formados por las fibras. Por la mecha se eleva el petróleo. Con una mecha se puede crear también un sifón, introduciendo un extremo de la mecha en un vaso de agua, no muy lleno, de modo que el otro extremo, suspendido del borde, se encuentre más bajo que el primero (Fig. 85).

También en la tecnología de la tintorería se emplea con frecuencia la capacidad de las telas de atraer el líquido por los finos canales que forman sus hilos.

IX. Los ladrillos del universo

Elementos

¿De qué se compone el mundo que nos rodea? Las primeras respuestas a esta pregunta que han llegado hasta nosotros, nacieron en la Grecia Antigua más de 25 siglos atrás.

A primera vista, las respuestas de Tales de Mileto, que afirmaba que todo se componía de agua; de Anaxímenes, que decía que el mundo se había constituido del aire; o de Heráclito, según el cual, todo se componía de fuego, parecen demasiado extrañas y tendríamos que gastar mucho papel en explicar al lector cuál era la lógica de los sabios de la Antigüedad.

Lo absurdo de semejantes explicaciones obligó a los posteriores griegos «amantes de la sabiduría» (así se traduce la palabra «filósofo»), a aumentar el número de bases primarias, o como decían en el mundo antiguo, de elementos. Empédocles afirmaba que había cuatro elementos: la tierra, el aire, el agua y el fuego. Aristóteles hizo correcciones terminantes (que dominaron mucho tiempo) en esta doctrina.

Según él, todos los cuerpos se componían de una misma substancia, pero ésta podía poseer diversas propiedades. Estos elementos–propiedades no substanciales eran cuatro: el frío, el calor, la humedad y la esterilidad.

Uniéndose dos a dos y siendo atribuidos a la substancia, los elementos–propiedades de Aristóteles formaban los elementos de Empédocles. Así, la substancia seca y fría proporcionaba la tierra; la seca y caliente, el fuego; la húmeda y fría, el agua y, por fin, la húmeda y caliente, el aire.

En vista de que era difícil contestar a una serie de preguntas, los filósofos de la Antigüedad añadieron a los cuatro elementos–propiedades la «divina quinta esencia». Esto es algo así como un Dios–cocinero que cuece conjuntamente los elementos–propiedades de diversa especie. Naturalmente que, alegando a Dios, era fácil dar explicación a cualquier duda.

Durante mucho tiempo, casi hasta el siglo XVIII, había pocos que se atrevían a dudar y hacer preguntas. La doctrina de Aristóteles fue reconocida por la iglesia y dudar de su justeza era herejía.

Sin embargo, surgían vacilaciones. Éstas las creó la alquimia.

En tiempos remotos, en cuyas profundidades podemos penetrar leyendo los manuscritos antiguos, el hombre sabía que todos los cuerpos que nos rodean eran capaces de convertirse en otros. La combustión, la calcinación, la fundición de los metales, todos estos fenómenos eran bien conocidos.

Parecía que esto no contradecía a la doctrina de Aristóteles. Con cualquier transformación cambiaba, como si dijéramos, «la dosis» de los elementos. Si todo el mundo se componía solamente de cuatro elementos, las posibilidades de transformación de los cuerpos tenían que ser muy grandes. Solamente había que hallar el secreto para lograr, que de cualquier cuerpo se pudiese obtener otro cualquiera.

¡Qué atrayente era el problema de hacer oro, o de hallar la singular y extraordinaria «piedra filosofal», a cuyo poseedor proporcionaría riqueza, poder y juventud eterna! La ciencia sobre la preparación del oro, de la piedra filosofal, la transformación de cualquier cuerpo en otro, los árabes antiguos la llamaron alquimia.

El trabajo de los hombres que se dedicaron a la resolución de este problema duró siglos. Los alquimistas no aprendieron a hacer oro, no hallaron la piedra filosofal, pero, sin embargo, acumularon muchos valiosos datos sobre la transformación de los cuerpos. Estos datos sirvieron, al fin y al cabo, de pena de muerte para los alquimistas. En el siglo XVII, para muchos quedó claro, que el número de las substancias principales, de los elementos, era incomparablemente mayor, que cuatro. El mercurio, el plomo, el azufre, el oro, el antimonio, resultaron ser substancias que no se descomponían; ya no se podía decir que estas substancias se componían de elementos. Hubo que, por el contrario, tomarlos como elementos del mundo.

En el año 1668, salió a la luz el libro de Roberto Boyle «El químico escéptico o las dudas y paradojas con respecto a los elementos de los alquimistas». Aquí encontramos una definición completamente nueva del elemento. Esto ya no es el elemento misterioso, inaccesible, de los alquimistas. Ahora, el elemento es una substancia, parte integrante del cuerpo.

Esto corresponde a la definición moderna del concepto de elemento.

La lista de los elementos de Boyle no era muy grande. A la lista verdadera agregó Boyle también el fuego. Las ideas sobre los elementos–propiedades se mantuvieron también después de él. Incluso en la lista del célebre sabio francés Lavoisier (1743 – 1794), que se le considera fundador de la química, junto con los elementos reales, figuran elementos sin peso: el fluido calórico y la substancia luminosa.

En la primera mitad del siglo XVIII se conocían 15 elementos y a fin de siglo su número aumentó hasta 35. Claro que, entre ellos, sólo había 23 reales, los demás eran elementos que no existían o que resultaron ser compuestos, como la sosa y la potasa cáusticas.

Para la mitad del siglo XIX, en los tratados de química ya se describían más de 50 substancias que no se descomponían.

La ley periódica del célebre químico ruso Mendeléev abrió nuevos horizontes para la investigación consciente de los elementos no descubiertos. Aquí es prematuro hablar de esta ley. Digamos solamente que Mendeléev, con su ley, determinó el modo de buscar los elementos todavía desconocidos.

A comienzos del siglo XX ya habían sido descubiertos casi todos los elementos que se encuentran en la naturaleza.

Los átomos

Cerca de 2000 años atrás, en la Roma de la antigüedad, se escribió un poema original. Su autor era el poeta romano Lucrecio Caro. El poema se llamaba «Sobre la naturaleza de las cosas».

En su obra poética, Lucrecio explicaba con versos muy sonoros las ideas sobre el mundo del filósofo griego de la Antigüedad, Demócrito.

¿Qué ideas eran éstas? Era la doctrina sobre las partículas pequeñitas, invisibles, de las que se componía el mundo. Observando diversos fenómenos, Demócrito procuraba dar su explicación.

He aquí, por ejemplo, el agua. Al calentarla mucho, ésta se convierte en un vapor invisible y se disipa. ¿Cómo se puede explicar esto? Claro que esta propiedad del agua está ligada con su constitución interna.

O bien, por ejemplo, ¿por qué percibimos a distancia los aromas de las flores?

Pensando sobre preguntas semejantes, Demócrito llegó a convencerse de que a nosotros sólo nos parece que los cuerpos son continuos, pero que en realidad, éstos se componen de partículas pequeñísimas. Las partículas de diversos cuerpos tienen distinta forma, pero éstas son tan pequeñas, que es imposible verlas. Por eso es por lo que cualquier cuerpo nos parece continuo.

A estas diminutas partículas, que son ya indivisibles, de las cuales se compone el agua y todos los demás cuerpos, Demócrito las llamó «átomos».

Las ideas admirables de los sabios griegos de la Antigüedad, nacidas 24 siglos atrás, fueran más tarde olvidadas durante mucho tiempo. Más de mil años reinó, sin rivalidad en el mundo de la sabiduría, la falsa doctrina de Aristóteles.

Afirmando que todas las substancias podían mutuamente convertirse en otras, Aristóteles negaba categóricamente la existencia de los átomos. Cualquier cuerpo se puede dividir indefinidamente, enseñaba Aristóteles.

En el año 1647, el sabio francés Pier Gasendi publicó un libro en el que resueltamente negaba la doctrina de Aristóteles y afirmaba que todas las substancias del mundo se componían de partículas indivisibles, de átomos. Los átomos se diferenciaban entre sí por su forma, magnitud y peso.

Apoyando la doctrina de los atomistas antiguos, Gasendi la desarrolló más. Explicaba cómo podían aparecer y cómo se creaban en el mundo millones de cuerpos de la naturaleza. Para esto, decía él, no es necesario una gran cantidad de átomos diversos. El átomo es lo mismo que el material de construcción de las casas. Con tres especies diversas de materiales, con ladrillos, tablas y vigas, se puede construir un gran número de casas diferentes. Del mismo modo la naturaleza, Con unas cuantas decenas de átomos diferentes podía crear miles de cuerpos de diversas especies. Además, en cada cuerpo, los átomos se unen en pequeños grupos; a estos grupos, Gasendi, los llamaba «moléculas», o sea, «masas pequeñas» (de la palabra latina «moles», que quiere decir masa).

Las moléculas de diversos cuerpos se distinguen unas de otras por el número y la especie («la calidad») de los átomos que la integran. Es fácil comprender que con unas cuantas decenas de átomos distintos se puede formar una gran cantidad de diversas combinaciones, dando, como resultado, las moléculas. Es por esto, por lo que es tan grande la variedad de cuerpos que nos rodean.

En muchas cosas, el punto de vista de Gasendi era erróneo. Así, éste suponía que existían átomos especiales para el calor, el frío, el gusto y el olor. Como todos los sabios de entonces, él no pudo librarse por completo de la influencia de Aristóteles y reconocía sus elementos irreales.

En las obras del célebre enciclopedista M. Lomonósov –fundador de la ciencia en Rusia–, se encuentran las siguientes ideas, que mucho más tarde se comprobaron en los experimentos.

Lomonósov escribía, que la molécula podía ser homogénea y heterogénea. En el primer caso, en la molécula se agrupaban átomos homogéneos. En el segundo, la molécula se componía de átomos que eran distintos unos de otros. Si un cuerpo estaba formado por moléculas homogéneas, había que suponer que era simple. Por el contrario, si el cuerpo estaba formado por moléculas constituidas de diferentes átomos, Lomonósov lo llamaba mixto.

Ahora ya sabemos bien que es, precisamente, ésta la composición de los diferentes cuerpos de la naturaleza. En efecto, tomemos, por ejemplo, el gas de oxígeno; cada molécula de éste contiene dos átomos iguales de oxígeno. Ésta es una molécula de una substancia simple. Si los átomos que forman las moléculas son distintos, resulta una unión «mixta», una unión química compuesta. Las moléculas de ésta se componen de los átomos de aquellos elementos químicos que forman parte de esta composición.

Se puede decir también de otro modo: toda substancia simple se compone de átomos de un mismo elemento químico; una substancia compuesta contiene átomos de dos y más elementos.

Una serie de sabios argumentaron lógicamente la existencia del átomo. Quien realmente introdujo en la ciencia el átomo y lo hizo objeto de investigación, fue el sabio inglés Dalton. Éste demostró que existen leyes químicas que se pueden explicar naturalmente empleando sólo los conocimientos del átomo.

Después de Dalton, los átomos se introdujeron resueltamente en la ciencia. Sin embargo, durante mucho tiempo hubo sabios que «no creían en los átomos». Ya a fines del siglo pasado uno de ellos escribía que, dentro de unas cuantas decenas de años, los átomos «se encontrarán solamente en el polvo de las bibliotecas».

Ahora, semejantes razonamientos causan risa. Ya conocemos ahora tantos detalles sobre la «vida» de los átomos, que dudar en su existencia es lo mismo que poner en duda la realidad del mar Negro.

Los pesos relativos de los átomos fueron determinados por los químicos. En primer lugar, por unidad de peso atómico se tomó el peso del átomo de hidrógeno. Resultó que, aproximadamente, el peso atómico del nitrógeno era igual a 14, el del oxígeno, a 16, y el del cloro, a 35.5. Como las composiciones de oxígeno son las más difundidas, ulteriormente se hizo otra elección diferente de la unidad relativa del peso atómico, según la cual, al oxígeno se le atribuía el peso de 16 000. El peso atómico del hidrógeno resultó ser, en esta escala, de 1.008.

Después de una serie de experimentos interesantes, los físicos consiguieron medir los pesos absolutos de los átomos. Como son conocidos los pesos relativos, fue suficiente medir en gramos el peso del átomo de una especie cualquiera, por ejemplo, del hidrógeno. Naturalmente que los físicos no construyeron balanzas en las que se pudiera poner un átomo y equilibrarlo con una pesa. Para determinar los pesos de los átomos utilizaban otras mediciones, que no eran menos exactas que la comprobación directa del peso. Resultó que la unidad de peso atómico era igual a:

$$m = 1.66 \cdot 10^{-24}\ g.$$

Para apreciar lo diminuto que es este número, supongamos que a cada persona del globo terrestre (la población de la Tierra es de más de tres mil millones de habitantes) se les pide que cedan mil millones de sus moléculas. ¿Cuánta substancia se reuniría de este modo? Unas cuantas millonésimas de gramo.

O bien, otra comparación: el globo terrestre es tantas veces más pesado que una manzana, cuantas veces una manzana es más pesada que el átomo de hidrógeno.

La magnitud recíproca de m, se llama número de Avogadro:

$$N = \frac{1}{m} = 6.023 \cdot 10^{23}.$$

Este número grandísimo tiene el significado siguiente: Tomemos una cantidad de substancia de modo que el número de gramos sea igual al peso relativo M del átomo o de la molécula. Esta cantidad se llama 1 átomo−gramo o 1 molécula–gramo (frecuentemente, para abreviar, en vez de «molécula–gramo», se dice «*mol*»). Entonces, el peso en gramos de una molécula será igual a Mm. Por esto, el número de moléculas en un *mol* de cualquier substancia es:

$$\frac{M}{Mm} = N,$$

o sea, es igual al número de Avogadro.

¿Qué es el calor?

¿En qué se diferencia un cuerpo caliente de uno frío? Hasta comienzos del siglo XIX, a esta pregunta contestaban así: el cuerpo caliente contiene más fluido calórico que el frío. Del mismo modo que la sopa está más salada si contiene más sal. Y, ¿qué es el fluido calórico? La respuesta era la siguiente: «El fluido calórico es la materia del calor, es el fuego elemental». Misterioso e incomprensible.

Además de la teoría del fluido calórico, hacía mucho que existía otra opinión sobre la naturaleza de la substancia. Ésta la defendían brillantemente muchos sabios célebres de los siglos XVI−XVII.

Francisco Bacon, en su libro «Novun organum», escribía: «El mismo calor es, en su esencia, movimiento... El calor consiste en el movimiento variable de las partes ínfimas del cuerpo».

Roberto Hooke, en su libro «Micrografía», afirmaba que: «El calor es el movimiento continuo de las partes del cuerpo... No existe un cuerpo, cuyas partículas estén en reposo». Manifestaciones muy claras de este tipo hallamos en el trabajo de Lomonósov (año 1745), «Reflexiones sobre la causa del calor y del frío». En esta obra se niega la existencia del calórico y se dice que «el calor consiste en el movimiento interior de las partículas de la materia».

Al fin del siglo XVIII, Rumford decía de una manera muy clara: «El cuerpo es tanto más caliente, cuanto más intensamente se mueven las partículas de que se compone, del mismo modo que la campana suena más fuerte, cuanto más fuertes sean las oscilaciones».

Estos admirables éxitos, que eran muy avanzados para aquel tiempo, sirvieron de base para nuestras ideas modernas sobre la naturaleza del calor.

A veces, suele haber días silenciosos, tranquilos, claros. Las hojas están quietas en los árboles, ni siquiera una ligera ondulación altera la superficie del agua. Todo alrededor se mantiene en una inmovilidad rigurosa y solemne. El mundo visible está en reposo. Pero, ¿qué es lo que ocurre en el mundo de los átomos y moléculas?

La física de nuestros días puede contar mucho sobre esto. Cualesquiera que sean las condiciones, nunca se termina el movimiento invisible de las partículas constituyentes del mundo.

¿Por qué no vemos todos estos movimientos? Las partículas se mueven y el cuerpo está en reposo. ¿Cómo puede ser esto?

¿Han tenido la ocasión de observar un enjambre de mosquitos? Cuando no hay viento, el enjambre parece que está suspendido en el aire. Pero dentro de él hay una vida intensa. Cientos de insectos tiran hacia la derecha, pero en este mismo momento, otros tantos se lanzan hacia la izquierda. Todo el enjambre se mantiene en el mismo sitio y no cambia de forma.

Los movimientos invisibles de los átomos y moléculas son de igual carácter caótico y desordenado. Si algunas moléculas se escapan del volumen, otras ocupan el lugar de ellas. Y, como los nuevos huéspedes no se diferencian en nada de los que se marcharon, el cuerpo queda como estaba. El movimiento caótico, desordenado, de las partículas, no altera las propiedades visibles del mundo.

El lector puede preguntar si no es en vano esta conversación. ¿Por qué estos razonamientos, aparte de que sean más brillantes, son más explicativos que la teoría del calórico? ¿Es que alguien ha visto el movimiento térmico eterno de las partículas de la substancia?

El movimiento térmico de las partículas se puede ver, además, con el microscopio más simple. El primero que observó este fenómeno, más de cien años atrás, fue el botánico inglés Brown.

Examinando por el microscopio la constitución interna de las plantas, observó que las partículas diminutas de la substancia que flotaban en el jugo de la planta, estaban en movimiento continuo. El botánico se interesó en saber qué fuerzas obligaban a las partículas a moverse. ¿Puede que sean seres vivientes? El sabio decidió observar por el microscopio partículas pequeñas de arcilla dispersas en agua. Pero incluso éstas, que sin duda alguna no son seres vivos, no estaban en reposo, estaban animadas de un movimiento continuo de zigzag. Cuanto menores eran las partículas, tanto más rápidamente se movían. Largo tiempo estuvo el botánico examinando esta gota de agua, pero no llegó a ver el fin del movimiento de las partículas. Como si algunas fuerzas invisibles las empujasen constantemente.

El movimiento browniano de las partículas es el movimiento térmico. Éste es inherente a todas las partículas, grandes y pequeñas, concentraciones de moléculas, moléculas y átomos.

La energía se conserva siempre

Así pues, el mundo se compone de átomos en movimiento. Los átomos poseen masa, el átomo en movimiento posee energía cinética. Claro que la masa del átomo es pequeñísima y, por consiguiente, su energía es diminuta, pero hay que tener presente que son millones y millones de átomos.

Recordemos ahora al lector que, aunque hablábamos de la ley de conservación de la energía, ésta no era una ley de conservación suficientemente universal. El impulso y el momento se conservaban en el experimento, pero la energía se conservaba sólo en el caso ideal, cuando no había rozamiento. En realidad, la energía siempre disminuía.

Pero antes no decíamos nada de la energía de los átomos. Surge la idea natural: Allí donde a primera vista observábamos disminución de la energía, en realidad se transmitía la energía a los átomos, del cuerpo de un modo imperceptible.

Los átomos se someten a las leyes de la mecánica. Claro que su mecánica es un poco original; sin embargo, esto no cambia el asunto; con respecto a la ley de conservación de la energía, los átomos no se diferencian en nada de los cuerpos grandes.

Por lo tanto, la conservación de la energía total se observa solamente cuando, además de la energía mecánica del cuerpo, se tiene en cuenta también su energía interior y la del medio que le rodea. Solamente en este caso la ley es universal.

¿De qué se compone la energía total del cuerpo? En realidad, la primera componente ya la hemos nombrado: ésta es la suma de las energías cinéticas de todos los átomos. Pero no hay que olvidarse de que los átomos actúan mutuamente unos sobre otros. De este modo se agrega también la energía potencial de esta interacción. Así, pues, la energía total del cuerpo es igual a la suma de las energías cinéticas de sus partículas y de la energía potencial de su interacción.

Es fácil comprender que la energía mecánica del cuerpo, como un todo, es solamente una parte de la energía total. Pues, cuando el cuerpo está en reposo, sus moléculas no se detienen y no terminan de actuar mutuamente una sobre otra. La energía del movimiento térmico de las partículas que queda en el cuerpo en reposo y la energía de la interacción de las partículas, forman la energía interior del cuerpo. Por eso, la energía total del cuerpo es igual a la suma de las energías: mecánica e interior.

En la energía mecánica del cuerpo, como un todo, entra también la energía gravitacional, es decir, la energía potencial de la interacción de las partículas del cuerpo con el globo terrestre.

Considerando la energía interna, ya no observamos pérdida de energía. Si examinamos la naturaleza con una lente de un aumento de millones de veces, el cuadro que se nos presenta es exclusivamente armónico. No hay ninguna pérdida de energía mecánica, y lo único que hay es su transformación en energía interior del cuerpo o del medio. ¿Se ha perdido trabajo? ¡No! La energía se ha invertido en acelerar el movimiento relativo de las moléculas o en la alteración de su posición relativa.

Las moléculas se someten a la ley de conservación de la energía mecánica. En el mundo de las moléculas no hay fuerzas de rozamiento; en él rigen las transformaciones de la energía potencial en cinética, y viceversa. Solamente «se pierde energía» en el grosero mundo de las cosas grandes, donde las moléculas no se perciben.

Si en algún fenómeno se pierde, total o parcialmente, la energía mecánica, en la misma magnitud aumenta la energía interna de los cuerpos y del medio que participan en el fenómeno. En otras palabras, la energía mecánica se transforma, sin ninguna pérdida, en energía de las moléculas o de los átomos.

La ley de conservación de la energía es el riguroso tenedor de libros de la física. En cualquier fenómeno tienen que ser equivalentes los ingresos y los gastos. Si en algún experimento no ha ocurrido esto, es porque de algo importante nos hemos olvidado. En este caso, la ley de conservación de la energía nos avisa: ¡experimentador, repite el experimento, aumenta la exactitud de las mediciones, busca la causa de la pérdida! De este modo, los físicos hacían a menudo nuevos descubrimientos importantes y una y otra vez se convencían de la justeza rigurosa de esta admirable ley.

Caloría

Ya tenemos dos unidades de energía, el erg y el kilográmetro. Al parecer es suficiente. Sin embargo, al estudiar los fenómenos del calor, usamos por costumbre otra tercera unidad, la caloría.

Más tarde veremos que con la caloría no acaba tampoco la lista de las unidades de energía adoptadas.

Posiblemente, en cada caso, el uso de «su» unidad de energía, resulta cómodo y tiene su justificación. Pero, en cualquier ejemplo más o menos complicado, ligado con el paso de una forma de energía a otra, se crea una confusión inconcebible con las unidades.

Para simplificar los cálculos, el nuevo sistema de unidades (SI), propone una misma unidad para el trabajo, energía y cantidad de calor, denominada joule (véase la pág. 71). Sin embargo, debido a la costumbre y al tiempo necesario para que el sistema sea de uso general y el único sistema de unidades, es conveniente dar a conocer más detalladamente la unidad de la cantidad de calor de la que «pronto nos despediremos ya», la caloría.

La caloría pequeña (cal), es la cantidad de energía que hay que comunicar a 1 g de agua para elevar su temperatura en 1 ^oC.

Hay que tener en cuenta que aquí hablamos de la caloría «pequeña», a diferencia de la «grande», que es mil veces mayor (frecuentemente, la caloría grande se indica así: $Kcal$, que significa «kilocaloría»).

La relación entre la caloría y la unidad mecánica de trabajo, el erg, o el kilográmetro, se halla calentando agua de un modo mecánico. Muchas veces se hicieron experimentos semejantes. Por ejemplo, se puede elevar la temperatura del agua agitándola enérgicamente. El trabajo mecánico que se gasta en calentar el agua, se aprecia con bastante exactitud. Con estas mediciones se halló que:

$$1\ cal = 0.427\ kgmf = 4.18\ joules.$$

Como las unidades de energía y de trabajo son las mismas, el trabajo se puede medir también en calorías. Para levantar una pesa de un kilogramo a la altura de un metro, hay que gastar 2.35 calorías. Esto parece muy raro y, en general, comparar el levantamiento de una carga con el calentamiento del agua es muy incómodo. Por esto, en la mecánica no se emplea la caloría.

Un poco de historia

La ley de conservación de la energía se pudo formular solamente cuando estuvieron suficientemente claros los conocimientos sobre la naturaleza mecánica del calor, y cuando la técnica planteó un problema práctico importante sobre la equivalencia entre el calor y el trabajo.

El primer experimento que se hizo para determinar la relación cualitativa entre el calor y el trabajo, fue realizado por el conocido físico Rumford (1753−1814). Él trabajaba en una fábrica donde se construían cañones. Cuando se taladra el tubo del cañón, se desprende calor. ¿Cómo apreciarlo?

¿Qué tomar por medida del calor? A Rumford le sugirió la idea de relacionar el trabajo realizado al taladrar con el calentamiento de tal o cual cantidad de agua, a tal o cual número de grados. Por cierto que, en estas investigaciones, por primera vez quizá se expresó con claridad la idea de que el calor y el trabajo tienen que tener una medida común.

El siguiente paso hacia el descubrimiento de la ley de conservación de la energía fue el establecimiento de un hecho importante: de que el consumo del trabajo va acompañado de la aparición de una cantidad proporcional de calor; con esto se halló la medida común del calor y del trabajo.

La primera definición del llamado equivalente mecánico del calor, fue enunciada por el físico francés Sadí Carnot. Este célebre hombre murió en el año 1832, a la edad de 36 años, dejando un manuscrito que se publicó solamente 50 años después. El descubrimiento de Carnot fue ignorado y no influyó en el desarrollo de la ciencia. En este trabajo, Carnot calculó, que para levantar $1\,m^3$ de agua a la altura de $1\ m$, se necesita la misma energía que para calentar $1\,kg$ de agua en $2.7\ {}^{\circ}C$ (el valor verdadero es $2.3\ {}^{\circ}C$).

En el año 1842 publica su primer trabajo el médico alemán Julio Roberto Mayer. Aunque Mayer denomina de otro modo los conceptos físicos conocidos, el estudio detenido de su trabajo nos lleva a la conclusión de que en él se exponen los rasgos fundamentales de la ley de conservación de la energía. Mayer distingue la energía interna («calorífica»), la energía potencial de gravitación y la energía del movimiento del cuerpo. Con razonamientos puramente especulativos intenta deducir la necesidad de la conservación de la energía en las diversas transformaciones. Para comprobar esta afirmación en un experimento, hay que tener una medida común para la valoración de estas energías. Mayer calcula que elevar en un grado la temperatura de un kilogramo de agua es equivalente a levantar un kilogramo a 365 m.

En su segundo trabajo, publicado tres años más tarde, Mayer señala la universalidad de la ley de conservación de la energía, la posibilidad de su aplicación a la química, a la biología y a los fenómenos cósmicos. A las diferentes formas de energía, Mayer agrega la magnética, la eléctrica y la química.

En el descubrimiento de la ley de conservación de la energía, grandes méritos tuvo el admirable físico inglés (fabricante de cerveza de Salford en Inglaterra) Jaime Prescott Joule, que trabajaba independientemente de Mayer.

Si Mayer era propenso a la filosofía indeterminada, el rasgo fundamental de Joule era que empleaba un método riguroso de experimentación para el estudio de los fenómenos. Joule planteaba ante la naturaleza un problema y recibía la respuesta de ella, después de realizar con extraordinario escrúpulo una serie de experimentos especiales. No hay duda de que en todos los experimentos llevados a cabo por Joule, éste perseguía un fin: hallar una medida común para apreciar las acciones térmicas, químicas, eléctricas y mecánicas; mostrar que en todos estos fenómenos se conserva la energía. Joule enunció su idea así: «En la naturaleza no desaparece ninguna fuerza que realice trabajo sin que surja la acción correspondiente».

El 24 de enero de 1843, Joule hizo una intervención sobre su primer trabajo y el 21 de agosto del mismo año informó sobre sus resultados respecto al establecimiento de una medida común del calor y del trabajo. La elevación en un grado de la temperatura de un kilogramo de agua resultó ser equivalente al levantamiento de un kilogramo a la altura de 460 m.

En los años posteriores, Joule y otros investigadores, realizaron un trabajo inmenso para hallar con mayor exactitud el valor del equivalente del calor, y procuraron también demostrar la universalidad absoluta de él. A fines de los años cuarenta quedó claro que, sea como sea el paso del trabajo a calor, la cantidad creada de éste siempre será proporcional a la cantidad realizada de trabajo. A pesar de que Joule fundamentó experimentalmente la ley de conservación de la energía, en sus trabajos no formuló con claridad esta ley.

El mérito de esto corresponde al físico alemán Helmholtz. El 23 de junio del año 1847, Germán Helmholtz intervino en la sesión de la sociedad física de Berlín sobre el principio de la conservación de la energía. En este trabajo, por primera vez se expuso con claridad el fundamento mecánico de la ley de conservación de la energía. El mundo se compone de átomos, éstos poseen energía potencial y cinética. La suma de las energías potencial y cinética de las partículas que componen el cuerpo o el sistema, no se puede alterar, a no ser que este cuerpo o este sistema estén sometidos a acciones exteriores. La ley de conservación de la energía fue formulada por primera vez por Helmholtz del modo que la expusimos en las páginas anteriores.

La amplia intervención de Helmholtz no sólo contenía la formulación de ideas generales, sino que examinó detalladamente todos los fenómenos físicos, térmicos, químicos, electromagnéticos; demostró la universalidad del principio de equivalencia y puso de manifiesto las reglas para el cálculo de la energía.

Después de los trabajos de Helmholtz, a los físicos no les quedó más que comprobar y aplicar el principio de conservación de la energía. El éxito de todas estas investigaciones dio lugar a que, a finales de los años cincuenta, fuese ya reconocida generalmente la ley de conservación de la energía como una ley fundamental de las ciencias naturales.

Luego, en el siglo XX, se observaron fenómenos que ponían en duda la ley de conservación de la energía. Sin embargo, a continuación, las divergencias advertidas tuvieron su explicación. Hasta hoy día, la ley de conservación de la energía ha pasado con honor por todas las pruebas.

GERMAN HELMHOLTZ (1821–1894)*, célebre sabio alemán. Helmholtz trabajó con gran éxito en las ramas de la física, matemáticas y fisiología. Dio por primera vez (año* 1847*) el enunciado matemático de la ley de conservación de la energía, subrayando el carácter general de esta ley. Obtuvo grandiosos resultados en la termodinámica; aplicó por primera vez esta ciencia al estudio de los procesos químicos. Con sus trabajos sobre el movimiento turbulento de los líquidos, Helmholtz estableció los fundamentos de la hidrodinámica y aerodinámica. Efectuó una serie de valiosas investigaciones dedicadas a la acústica y al electromagnetismo. Creó la teoría física de la música. En sus investigaciones físicas, aplicó serios y originales métodos matemáticos.*

X. Estructura de la materia

Las moléculas

Las moléculas se componen de átomos. Los átomos están ligados con las moléculas por fuerzas llamadas químicas.

Existen moléculas que se componen de dos, tres, cuatro átomos. Las moléculas más grandes, las de las albúminas, se componen de decenas y hasta de centenares de miles de átomos.

El reino de las moléculas es muy variado. Actualmente, los químicos ya han extraído de las substancias naturales y creado en los laboratorios millones de substancias constituidas de diversas moléculas.

Las propiedades de las moléculas se determinan no sólo por la cantidad de tales o cuales átomos que participan en su constitución, sino también por el orden y por la configuración de su unión. La molécula no es un conglomerado desordenado de ladrillos, más bien representa una construcción de arquitectura complicada, en donde cada ladrillo tiene su sitio y unos vecinos completamente determinados. La construcción atómica de la molécula puede ser rígida en mayor o menor grado. En todo caso, cada uno de los átomos efectúa oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio. En algunos casos, unas partes de la molécula pueden girar con respecto a las otras, dando a la molécula libre, en el proceso de su movimiento térmico, las más diversas y extravagantes configuraciones.

Veamos más detalladamente la interacción de los átomos. En la Fig. 86 está representada la curva de la energía potencial de una molécula que consta de dos átomos. Esta curva tiene una forma característica, primeramente, desciende, después, asciende un poco, formando un «hoyo», y por fin, se aproxima lentamente al eje horizontal, el cual representa la distancia que hay entre los átomos.

Ya sabemos que la situación es estable cuando la energía potencial alcanza el valor mínimo. Cuando el átomo forma parte de la molécula, se «encuentra» en el hoyo potencial, realizando algunas oscilaciones térmicas alrededor de la posición de equilibrio.

La distancia desde el fondo del «hoyo» hasta el eje vertical se puede llamar distancia de equilibrio. A esta distancia se situarían los átomos si cesase el movimiento térmico.

La curva de la energía potencial nos relata todos los detalles de la interacción de los átomos. Analizando la curva de la energía potencial se puede determinar si se atraen o se repelen las partículas a tal o cual distancia, si crece o disminuye la fuerza de interacción al separarse o al acercarse las partículas.

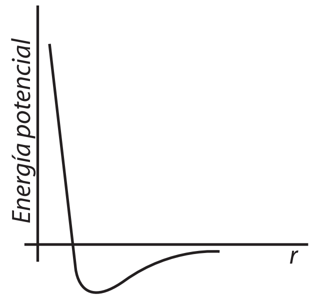


Fig. 86

Los puntos situados a la izquierda del «hoyo» corresponden a la repulsión. Por el contrario, el trozo de la curva a la derecha del fondo del hoyo caracteriza la atracción. La curvatura de la curva también nos proporciona informaciones importantes: cuanto mayor sea la flexión de la curva, tanto mayor será la fuerza de interacción.

Estando situados a grandes distancias, los átomos se atraen entre sí, esta fuerza disminuye con bastante rapidez al aumentar la distancia entre ellos. Al acercarse, la fuerza de atracción aumenta, alcanzando el valor máximo cuando los átomos están bastante próximos unos de otros. Al acercarse todavía más, la atracción se hace más débil y, por fin, a la distancia de equilibrio, ésta se anula. Al acercarse los átomos a, una distancia menor que la de equilibrio, aparecen las fuerzas de repulsión, que se desarrollan bruscamente y que en seguida hacen prácticamente imposible la disminución ulterior de la distancia entre ellos.

Las distancias de equilibrio (en adelante diremos abreviadamente, distancias) entre los átomos son diferentes para diversas especies de átomos.

Para diversos pares de átomos, no sólo son diferentes las distancias desde el fondo del hoyo hasta el eje vertical, sino también la profundidad del hoyo.

Esta profundidad tiene un significado simple: para salir del hoyo se necesita una energía que tiene que ser, precisamente, igual a la profundidad. Por esto, la profundidad del hoyo se puede llamar energía de cohesión de las partículas.

Las distancias entre los átomos de las moléculas son tan pequeñas, que para medirlas hay que elegir unidades especiales; en caso contrario habría que expresar sus valores, por ejemplo, de esta forma: 0.000000012 cm. Ésta es la distancia de los átomos en la molécula de oxígeno.

Una unidad muy cómoda para estudiar el mundo atómico es el Angstrom (en realidad, el apellido del sabio sueco, cuyo nombre lleva esta unidad, se lee Ongstròm; para recordar esto, sobre la letra A se pone una pequeña «o»).

$$1\mathring{A} = 10^{-8}\ cm,$$

o sea, es una cien millonésima parte de centímetro.

La distancia entre los átomos de las moléculas se encuentra entre 1 y 4 Angstrom. La distancia de equilibrio, citada anteriormente para el oxígeno, es igual a 1.2 $\mathring{A}$.

Como vemos, las distancias entre los átomos son muy pequeñas, Ciñendo el globo terrestre por el ecuador con una cuerda, la longitud del «cinturón» sería tantas veces mayor que la anchura de la palma de la mano, cuantas veces la palma de la mano es mayor que la distancia entre los átomos de las moléculas.

Para medir la energía de cohesión se emplea, por lo general, la caloría, pero no relacionándola a una molécula, ya que, naturalmente, resultaría un número insignificante, sino a la molécula−gramo (*mol*), o sea, al número de gramo igual al peso molecular relativo.

Es claro que la energía de cohesión de una molécula–gramo dividida por el número de Avogadro, $N = 6.023 \cdot 10^{23}$, representa la energía de cohesión de una molécula.

La energía de cohesión de los átomos en la molécula, así como las distancias entre los átomos, oscila entre límites insignificantes.

Para el mismo oxígeno, la energía de cohesión es igual a 116 000 calorías por cada gramo–molécula, para el hidrógeno, a 103 000 calorías, etc.

Ya dijimos anteriormente que los átomos se sitúan en las moléculas, unos respecto a los otros, de un modo completamente determinado, formando a veces construcciones muy intrincadas.

Veamos unos cuantos ejemplos simples. En la molécula del CO_2 (gas carbónico), los tres átomos están situados en fila, con el átomo del carbono en el medio. La molécula del agua H_2O tiene una forma angular; en el vértice del ángulo (que es igual a $105\,^\circ$) está el átomo de oxígeno.

En la molécula del amoníaco NH_3, el átomo del nitrógeno está situado en el vértice de una pirámide triangular; en la molécula del metano CH_4, el átomo del carbono está situado en el centro de una figura de cuatro caras con aristas iguales, llamada tetraedro.

Los átomos de carbono en el benceno C_6H_6, forman un hexágono regular. Las uniones de los átomos de carbono con el hidrógeno van desde los vértices del hexágono. Todos los átomos están situados en un plano.

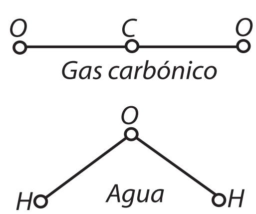


Fig. 87

En las figuras 87 y 88 están representadas esquemáticamente las posiciones de los centros de los átomos de estas moléculas.

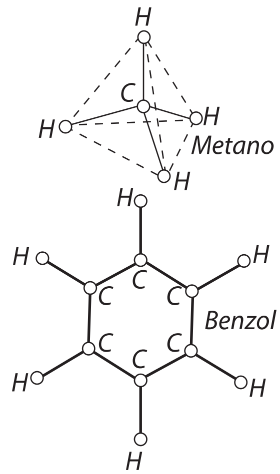


Fig. 88

Supongamos que se ha realizado una reacción química: había moléculas de una especie y se formaron otras. Unas uniones se destruyeron, otras se formaron de nuevo. Para romper la cohesión entre los átomos (recordemos el dibujo), hay que realizar tanto trabajo, como para hacer salir rodando la bola del hoyo. Por el contrario, al formarse nuevas cohesiones se libra energía, la bola rueda al hoyo.

¿Qué trabajo es mayor, el de destrucción o el de creación? En la naturaleza nos encontramos con reacciones de ambos tipos.

El exceso de energía se llama efecto térmico o, de otra manera, transformación térmica (reacción). Los efectos térmicos de las reacciones suelen ser, frecuentemente, magnitudes de un orden de decenas de miles de calorías por cada *mol*. A menudo, se incluye el efecto térmico en la fórmula de la reacción como uno de los sumandos.

Por ejemplo, la reacción de combustión del carbono (en forma de grafito), o sea, su unión con el oxígeno, se escribe así:

$$C + O_2 = CO_2 + 94.250\ cal.$$

Esto significa que al unir C con O_2 se libra una energía de 94.250 calorías.

La suma de las energías internas del átomo–gramo del carbono en el grafito y de la molécula gramo del oxígeno, es igual a la energía interna de la molécula–gramo del gas carbónico más 94.250 calorías.

De este modo, semejantes expresiones tienen un claro significado de igualdades algebraicas, escritas para los valores de las energías internas.

Con estas ecuaciones se pueden hallar los efectos térmicos de las transformaciones para las que no valen, por tal o cual causa, los métodos directos de medición. Véase el ejemplo: si el carbono (grafito) se uniese con el hidrógeno, se formaría el gas acetileno:

$$2C + H_2 = C_2H_2.$$

La reacción no se efectúa de este modo. Sin embargo, se puede hallar su efecto térmico. Escribamos tres reacciones conocidas, oxidación del carbono:

$$2C + 2O_2 = 2CO_2 + 188\,000 \text{ calorías},$$

oxidación del hidrógeno:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O + 68\,000 \text{ calorías},$$

oxidación del acetileno:

$$C_2H_2 + \frac{5}{2}O_2 = 2CO_2 + H_2O + 312\,000 \text{ calorías}.$$

Todas estas igualdades se pueden considerar como las ecuaciones de las energías de cohesión de las moléculas. En vista de esto, se puede operar con ellas como con las ecuaciones algebraicas. Restando las dos superiores de la inferior, obtenemos:

$$2C + H_2 = C_2H_2 - 56\,000 \text{ calorías}.$$

Por consiguiente, la transformación que nos interesa va acompañada de una absorción de 56 000 calorías por cada molécula–gramo.

Interacción de las moléculas

Las moléculas se atraen mutuamente. Nadie lo duda ya. Si en un instante las moléculas pararan de atraerse unas a otras, todos los cuerpos líquidos y sólidos se desharían en moléculas.

Las moléculas se repelen mutuamente, puesto que en caso contrario los cuerpos líquidos y sólidos se comprimirían con una facilidad extraordinaria.

Entre las moléculas actúan unas fuerzas que son, en gran parte, parecidas a las fuerzas entre los átomos, de las que se hablaba anteriormente. La curva de la energía potencial que acabamos de dibujar para los átomos, proporciona justamente los rasgos fundamentales de la interacción de las moléculas. Sin embargo, entre estas dos interacciones hay diferencias esenciales.

Comparemos, por ejemplo, la distancia de equilibrio entre los átomos de oxígeno que forman la molécula y los átomos de oxígeno de dos moléculas vecinas que se han atraído en el oxígeno sólido hasta la posición de equilibrio. La diferencia es muy notable: los átomos de oxígeno que forman la molécula se colocan a la distancia de 1.2 $\AA$; los átomos de oxígeno de diversas moléculas se acercan unos a otros a la distancia de 2.9 $\AA$.

Para otros átomos se obtienen también resultados semejantes. Los átomos de moléculas diferentes se colocan más lejos unos de otros que los átomos de una misma molécula. Por eso, es más fácil separar una molécula de otra que los átomos de una molécula, existiendo, además, mucha mayor diferencia en las energías que en las distancias. Si la energía necesaria para la destrucción de la cohesión entre los átomos de oxígeno que forman la molécula es de 100 $\dfrac{kcal}{mol}$, la energía para la separación de las moléculas de oxígeno es menor de 2 $\dfrac{kcal}{mol}$.

Esto significa que el «hoyo» de la molécula, en la curva de la energía potencial, está situado más lejos del eje vertical y, además, es mucho más profundo.

No obstante, la diferencia entre la interacción de los átomos que forman la molécula y la interacción de las moléculas, no estriba sólo en esto.

Los químicos han demostrado que los átomos están cohesionados en la molécula con un número determinado de otros átomos. Si dos átomos de hidrógeno han formado una molécula, el tercer átomo no se unirá a ellos con este fin. El átomo de oxígeno está unido en el agua con dos átomos de hidrógeno y unir a ellos otro es imposible. En la interacción próxima, la molécula no pierde en grado alguno su «fuerza atractiva». La afluencia de moléculas vecinas continuará mientras haya sitio.

¿Qué significa «que haya sitio»? ¿Es que las moléculas son algo como las manzanas o los huevos? Claro que, en cierto sentido, esta comparación está justificada: las moléculas son cuerpos físicos que tienen «dimensiones» y «formas» determinadas. La distancia de equilibrio entre las moléculas no es otra cosa más que la «dimensión» de la molécula.

El aspecto que tiene el movimiento térmico

La interacción entre las moléculas puede tener mayor o menor importancia en «la vida» de las moléculas.

Los tres estados de la substancia: el gaseoso, el líquido y el sólido, se diferencian uno de otro por el papel que juega en ellos la interacción de las moléculas.

La palabra «gas» la inventaron los sabios. Procede de la palabra griega «caos», que quiere decir desorden.

En efecto, el estado gaseoso de la substancia es un ejemplo de la existencia en la naturaleza de un desorden total en la posición relativa y en el movimiento de las partículas. No hay un microscopio que permita ver el movimiento de las moléculas de gas, pero, a pesar de esto, los físicos pueden describir con bastante detalle la vida de este mundo invisible.

En un centímetro cúbico de aire, en condiciones normales (con la temperatura y la presión atmosférica de la habitación), hay una inmensa cantidad de moléculas, aproximadamente $2.5 \cdot 10^{19}$ (o sea, 25 trillones de moléculas). A cada molécula corresponde un volumen de $4 \cdot 10^{-20}$ cm^3, o sea, un cubo con una arista aproximadamente de $3.5 \cdot 10^{-7}$ $cm = 35\,\mathring{A}$. Sin embargo, las moléculas son mucho más pequeñas. Por ejemplo, las moléculas de oxígeno y nitrógeno —que forman la parte principal del aire— tienen una dimensión media de cerca de 4 $\mathring{A}$.

Por lo tanto, la distancia media entre las moléculas es unas 10 veces mayor que las dimensiones de la molécula y esto, a su vez, significa, que el volumen medio del aire que corresponde a una molécula es, aproximadamente, 1000 veces mayor que el volumen de la misma molécula.

Figúrense una plazoleta plana en la que desordenadamente se han echado monedas, de modo que a cada superficie de 1 m^2 corresponden, por término medio, cien monedas.

Esto significa que a cada página del libro que están leyendo corresponde una o dos monedas. Más o menos del mismo modo están situadas las moléculas de gas.

Cada molécula de gas está afectada por un movimiento térmico continuo.

Observemos una de las moléculas. Ahí va, impetuosamente, moviéndose hacia la derecha. Si no encontrase dificultades en el camino, la molécula continuaría su movimiento en línea recta con la misma velocidad. Pero su camino lo interceptan sus infinitos vecinos. Los choques son inevitables y las moléculas salen disparadas como dos bolas de billar que han chocado. ¿Hacia qué lado salta nuestra molécula? ¿Adquirirá o perderá velocidad? Todo puede ser, pues los encuentros pueden ser muy diversos. Son posibles los choques por delante y por detrás, por la derecha y por la izquierda, fuertes y suaves. Claro que, sometiéndose a tales choques en estos encuentros casuales, la molécula que observamos va agitada hacia todos lados dentro del recipiente en el que está contenido el gas.

¿Qué trayecto consiguen recorrer sin chocar las moléculas de gas?

Esto depende de las dimensiones de las moléculas y de la densidad del gas. Cuanto mayores sean las dimensiones de las moléculas y cuanto más cantidad de ellas haya en el recipiente, tanto más frecuentemente chocan. La longitud media del espacio recorrido por una molécula sin chocar —llamada recorrido libre medio— es, en condiciones ordinarias, igual a $11 \cdot 10^{-6}$ $cm = 1100$ $\mathring{A}$ para las moléculas de hidrógeno, e igual a $5 \cdot 10^{-6}$ $cm = 500$ $\mathring{A}$ para las moléculas de oxígeno. El valor de $5 \cdot 10^{-6}$ cm es una veintemilésima parte de milímetro; esta distancia es muy pequeña, pero comparándola con las dimensiones de las moléculas, ya no parece tan pequeña. El recorrido de $5 \cdot 10^{-6}$ cm para la molécula de oxígeno corresponde a la distancia de 10 m para una bola de billar.

La estructura de los líquidos se diferencia esencialmente de la estructura del gas, cuyas moléculas están situadas lejos unas de otras y raramente chocan. En el líquido, las moléculas están en una proximidad inmediata. Las moléculas del líquido están situadas como las patatas en un saco. Por cierto, que con una diferencia: las moléculas del líquido están en continuo y caótico movimiento térmico. Como están muy apretadas, éstas no pueden moverse tan libremente como las moléculas de gas. Cada una de ellas casi no se mueve del sitio, está todo el tiempo acorralada por unos mismos vecinos y, solamente, poco a poco, se desplaza por el volumen ocupado por el líquido. Cuanto mayor sea la viscosidad del líquido, tanto más lento será el desplazamiento. Pero, incluso en un líquido, tan «movido» como el agua, la molécula se desplaza en 3 $\mathring{A}$ en el mismo tiempo que necesita la molécula de gas para recorrer 700 $\mathring{A}$.

En los cuerpos sólidos, las fuerzas de interacción de las moléculas se resisten resueltamente al movimiento térmico. En substancias sólidas, prácticamente, las moléculas mantienen todo el tiempo una posición constante. El movimiento térmico solamente se expresa en unas vibraciones continuas de las moléculas alrededor de la posición de equilibrio. La causa de la denominación de «sólido», consiste en la ausencia de desplazamientos sistemáticos de las moléculas. En efecto, si las moléculas no cambian de vecinos, con más razón se mantienen unas partículas con las otras del mismo cuerpo en una ligazón inalterable.

Compresibilidad de los cuerpos

Las moléculas de gas chocan contra las paredes del recipiente del mismo modo que las gotas de agua de la lluvia golpean contra el tejado. El número de estos golpes es grandísimo y su acción conjunta crea la presión que puede mover el émbolo de un motor, explotar un proyectil o inflar un globo. La presión atmosférica, la presión que hace saltar la tapa de una tetera hirviendo, la fuerza que expulsa a la bala del fusil, todo esto no es más que una serie de choques moleculares.

¿Con qué está relacionada la presión del gas? Claro que la presión será tanto mayor, cuanto más fuerte sea el golpe asestado por cada molécula. También es evidente, que la presión depende del número de golpes asestados en un segundo. Cuanto más moléculas haya en el recipiente, tanto más frecuentes serán los golpes, tanto mayor será la presión. Por lo tanto, la presión p de un gas dado es, ante todo, proporcional a su densidad.

Si la masa de gas no varía, entonces, disminuyendo el volumen aumenta la densidad en el número correspondiente de veces. Por consiguiente, la presión del gas en un recipiente cerrado es, de este modo, inversamente proporcional al volumen. O en otras palabras, el producto de la presión por el volumen tiene que ser constante:

$$pV = const.$$

Esta simple ley fue descubierta por el físico inglés Boyle y por el sabio francés Mariotte. La ley de Boyle–Mariotte es una de las primeras leyes cuantitativas en la historia de la ciencia física. Naturalmente, esta ley se cumple solamente cuando la temperatura es constante.

A medida que se comprime el gas, la ley de Boyle–Mariotte va dejando de cumplirse. Las moléculas se aproximan y la interacción entre ellas empieza a influir en el comportamiento del gas.

La ley de Boyle–Mariotte es valedera en los casos en que la intervención de las fuerzas de interacción en la vida de las moléculas del gas es completamente imperceptible. Por eso se dice que la ley de Boyle–Mariotte es la ley de los gases ideales.

El adjetivo «ideal» suena un poco risible aplicado a la palabra «gas». Ideal quiere decir perfecto, o sea, que no puede haber mejor.

Cuanto más simple es el modelo o el esquema, tanto más ideal es para el físico. Simplificando los cálculos, se hacen más fáciles y claras las explicaciones de los fenómenos físicos. La denominación de «gas ideal» se refiere al esquema simple del gas. El comportamiento de los gases suficientemente enrarecidos no se distingue, prácticamente, del comportamiento de los gases ideales.

La compresibilidad de los líquidos es mucho menor que la de los gases. En los líquidos, las moléculas están ya en «contacto». La compresión consiste solamente en el mejoramiento de la «compacidad» de las moléculas y, a presiones muy grandes, en el aplastamiento de las mismas.

Los datos que damos a continuación muestran en cuánto dificultan la compresibilidad de los líquidos las fuerzas de repulsión. El aumento de la presión en una o dos atmósferas da lugar a la disminución del volumen del gas en dos veces, mientras que el volumen del agua se altera en $\frac{1}{20000}$ y el del mercurio solamente en $\frac{1}{250000}$.

Incluso la enorme presión existente en las profundidades del océano es incapaz de comprimir sensiblemente el agua. En efecto, la presión de una atmósfera se forma con una columna de agua de diez metros de altura. La presión bajo una capa de agua de 10 km, es igual a 1000 atmósferas. El volumen de agua ha disminuido en $\frac{1000}{20000}$ o sea, en $\frac{1}{20}$ parte.

La compresibilidad de los cuerpos sólidos se diferencia poco de la de los líquidos. Esto es comprensible, pues, en ambos casos, las moléculas ya están en contacto y la comprensión puede alcanzarse solamente a causa de un acercamiento ulterior de las moléculas que se repelen con gran fuerza. Con presiones superaltas, de $50-100$ mil atmósferas, se consigue comprimir el acero en $\frac{1}{1000}$ y el plomo, en $\frac{1}{7}$ de su volumen. Estos ejemplos muestran que, en las condiciones terrestres, no se puede comprimir considerablemente un cuerpo sólido.

Pero en el Universo hay cuerpos donde la substancia está incomparablemente más comprimida. Los astrónomos han descubierto estrellas, llamadas estrellas enanas blancas («blancas», por el carácter de su iluminación y «enanas» por sus dimensiones relativamente pequeñas), en las que la densidad de la substancia alcanza hasta 106 $\frac{g}{cm^3}$, por lo cual dentro de ellas tiene que haber una presión enorme.

Variación de la presión con la altura

Al aumentar la altura, la presión disminuye. Esto fue comprobado por primera vez por el francés Perrier, encomendado por Pascal, en el año 1648. La montaña Piú de Dom, cerca de la cual vivía Perrier, tenía 975 m de altura. Las mediciones mostraron que, al subir a la montaña, el mercurio del tubo de Torricelli bajaba 8 mm.

La disminución de la presión del aire con el aumento de la altura es natural, pues arriba, sobre el dispositivo presiona una columna menor de aire.

Si han volado en avión, sabrán que en la parte delantera del tablero de mando de la cabina hay un aparato que muestra, con una aproximación de decenas de metros, la altura a la que se ha levantado el avión. Este aparato se llama altímetro. Es un simple barómetro graduado para indicar la altura sobre el nivel del mar.

La presión disminuye con el aumento de la altura; hallemos la fórmula de esta dependencia. Consideremos una capa pequeña de aire de 1 cm^2 de superficie y situada entre las alturas h_1 y h_2. En una capa pequeña, la alteración de la densidad con la altura, casi no se nota. Por eso, el peso del volumen de aire (éste es un cilindro de 1 cm^2 de área en la base y de altura $h_2 - h_1$), es igual a $mg = \rho\,(h_2 - h_1)\,g$. Este peso es el que origina la disminución de la presión al subir de la altura h_1 a la altura h_2. Es decir,

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = g\,(h_2 - h_1)\,.$$

Pero, según la ley de Boyle–Mariotte, la densidad del gas es proporcional a la presión. Por esto,

$$\frac{p_1 - p_2}{p} \propto (h_2 - h_1)\,.$$

En el primer miembro figura la parte en que aumentó la presión al disminuir la altura desde h_2 hasta h_1. Por consiguiente, a iguales disminuciones de $h_2 - h_1$ corresponderá igual porcentaje de aumento de la presión.

Las mediciones y los cálculos muestran, con plena armonía, que a cada kilómetro que se asciende sobre el nivel del mar, la presión baja en 0.1 parte. Esto mismo se refiere también al descenso en las minas profundas a niveles inferiores al del mar; al descender un kilómetro, la presión aumenta en 0.1 parte de su valor.

Se trata de la alteración en 0.1 parte del valor de la altura anterior. Esto significa que, al subir un kilómetro, la presión disminuye hasta 0.9 de la presión al nivel del mar; al subir el siguiente kilómetro, se hace igual a 0.9 de 0.9 de la presión al nivel del mar; a la altura de 3 kilómetros, la presión será igual a 0.9 de 0.9 de 0.9, o sea, a $(0.9)^3$ de la presión al nivel del mar. No resulta difícil reiterar estos razonamientos.

Indicando con p_0 la presión al nivel del mar, podemos escribir la presión a la altura h (expresada en kilómetros):

$$p = p_0\,(0.87)^h = p_0 \cdot 10^{-0.06h}.$$

Entre paréntesis va un número más exacto; 0.9 es el valor redondeado. La fórmula supone que la temperatura es igual en todas las alturas. En realidad, la temperatura de la atmósfera cambia con la altura, y además, de acuerdo a una ley bastante complicada. A pesar de todo, la fórmula facilita unos resultados bastante buenos y se puede utilizar hasta alturas de cientos de kilómetros.

Con esta fórmula es fácil determinar, que a la altura del Elbruz, de cerca de 5.6 km, la presión baja aproximadamente en dos veces y, a la altura de 22 km (la mayor altura alcanzada por un estratostato con hombres), la presión disminuye hasta 50 $mm\ Hg$.

Cuando decimos que la presión de 760 $mm\,Hg$ es normal, no hay que olvidarse de agregar: «al nivel del Mar». A la altura de 5.6 km, la presión normal no es de 760, sino de 380 $mm\ Hg$.

Por la misma ley, con el aumento de la altura, junto con la presión disminuye la densidad del aire. A la altura de 160 km queda poco aire:

$$(0.87)^{160} = 10^{-10}.$$

En la superficie terrestre, la densidad del aire es aproximadamente de 1000 $\dfrac{g}{m^3}$; por lo tanto, a la altura de 160 km, en cada metro cúbico tiene que haber, según nuestra fórmula, 10^{-7} g de aire. En realidad, como muestran las mediciones efectuadas con cohetes, la densidad del aire a esta altura es diez veces mayor.

Para alturas de varios centenares de kilómetros, el error por defecto de nuestra fórmula es aún mayor. La culpa de que la fórmula no sea valedera para grandes alturas la tiene la variación de la temperatura con la altura y también un fenómeno particular: la desintegración de las moléculas del aire por la acción de la irradiación solar. Aquí no vamos a tocar esta cuestión.

El vacío

Técnicamente no se puede hacer el vacío perfecto, por lo que en el recipiente queda un número inmenso de moléculas.

En muchos dispositivos físicos, las moléculas de gas representan un obstáculo esencial. Las lámparas de radio, los tubos de rayos X, los aceleradores de las partículas elementales, todos estos dispositivos necesitan un vacío, o sea, un espacio libre de las moléculas de gas. También tiene que haber vacío en la bombilla eléctrica ordinaria. Si en una bombilla penetra aire, el hilo se oxida y la bombilla se funde inmediatamente.

En los mejores dispositivos de vacío, éste es de 10^{-8} $mm\ Hg$. Presión insignificante, que registrada por un manómetro de mercurio, desplazaría el nivel de éste en una cienmillonésima parte de milímetro.

Sin embargo, a pesar de lo ínfima que es esta presión, en cada centímetro cúbico hay todavía unos cuantos cientos de millones de moléculas.

Es interesante comparar este vacío con el del espacio interestelar: en éste, en unos cuantos centímetros cúbicos hay por término medio una partícula elemental de substancia.

Para obtener el vacío se emplean unas bombas especiales. La bomba ordinaria, que extrae el gas mediante un movimiento del émbolo, puede crear un vacío no mayor de 0.01 $mm\ Hg$. Un vacío bueno, o, como suelen decir, un alto vacío, se puede obtener utilizando las llamadas bombas de difusión, de mercurio o de aceite, en las que las moléculas de gas son arrastradas por un chorro de vapor de mercurio o de aceite.

Las bombas de mercurio, que llevan el nombre de su inventor Lengmuir, empiezan a funcionar sólo después de una aspiración preliminar hasta una presión de cerca de 0.1 $mm\ Hg$; tal enrarecimiento previo se llama vacío preliminar.

El principio de acción consiste en lo siguiente. Un pequeño recipiente de vidrio se comunica: 1) con un recipiente con mercurio, 2) con el recipiente a enrarecer, y 3) con la bomba de vacío preliminar. El mercurio se calienta y la bomba aspira sus vapores. Por el camino, los vapores de mercurio arrastran a las moléculas de gas y las conducen a la bomba de vacío preliminar. Los átomos de mercurio se condensan en líquido (se ha previsto un enfriamiento con una corriente de agua), la cual trasvasa al recipiente donde el mercurio comenzó su recorrido.

Como acabamos de decir, el vacío que se consigue en las condiciones del laboratorio está muy lejos de ser vacío en el sentido absoluto de la palabra. El vacío es un gas muy enrarecido. Las propiedades de este gas pueden diferenciarse esencialmente de las propiedades del gas ordinario.

El movimiento de las moléculas que «forman el vacío» cambia su carácter cuando el libre recorrido medio de la molécula es mayor que las dimensiones del recipiente en el que está el gas. Entonces, las moléculas, raramente chocan y efectúan su recorrido haciendo zigzagueos, chocando contra una u otra pared del recipiente.

Calculemos la presión que tiene que haber para esto. Antes se decía, que la longitud del recorrido en el aire, a la presión atmosférica, era igual a $5 \cdot 10^{-6}$ cm. Si este recorrido lo aumentamos en 10^7 veces, resultará de 50 cm; o sea, que será considerablemente mayor que un recipiente de dimensiones medias. Como la longitud del recorrido es inversamente proporcional a la densidad y, por consiguiente, a la presión, para conseguir este recorrido, la presión tiene que ser igual a 10^{-7} de la atmosférica, o sea, aproximadamente, 10^{-4} $mm\ Hg$.

Incluso el espacio intersideral no está completamente vacío. Pero la densidad de la substancia en él, es, aproximadamente, de $5 \cdot 10^{-24}\ \dfrac{g}{cm^3}$. La parte principal de la substancia intersideral es el átomo de hidrógeno. Actualmente se considera, que en el cosmos, a cada centímetro cúbico le corresponden unos cuantos átomos de hidrógeno. Si se aumentase la molécula de hidrógeno hasta las dimensiones de un guisante, y se colocase tal «molécula» en Moscú, la «vecina cósmica» próxima estaría en Tula.

Cristales

Muchos se creen que los cristales son piedras preciosas que se encuentran raramente. Éstos son de diferentes colores, generalmente transparentes y, lo más sorprendente es que tienen una forma regular muy bonita. Frecuentemente los cristales representan unos poliedros, cuyas caras son idealmente planas, las aristas son rigurosamente rectas. Éstos alegran la vista con su maravilloso juego de luces en las caras, con su construcción de regularidad asombrosa.

Entre ellos hay cristales sencillos de sal de piedra: cloruro de sodio natural, o sea sal común. Éstos se encuentran en la naturaleza en forma de paralelepípedos rectangulares o de cubos. También es simple la forma de los cristales de la calcita, que representan unos paralelepípedos oblicuos transparentes. Los cristales del cuarzo son mucho más complicados. Cada cristalito tiene un conjunto de caras de diversas formas, que se cortan por aristas de diferente longitud.

Sin embargo, los cristales no son una cosa rara para los museos. Los tenemos por doquier. Son cristales casi todos los cuerpos sólidos con los que, construimos las casas y hacemos las máquinas; las substancias que utilizamos en la vida. ¿Por qué no vemos todo esto? Pues, porque en la naturaleza pocas veces aparecen cuerpos en forma de cristales solitarios, separados (o como se suele decir, monocristalinos). Con más frecuencia se encuentra la substancia en forma de granitos cristalinos unidos, de diminutas dimensiones, menores de una milésima parte de milímetro. Esta estructura se puede ver solamente por el microscopio.

Los cuerpos que se componen de granitos cristalinos se llaman policristalinos («poli» en griego quiere decir «mucho»).

Claro que los cuerpos policristalinos también son cristales. Entonces, resulta que casi todos los cuerpos sólidos que nos rodean son cristales. La arena y el granito, el cobre y el hierro, el salol que se vende en la farmacia y las pinturas, todos son cristales.

También hay excepciones: el vidrio y los plásticos no se componen de cristales. Tales cuerpos sólidos se llaman amorfos.

En resumidas cuentas, estudiar los cristales significa estudiar casi todos los cuerpos que nos rodean. Es comprensible la importancia de esto.

Los cristales solitarios se conocen inmediatamente por su forma regular. Los elementos característicos del cristal son sus caras planas y sus aristas rectas; es indudable que la forma regular está ligada con su estructura interna. Si en alguna dirección, el cristal está alargado de un modo especial, esto significa que la construcción del cristal en esta dirección es singular.

Pero, figúrense que de un cristal grande se ha preparado, en el torno, una bola. ¿Es posible determinar que en las manos tenemos un cristal y diferenciarlo de una bola de vidrio? La forma natural del cristal muestra que éste es diferente en todas las direcciones. Si esta diferencia se manifiesta respecto a la forma, tiene que subsistir también respecto a otras propiedades. La dureza de los cristales, sus propiedades eléctricas, la conductibilidad del calor, todas estas propiedades se pueden diferenciar en diversas direcciones. Esta particularidad del cristal se llama anisotropía. Anisótropo significa diferente en diversas direcciones.

Los cristales son anisótropos. Por el contrario, los cuerpos amorfos, los líquidos y los gases son isótropos, es decir, poseen iguales («iso» en griego quiere decir igual) propiedades en diversas direcciones («tropos» quiere decir dirección).

La anisotropía permite apreciar si un trozo de una substancia transparente sin forma determinada es cristal o no.

Estructura de los cristales

¿Por qué es tan bonita la forma regular del cristal? Sus caras brillantes y llanas tienen tal aspecto como si las hubiese trabajado un pulidor hábil. Las partes separadas del cristal se repiten formando una figura simétrica preciosa.

La respuesta a la pregunta dada puede ser solamente una: la belleza exterior tiene que responder a la regularidad interior. Esta regularidad consiste en la repetición múltiple de las mismas partes principales.

Figúrense una verja de un parque hecha de varitas de diferente longitud y colocadas de cualquier manera. ¡Es un cuadro espantoso! Una verja buena está construida de varitas iguales, colocadas en una sucesión regular, a igual distancia una de otra.

Este mismo cuadro repetido constantemente lo hallamos en el papel de tapizar. Ahora que, aquí, el elemento del dibujo, por ejemplo, una niña jugando a la pelota, no se repite en una sola dirección como en la verja del parque, sino que llena todo el plano.

¿Qué relación tienen la verja del parque y el papel de tapizar con el cristal? La más directa. La verja del parque se compone de eslabones que se repiten a lo largo de una línea; los papeles de tapizar se componen de dibujos que se repiten a lo ancho del plano, y el cristal, de grupos de átomos que se repiten en el espacio. Por eso dicen que los átomos del cristal forman en el espacio una malla (cristalina).

Actualmente se conoce la constitución de muchos centenares de cristales. Veamos la estructura de los cristales más simples y, ante todo, de los que están constituidos de átomos de una especie.

Las mallas más difundidas son de tres tipos. Éstas están representadas en la Fig. 89. Los centros de los átomos están señalados por puntos; las líneas que unen los puntos no tienen sentido real. Están trazadas solamente para que el lector vea con mayor claridad la posición espacial de los átomos.

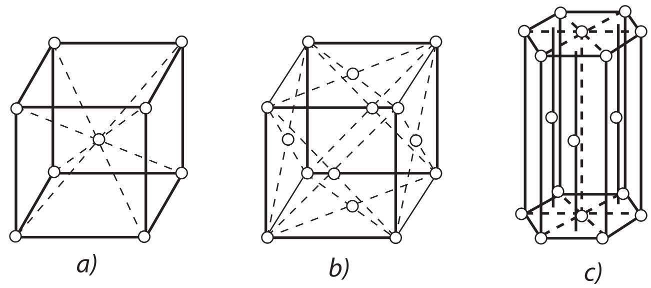


Fig. 89

Las fig. 89, *a* y 89, *b* representan mallas cúbicas. Para tener una idea más clara de estas mallas figúrense que los cubos de los niños se han colocado uno sobre otro, cara con cara, arista con arista.

Si ahora se colocan, mentalmente, puntos en los vértices y en los centros de los cubos, se formará la malla cúbica representada en el dibujo de la izquierda. Esta estructura se llama cúbica de volumen centrado. Si los puntos se colocan en los vértices de los cubos y en los centros de sus caras, se formará una malla cúbica, representada en el dibujo del medio. Ésta se llama cúbica de caras centradas.

La tercera malla (Fig. 89, c) se llama hexagonal compacta. Para comprender el origen de este término y representarnos con mayor claridad la disposición de los átomos en esta malla, tomemos las bolas del billar y comencemos a colocarlas del modo más compacto. Formemos, ante todo, una capa compacta; ésta se parece a las bolas del billar reunidas un «triángulo» al comienzo del juego (Fig. 90).

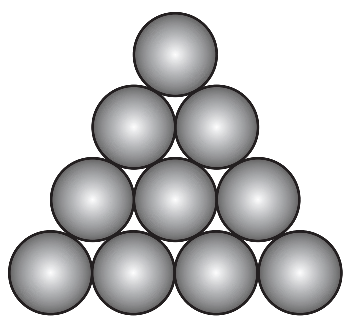


Fig. 90

Notemos que la bola que está dentro del triángulo tiene seis vecinos que están, en contacto con ella, y estos seis vecinos forman un hexágono. Continuemos colocando una capa sobre otra. Si se ponen las bolas de la capa siguiente, directamente, por encima de las bolas de la primera capa, no resultará una estructura compacta. Para colocar el mayor número de bolas posible en un volumen determinado, tendremos que poner las bolas de la segunda capa en los «hoyos» de la primera, las de la tercera, en los «hoyos» de la segunda, etc., etc. En la estructura hexagonal más compacta, las bolas de la tercera capa están colocadas de tal modo, que sus centros están situados sobre los centros de las bolas de la primera etapa.

Los centros de los átomos de la malla hexagonal más compacta, están situados del mismo modo que los centros de las bolas colocadas densamente como acabamos de describir.

En la forma de las tres mallas descritas cristalizan numerosos elementos:

Malla hexagonal compacta	Be, Co, Hf, Ti, Zn, Zr
Malla cúbica de caras centradas	Al, Cu, Co, Fe, Au, Fe, Ni, Ti
Malla cúbica de cubos centrados	Cr, Fe, Li, Mo, Ta, Ti, U, V

De otras estructuras, señalemos solamente unas pocas. En la Fig. 91 está representada la estructura del diamante. Para ella es característico que el átomo del carbono del diamante tiene cuatro vecinos próximos. Confrontemos este número con los números correspondientes de las tres estructuras más difundidas que acabamos de describir. Como se ve en los dibujos, en la malla hexagonal compacta, cada átomo tiene 12 vecinos próximos; la misma cantidad de vecinos tienen los átomos que forman la malla cúbica de caras centradas; en la malla de volumen centrado, cada átomo tiene 8 vecinos.

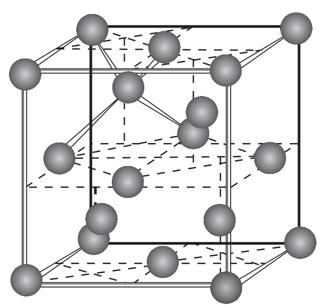


Fig. 91

Digamos unas cuantas palabras sobre el grafito, cuya estructura se enseña en la Fig. 92. La particularidad de esta estructura salta a la vista. El grafito se compone de capas de átomos, de modo que los átomos de una capa están ligados entre sí con más fuerza que los átomos de las capas vecinas. Esto se debe a las magnitudes de las distancias entre los átomos; la distancia entre los vecinos de una capa es 2.5 veces menor que la distancia más corta entre las capas.

La existencia de capas de átomos débilmente ligadas da lugar a que los cristales del grafito se desintegren fácilmente a lo largo de estas capas. Por eso, el grafito sólido puede servir de materia lubricante en los casos en que es imposible emplear la grasa, por ejemplo, cuando las temperaturas son muy bajas o muy altas. El grafito es un material lubricante sólido.

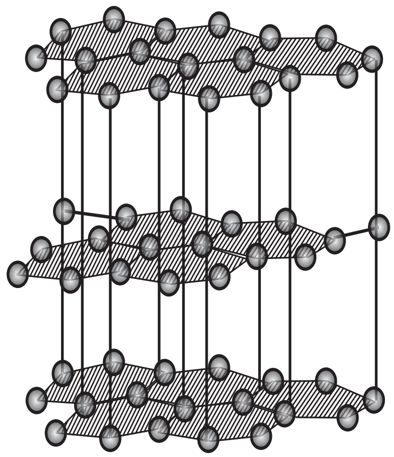


Fig. 92

El rozamiento entre dos cuerpos se reduce, hablando vulgarmente, a que los salientes microscópicos de un cuerpo se introducen en las hondonadas del otro. El esfuerzo necesario para desintegrar el cristalito microscópico del grafito es mucho menor que la fuerza de rozamiento; por eso, la existencia del lubricante grafitado facilita el resbalamiento de un cuerpo sobre otro.

Las variedades de las estructuras de los cristales de las composiciones químicas son infinitas. Como ejemplos extremos, en el sentido de diversidad, pueden servir las estructuras de la sal gema y del bióxido de carbono, representadas en las Fig. 93 y 94.

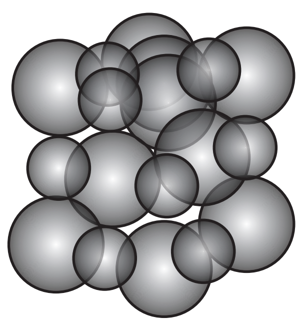


Fig. 93

Los cristales de la sal gema (Fig. 93) se componen de átomos de sodio (las bolas pequeñas oscuras) y de cloro (las grandes claras) alternados a lo largo de los ejes del cubo.

Cada átomo de sodio tiene seis vecinos equidistantes de otra especie. Lo mismo se refiere al cloro. Pero, ¿dónde está la molécula del cloruro de sodio? Aquí no está; en el cristal, no sólo falta el grupo de un átomo de sodio y de un átomo de cloro, sino que, en general, ningún grupo de átomos se destaca entre otros por su aproximación.

La fórmula química $NaCl$ no sirve de fundamento para afirmar que «la substancia se compone de moléculas $NaCl$». La fórmula química solamente indica que la substancia se compone de igual cantidad de átomos de sodio que de cloro.

El problema de la existencia de moléculas en la substancia se resuelve por su estructura. Si en ésta no se destaca ningún grupo de átomos próximos, no hay molécula. Los cristales sin moléculas se llaman atómicos.

El cristal del gas carbónico, CO_2 (hielo seco que llevan en las cajas las vendedoras de helados), es un ejemplo de cristal molecular (Fig. 94).

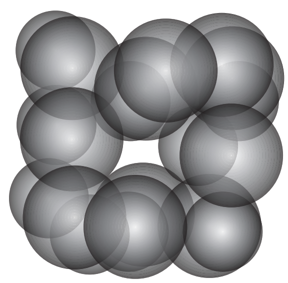


Fig. 94

Los centros de los átomos de oxígeno y de carbono de la molécula CO_2 están situados a lo largo de una línea recta. La distancia $C{-}O$ es igual a 1.3 $\AA$. La distancia entre los átomos de oxígeno de las moléculas vecinas es de unos 3 $\AA$. Está claro que en estas condiciones no «reconocemos» inmediatamente la molécula en el cristal.

Los cristales moleculares representan unas mallas compactas de moléculas. Para ver esto hay que describir los contornos de las moléculas. Esto se ha hecho en la Fig. 94.

XI. Temperatura

El termómetro

Si se ponen en contacto dos cuerpos calentados de diverso modo, el más caliente se irá enfriando y el más frío se irá calentando. Sobre tal par de cuerpos se dice que se intercambian el calor; claro que en la vida no llamamos intercambio al caso en que una persona da a otra cien rublos y la otra los toma; pero así se ha convenido en física.

Como ya se ha dicho, el intercambio de calor es una forma de transmisión de energía; llamamos más caliente al cuerpo que cede la energía. Nosotros sentimos que el cuerpo está caliente, si calienta la mano, o sea, si cede energía. Por el contrario, si sentimos que el cuerpo está frío, esto significa que absorbe energía de nuestro cuerpo.

Sobre un cuerpo que da calor (o sea, que cede energía mediante un intercambio de calor), decimos: su temperatura es más alta que la del cuerpo que absorbe este calor.

Observando si se enfría o se calienta el objeto que nos interesa, en presencia de tal o cual cuerpo, hallaremos para este objeto «su sitio» en la serie de cuerpos calientes. La temperatura es una especie de señal que indica para qué cuerpos el objeto que nos interesa es donador y para qué cuerpos es receptor de calor.

La temperatura se mide con termómetros.

La construcción de los termómetros puede basarse en la utilización de diversas propiedades de los cuerpos sensibles a la temperatura. Frecuentemente se emplea la propiedad de los cuerpos de dilatarse con el aumento de la temperatura.

Si al ponerse en contacto con diversos cuerpos, el cuerpo del termómetro cambia su volumen, esto significa que los cuerpos tienen diferente temperatura. Cuando el volumen del cuerpo del termómetro es mayor, la temperatura es más alta, y cuando el volumen es menor, la temperatura es más baja.

Pueden servir de termómetros los cuerpos más diversos: los líquidos, como el mercurio y el alcohol; los sólidos, como los metales, y los gaseosos. Pero como diversos cuerpos se dilatan de diferente modo, los grados de mercurio, de alcohol y de gas no coincidirán. Claro que siempre se pueden marcar en todos los termómetros dos puntos fundamentales: la temperatura de fusión del hielo y la de ebullición del agua. Por eso, todos los termómetros marcan igual 0 y 100 grados Celsius. Pero entre 0 y 100 grados, los cuerpos se dilatan de diverso modo. Un cuerpo, rápidamente se dilata entre 0 y 50 grados del termómetro de mercurio y lentamente en la segunda parte de este intervalo, mientras que otro cuerpo se comporta al revés.

Preparando termómetros con cuerpos de diferente dilatación, observaremos distinciones notables en sus indicaciones, a pesar de que éstas coinciden en los puntos fundamentales. El termómetro de agua nos ofrecería el siguiente descubrimiento: si un cuerpo enfriado hasta cero grados se coloca en una cocinilla eléctrica, su temperatura, según este termómetro, disminuye primero y aumenta después. La causa de esto estriba en que, al calentarse el agua, primero disminuye su volumen, y sólo después se comporta «normalmente», o sea, aumenta su volumen al calentarse.

Vemos, pues, que una elección no premeditada de la substancia para el termómetro puede conducirnos a un callejón sin salida.

¿En qué hay que basarse entonces para la elección «acertada» del termómetro? ¿Qué cuerpo es ideal para esto?

Sobre tales cuerpos ideales ya hemos hablado. Éstos son los gases ideales. En el gas ideal no hay interacción de las partículas y, observando la dilatación del gas ideal, estudiamos cómo cambia el movimiento de sus moléculas. Precisamente por esto, el gas ideal es un cuerpo ideal para el termómetro.

En efecto, inmediatamente salta a la vista que, a pesar de que el agua se dilata de otro modo que el alcohol, éste de otro modo que el vidrio, y éste de otro modo que el hierro, sin embargo, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno y cualquier otro gas, en estado de enrarecimiento, que es suficiente para merecer la denominación de ideal, se dilatan al calentarse exactamente igual.

De esta forma, de base para determinar en física la temperatura sirve el cambio de volumen de una determinada cantidad de gas. Se sobrentiende que, en vista de la gran compresión de los gases, es necesaria una particular atención para que el gas se encuentre a una presión constante.

Por lo tanto, para graduar un termómetro de gas, tenemos que medir exactamente el volumen del gas que hemos tomado a $0\,^{\circ}C$ y a $100\,^{\circ}C$. La diferencia de volúmenes V_{100} y V_0 la dividimos en 100 partes iguales. Mejor dicho, la variación del volumen del gas en $\dfrac{1}{100}(V_{100} - V_0)$, y corresponde a un grado Celsius ($1\ ^{\circ}C$).

Supongamos ahora que nuestro termómetro señala un volumen V. ¿Qué temperatura corresponde a este volumen? Es fácil calcular que

$$t\,^{\circ}C = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} \cdot 100,$$

o sea,

$$\frac{t\,^{\circ}C}{100} = \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0}.$$

Con esta igualdad, a cada volumen V ponemos en correspondencia la temperatura t y obtenemos la escala de temperaturas que usan los físicos[9].

Al aumentar la temperatura, el volumen del gas crece indefinidamente; no hay ningún límite teórico para el crecimiento de la temperatura. Sin embargo, las temperaturas bajas (negativas en la escala de Celsius) tienen límite.

En efecto, ¿qué ocurre al bajar la temperatura? El gas real, al fin y al cabo, se convierte en líquido, y, a mayor disminución, se solidifica. Las moléculas de gas se reúnen en un pequeño volumen. Pero, ¿a qué será igual este volumen para nuestro termómetro, lleno de gas ideal? Sus moléculas carecen de interacción y no tienen volumen propio. Por lo tanto, la disminución de la temperatura conduce a la anulación del volumen del gas ideal. Un gas real se puede aproximar cuanto se quiera a un estado característico del gas ideal; en este caso, a un volumen cero. Para esto, hay que llenar el termómetro de un gas cada vez más enrarecido. Por consiguiente, no pecaremos contra la verdad, si suponemos que un volumen extremadamente pequeño es igual a cero.

De acuerdo con nuestra fórmula, al volumen igual a cero corresponde la temperatura menor posible. Esta temperatura se llama cero absoluto.

Para determinar la posición del cero absoluto en la escala de Celsius hay que poner, en la fórmula deducida de la temperatura, el valor del volumen igual a cero, $V = 0$. De este modo, la temperatura del cero absoluto es igual a

$$-\frac{100 \cdot V_0}{V_{100} - V_0}.$$

Resulta que este punto extraordinario corresponde aproximadamente a la temperatura de $-273\ ^{\circ}C$ (más exactamente, a $-273.15\ ^{\circ}C$).

Así pues, no hay temperaturas más bajas del cero absoluto; puesto que éstas corresponden a volúmenes negativos de gas. Carece de sentido hablar de temperaturas más bajas. Obtener temperaturas más bajas del cero absoluto es tan imposible como preparar alambre de diámetro menor de cero. Un cuerpo a la temperatura de cero absoluto no se puede enfriar, es decir, no se le puede quitar energía. Mejor dicho, a esta temperatura, el cuerpo y las partículas de que se compone, poseen la energía mínima posible. Esto

[9] La escala de Celsius, en la que por $0\ ^{\circ}C$ se ha tomado la temperatura de fusión del hielo, y por $100\ ^{\circ}C$, la temperatura de ebullición del agua (ambas a presión normal de 760 $mm\ Hg$), es muy cómoda. A pesar de esto, los ingleses y los americanos han empleado hasta ahora una escala de temperaturas que nos parece muy extraña. ¿Cómo, por ejemplo, entender esta frase de una novela inglesa?: “El verano no era caluroso, la temperatura era de $60 - 70$ grados”. ¿Hay alguna equivocación? No, es en la escala de Fahrenheit (^{o}F). En Inglaterra, la temperatura rara vez baja de $-20\ ^{\circ}C$. Fahrenheit tomó como cero la temperatura de una mezcla de hielo con sal que tenía aproximadamente la temperatura mínima de Inglaterra arriba indicada. Por $100\ ^{o}F$, en esta escala, se tomó, según cuenta el autor, la temperatura normal del cuerpo humano. Sin embargo, es probable que, para la determinación de este punto, Fahrenheit se sirviera de un hombre que tenía un poco de fiebre. La temperatura media normal del cuerpo humano en la escala de Fahrenheit corresponde a $98\ ^{o}F$. En esta escala, el agua se congela a $+32\ ^{o}F$ y hierve a $212\ ^{o}F$. La fórmula de conversión de ^{o}F a $^{\circ}C$ es: $t\ ^{\circ}C = \frac{5}{9}\,(t - 32)\ ^{o}F$.

significa que en el cero absoluto la energía cinética es igual a cero y la potencial tiene el valor mínimo posible.

Como el cero absoluto es la temperatura más baja, es natural que en la física y, sobre todo, en sus ramas donde figuran temperaturas bajas, se utilice la escala absoluta de temperaturas, en la que el cálculo se lleva desde el cero absoluto. Está claro que $T_{abs} = (t + 273)$ $^{\circ}C$. En la escala absoluta, la temperatura de la habitación es de unos 300 K. La escala absoluta de temperaturas se llama también escala de Kelvin, en nombre de un célebre sabio inglés del siglo XIX, y en lugar de la notación T_{abs}, se emplea la notación T K.

La fórmula del termómetro de gas que determina la temperatura T, se puede escribir para la temperatura absoluta en la forma:

$$T = 100 \cdot \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} + 273.$$

Aplicando la igualdad $\dfrac{100 \cdot V_0}{V_{100} - V_0} = 273$, obtenemos el resultado simple:

$$\frac{T}{273} = \frac{V}{V_0}.$$

Por lo tanto, la temperatura absoluta es directamente proporcional al volumen del gas ideal.

Para hacer mediciones exactas de las temperaturas, los físicos tienen que valerse de todos los artificios posibles. En un intervalo de temperaturas bastante amplio, los termómetros de mercurio, de alcohol (para el Ártico) y otros, se gradúan según el termómetro de gas. Sin embargo, éste es inversible también para temperaturas muy próximas al cero absoluto (menores de 0.7 K), cuando todos los gases se licuan, y para temperaturas mayores de 600 $^{\circ}C$, cuando los gases atraviesan el vidrio. Para temperaturas muy altas y muy bajas, se emplean otros principios de medición.

En cuanto a los métodos prácticos de medición de temperaturas, éstos son muy numerosos. Tienen gran importancia los dispositivos basados en los efectos eléctricos. Es importante tener en cuenta ahora una cosa: en cualesquiera mediciones de temperaturas tenemos que estar seguros de que la magnitud media coincide por completo con lo que daría la medición de la expansión del gas enrarecido.

Las temperaturas altas se crean en los hornos y en los mecheros. En los hornos de confitería, la temperatura alcanza 220$-$280 $^{\circ}C$. En la metalurgia se emplean temperaturas más altas: los hornos de templar dan una temperatura de 900$-$1000 $^{\circ}C$, el horno de forjar, 1400$-$1500 $^{\circ}C$. En los hornos de fundición de acero, la temperatura alcanza 2000 $^{\circ}C$.

Las temperaturas más altas de hornos se obtienen mediante el arco voltaico (cerca de 5000 $^{\circ}C$). La llama del arco da la posibilidad de «enfrentarse» con los metales más refractarios.

Pero, ¿cuál es la temperatura de la llama del mechero de gas? La temperatura del cono interior azulado de la llama es solamente de 300 $^{\circ}C$. En el cono exterior, la temperatura alcanza hasta 1800 $^{\circ}C$.

En la explosión de la bomba atómica se crean unas temperaturas incomparablemente más altas. Por cálculos indirectos se ha determinado que la temperatura en el centro de la explosión alcanza muchos millones de grados.

En los últimos tiempos se han hecho pruebas para obtener temperaturas ultra altas en instalaciones especiales de laboratorios (Ogra, Zeta), que se construyen en nuestro país y en el extranjero. Se consiguió alcanzar, en un instante cortísimo, temperaturas de dos millones de grados. En la naturaleza también existen temperaturas ultra altas, pero no en la Tierra, sino en otros cuerpos del Universo. En los centros de las estrellas y, en particular, en el centro del Sol, la temperatura alcanza decenas de millones de grados.

Las regiones superficiales de las estrellas tienen una temperatura considerablemente más baja, que no supera los 20 000 ^oC. La superficie del Sol tiene una temperatura de hasta 6000 ^oC.

Teoría del gas ideal

Las propiedades del gas ideal que nos ha proporcionado la definición de la temperatura, son muy sencillas. A temperatura constante se cumple la ley de Boyle–Mariotte: en los cambios de volumen o de presión, el producto pV permanece constante. Siendo constante la presión, el cociente $\frac{V}{T}$ se mantiene inalterable, varíe como quiera el volumen o la temperatura. Es fácil unir estas dos leyes. Está claro que la expresión $p\frac{V}{T}$ se mantiene inalterable cuando es constante la temperatura, pero varían p y V; lo mismo ocurre cuando es constante la presión, pero varían V y T. La expresión $p\frac{V}{T}$ permanece constante no sólo cuando varía cualquier par, sino también cuando varían a la vez las tres magnitudes, p, V y T. Como suele decirse, la ley $p\frac{V}{T} = const$ determina la ecuación del estado del gas ideal.

El gas ideal se ha elegido como substancia del termómetro, porque sus propiedades están ligadas solamente con el movimiento (pero no con la interacción) de las moléculas.

¿Cuál es el carácter de la relación entre el movimiento de las moléculas y la temperatura? Para contestar a esta pregunta hay que hallar la relación entre la presión del gas y el movimiento de sus moléculas.

En un recipiente esférico de radio R están contenidas N moléculas de gas (Fig. 95). Examinemos una molécula cualquiera, por ejemplo, la que se mueve en el momento dado de izquierda a derecha a lo largo de una cuerda de longitud l. No prestemos atención al choque de las moléculas entre sí: tales encuentros no influyen en la presión. Llegando al extremo del recipiente, la molécula choca contra la pared y con la misma velocidad (choque elástico) sale despedida en otra dirección. En el caso ideal, estos recorridos podrían continuar eternamente. Si v es la velocidad de la molécula, cada choque se efectúa cada $\frac{l}{v}$ segundos, o sea, que cada molécula choca $\frac{v}{l}$ veces cada segundo. La lluvia continua de choques N moléculas se funde en una fuerza única de presión.

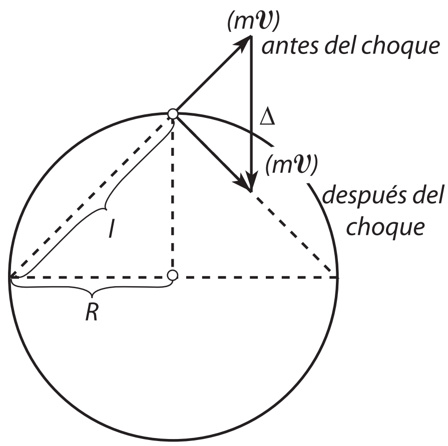


Fig. 95

De acuerdo con la ley de Newton, la fuerza es igual a la variación del impulso por unidad de tiempo. Designemos con Δ la variación del impulso en cada choque. Esta variación ocurre $\frac{v}{l}$ veces cada segundo. Por consiguiente, la aportación de fuerza de una molécula es de $\frac{\Delta}{l}v$.

En la Fig. 95 están construidos los vectores de los impulsos antes y después del golpe, y también el vector del incremento del impulso Δ. De la semejanza de los triángulos que se han formado en la construcción, se deduce que $\frac{\Delta}{l} = \frac{mv}{V}$. La aportación de fuerza de una molécula toma la forma:

$$\frac{mv^2}{R}.$$

Como la longitud de la cuerda no ha entrado en la fórmula, queda claro que las moléculas que se mueven por cualquier cuerda, aportan una misma contribución a la fuerza. Claro que la variación del impulso en un choque oblicuo es menor, pero los choques, en este caso, también son más frecuentes. Los cálculos demuestran que ambos efectos se compensan exactamente.

Como en la esfera hay N moléculas, la fuerza total será igual a

$$\frac{Nmv^2_{media}}{R},$$

donde v_{media} es la velocidad media de las moléculas.

La presión p del gas, que es igual a la fuerza dividida por la superficie de la esfera $4\pi R^2$, será igual a:

$$p = \frac{Nmv^2_{media}}{R4\pi R^2} = \frac{\frac{1}{3}Nmv^2_{media}}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{Nmv^2_{media}}{3V},$$

donde V es el volumen de la esfera.

Por lo tanto,

$$pV = \frac{1}{3}Nmv_{media}^2.$$

Esta ecuación fue deducida por primera vez por Daniel Bernoulli en el año 1738[10].

De la ecuación del estado del gas ideal resultaba que $pV = const. \cdot T$; de la ecuación deducida vemos que pV es proporcional a v_{media}^2. Por lo tanto,

$$T \propto v_{media}^2 \text{ o } v_{media} \propto \sqrt{T},$$

es decir, que la velocidad de las moléculas del gas ideal, es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta.

Ley de Avogadro

Supongamos que una substancia representa una mezcla de moléculas distintas. ¿Existe alguna magnitud física que caracterice el movimiento y que sea igual para todas estas moléculas, por ejemplo, para el hidrógeno y el oxígeno a igual temperatura?

La mecánica da la respuesta a esta pregunta. Se puede demostrar que la energía cinética media del movimiento de traslación $\frac{mv_{media}^2}{2}$ es igual para todas las moléculas.

Esto significa que, siendo conocida la temperatura, los cuadrados de las velocidades medias de las moléculas son inversamente proporcionales a la masa de las partículas:

$$v_{media} \propto \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

Volvamos a examinar de nuevo la ecuación $pV = \frac{1}{3}Nmv_{media}^2$. Como en condiciones de temperaturas dadas, las magnitudes mv_{media}^2 son iguales para todos los gases, el número de moléculas N, contenido en un volumen dado a presión p y a temperatura T determinadas, es igual para todos los gases. Esta ley maravillosa fue enunciada por primera vez por Avogadro.

¿Cuántas moléculas hay en 1 cm^3? Resulta que en 1 cm^3 a 0 ^oC y 760 $mm\ Hg$ hay $2.7 \cdot 10^{19}$ moléculas. Éste es un número colosal. Para poder apreciar lo grande que es, veamos un ejemplo. Supongamos que el gas sale de un recipiente pequeño de 1 cm^3 de volumen con tal velocidad, que en cada segundo se escapa un millón de moléculas. Es fácil calcular que el recipiente se librará totalmente del gas dentro de un millón de años.

La ley de Avogadro señala que, en condiciones dadas de presión y temperatura, la razón del número de moléculas al volumen que ocupan $\frac{N}{V}$, es una cantidad igual para todos los gases.

Como la densidad de los gases $\rho = \frac{N}{V}m$, la razón de las densidades de los gases es igual a la razón de de sus pesos moleculares:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{m_1}{m_2}.$$

[10] Procedente de Suiza, D. Bernoulli trabajó y vivió en Rusia; era académico de Petersburgo. No menos conocidos eran Juan Bernoulli y Jacobo Bernoulli. Los tres eran parientes.

Por esto, los pesos relativos de las moléculas se pueden determinar pesando simplemente las substancias gaseosas. Tales mediciones jugaron en su tiempo un gran papel en el desarrollo de la química y tienen ahora también importancia, cuando hay que hallar el peso molecular de una substancia nueva sintetizada: solamente hay que convertirla en gas sin estrapearla. El aire es una mezcla de gases, y para comparar su densidad con la de otros gases, resulta cómodo introducir el peso molecular medio del aire. Éste es igual a 28.8. Sabiendo este número, es fácil hallar la densidad de diferentes gases con respecto al aire. Por ejemplo, el vapor de agua con un peso molecular de 18, tiene con respecto al aire una densidad igual a $\frac{18}{28.8} = 0.62$.

Velocidades de las moléculas

La teoría enseña que a una misma temperatura, las energías cinéticas medias de las moléculas $\frac{mv^2_{media}}{2}$ son iguales. Con nuestra definición de la temperatura, esta energía cinética media del movimiento de traslación de las moléculas del gas es proporcional a la temperatura absoluta. En forma de igualdad, esta ley importantísima se escribe así:

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{media} = 2.1 \times 10^{-16} T,$$

donde la energía se mide en *ergs*.

Ya vimos anteriormente, que la temperatura es una medida de la intensidad del movimiento térmico. Ahora vemos que la medición de la temperatura con el termómetro lleno de gas ideal, le da a esta medida un significado extraordinariamente simple. La temperatura es proporcional al valor medio de la energía del movimiento de traslación de las moléculas.

Determinemos la velocidad media de las moléculas de oxígeno a la temperatura de la habitación, que en cifras redondas tomaremos por $27\ ^oC = 300\ K$. El peso molecular del oxígeno es 32 y, por lo tanto, el peso de una molécula es igual a $\frac{32}{6} \cdot 10^{23}$. Un cálculo sencillo muestra que $v_{media} = 4.8 \cdot 10^4\ \frac{cm}{seg}$, o sea, cerca de $500\ \frac{m}{seg}$. Con mucha más rapidez se mueven las moléculas de hidrógeno. Sus masas son 16 veces menores y sus velocidades son $\sqrt{16} = 4$ veces mayores, o sea, que a la temperatura de la habitación, alcanzan unos $2\ \frac{km}{seg}$. Calculemos con qué velocidad térmica se mueve una partícula pequeña que se ve por el microscopio. El microscopio ordinario da la posibilidad de ver una partícula de diámetro de 1 micrón ($10^{-4}\ cm$). Si la densidad es aproximadamente la unidad, la masa de tal partícula es de $5 \cdot 10^{-13}\ g$. Para su velocidad obtenemos alrededor de $0.5\ \frac{cm}{seg}$. No es extraño que tal movimiento sea completamente perceptible.

La velocidad del movimiento browniano de un granito de $0.1\ g$ de masa es solamente de $10^{-6}\ \frac{cm}{seg}$. No es sorprendente que no veamos el movimiento browniano de tales partículas.

Hemos hablado de las velocidades medias de las moléculas. Pero no todas las moléculas se mueven con velocidades iguales; una parte de las moléculas se mueve más de prisa y otra parte más despacio. Resulta que todo esto se puede calcular. Expongamos solamente los resultados.

A la temperatura de unos 15 $^{\circ}C$, por ejemplo, la velocidad media de las moléculas del nitrógeno es igual a 500 $\dfrac{m}{seg}$; el 59 % de las moléculas se mueven con velocidades de 300 a 700 $\dfrac{m}{seg}$. Solamente el 0.6 % de las moléculas se mueven con velocidades pequeñas, de 0 a 100 $\dfrac{m}{seg}$.

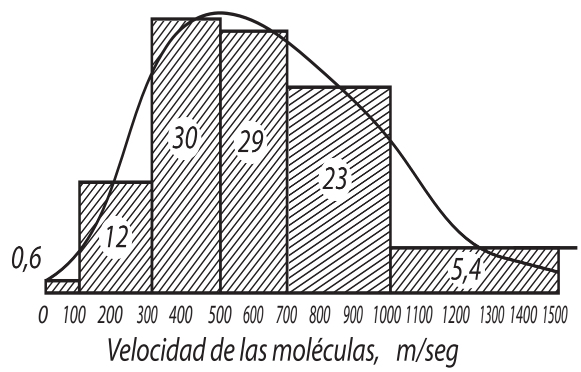


Fig. 96

En el gas sólo hay 5.4 % de moléculas rápidas. Con velocidades mayores de 1000 $\dfrac{m}{seg}$ (Fig. 96).

Se puede calcular la distribución de las moléculas por los diversos valores de la energía del movimiento de traslación.

El número de moléculas, cuya energía supera la media en dos veces, es ya menor del 10 %. La parte de moléculas más «enérgicas» se hace menor a medida que aumenta la energía. Así, las moléculas cuya energía es 4 veces mayor que la media, forman solamente un 0.7 %; aquéllas cuya energía es 8 veces mayor que la media, un $0.06 \cdot 10^{-4}$ %, y las que su energía es 16 veces mayor que la media, un $2 \cdot 10^{-8}$ %.

La energía de las moléculas de oxígeno que se mueven con la velocidad de 11 $\dfrac{km}{seg}$, es igual a $32 \cdot 10^{12}$ ergs. La energía media de la molécula, a la temperatura de la habitación, es igual solamente a $6 \cdot 10^{-14}$ ergs.

Por lo tanto, la energía de una «molécula de once kilómetros de velocidad» es, por lo menos, 500 veces mayor que la molécula de velocidad media. No es extraño, que el porcentaje de moléculas con velocidades mayores de 11 $\dfrac{km}{seg}$ sea un número tan pequeño, que no puede uno ni figurárselo, del orden 10^{-300}.

Pero, ¿por qué nos ha interesado la velocidad de 11 $\dfrac{km}{seg}$? En la pág. 130 decíamos que pueden vencer la fuerza de gravedad de la Tierra solamente los cuerpos que llevan esta velocidad. Esto significa que las moléculas que han subido a gran altura pueden perder el contacto con la Tierra y marcharse a hacer un recorrido interplanetario lejano; pero, para esto, tienen que tener una velocidad de 11 $\frac{km}{seg}$. Como vemos, el porcentaje de tales moléculas rápidas es tan insignificante, que no hay peligro de perder la atmósfera de la Tierra durante miles de millones de años.

La velocidad de escape de la atmósfera depende extraordinariamente de la energía gravitatoria $\gamma\frac{Mm}{r}$. Si la energía cinética media es muchas veces menor que la energía gravitatoria, el desprendimiento de la molécula es prácticamente imposible. En la superficie de la Luna, la energía gravitatoria es 20 veces menor, lo que para la energía de «escape» de la molécula de oxígeno ofrece el valor de $1.5 \cdot 10^{-12}$ ergs. Este valor es superior al valor de la energía cinética media de la molécula solamente en $20 - 25$ veces.

El porcentaje de moléculas que son capaces de separarse de la Luna es igual a 10^{-17}. Esto ya no es lo mismo que 10^{-300}, y el cálculo muestra que el aire se escaparía ligeramente de la Luna al espacio interplanetario. No es extraño que en la Luna no haya atmósfera.

Dilatación térmica

Calentando un cuerpo, el movimiento de los átomos (moléculas) se hace más intenso. Éstos comienzan a empujarse y a ocupar más sitio. Así se explica el hecho conocido de que, al calentarse, los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos se dilatan.

Sobre la dilatación térmica de los gases hay poco que hablar, pues la proporcionalidad de la temperatura al volumen del gas nos sirvió de base para la escala de temperaturas.

En la fórmula $V = \frac{V_0}{273} \cdot T$ se ve que, a presión constante, el volumen del gas aumenta en $\frac{1}{273}$ (o sea, en 0.0037) de su volumen a 0 $°C$, si se calienta en 1 $°C$ (a esta ley la llaman, a veces, ley de Gay Lussac).

En condiciones ordinarias, o sea, a la temperatura de la habitación y siendo normal la presión atmosférica, la dilatación de la mayoría de los líquidos es dos o tres veces menor que la de los gases.

Ya hemos hablado más de una vez sobre la particularidad de la dilatación del agua. Al calentarse desde 0 $°C$ hasta 4 $°C$, el volumen del agua disminuye con la temperatura. Esta peculiaridad en la dilatación del agua juega un papel colosal en la vida de la Tierra. En otoño, a medida que se enfría el agua, las capas superiores frescas se hacen más densas y se sumergen en el fondo. Su puesto lo ocupa el agua más caliente subyacente. Este reemplazamiento del agua se efectúa mientras su temperatura no alcance 4 $°C$. Después, con la disminución de la temperatura, las capas superiores dejan de comprimirse y, por consiguiente, acaban por hacerse menos pesadas y ya no se sumergen al fondo. A partir de esta temperatura, la capa superior, enfriándose lentamente, llega a cero grados y se hiela.

Solamente esta particularidad del agua es la que pone freno a la congelación de los ríos hasta el fondo. Si, por casualidad, el agua perdiese esta peculiaridad admirable, no se necesitaría mucha fantasía para figurarse las consecuencias desastrosas que esto traería.

La dilatación térmica de los cuerpos sólidos es notablemente menor que la de los líquidos; es centenares y millares de veces menor que la de los gases.

En muchos casos, la dilatación térmica suele ser un obstáculo fastidioso. Así, la variación de las dimensiones de las piezas móviles del mecanismo del reloj con el cambio de la temperatura daría lugar a la alteración de la marcha del reloj, si para estas finas piezas no se emplease una aleación especial denominada invar (de la palabra invariante, que significa que no se altera). El invar es un acero con gran contenido de níquel que se emplea mucho en la construcción de instrumentos. Una varilla de invar se alarga solamente en una millonésima parte de su longitud, al variar la temperatura en 1 ^oC.

Una dilatación térmica, al parecer, insignificante de los cuerpos sólidos puede acarrear serias consecuencias. No es fácil impedir la dilatación térmica de los cuerpos sólidos debido a su pequeña compresibilidad.

Al calentar una varilla de acero en 1 ^oC, su longitud aumenta solamente en una cienmilésima parte, o sea, en una magnitud que no se ve a simple vista. Sin embargo, para impedir la dilatación y comprimir la varilla en una cienmilésima parte, se necesita una fuerza de 20 kgf por 1 cm^2. ¡Y esto, solamente para destruir la acción de la elevación de la temperatura en 1 ^oC!

Si no se tienen en cuenta las fuerzas de empuje que se crean debido a la dilatación térmica, éstas pueden producir roturas y catástrofes. Así, para evitar la acción de estas fuerzas, los rieles de la vía férrea se colocan con cierta holgura. Hay que tener presente estas fuerzas, al tratar con vasijas de vidrio que se rajan con facilidad al calentarlas irregularmente. Por eso, en la práctica de laboratorio se usan vasijas de vidrio de cuarzo (el cuarzo fundido es el óxido de silicio que se halla en estado amorfo), que carecen de este defecto. Calentándolas igual, una barra de cobre se alarga en un milímetro, mientras que una de vidrio de cuarzo cambia su longitud en una magnitud que no se ve a simple vista, de 30$-$40 micrones. La dilatación del cuarzo es tan ínfima, que un recipiente de cuarzo calentado a unos cuantos centenares de grados se puede echar al agua sin peligro.

Capacidad calorífica

Es natural que la energía interna del cuerpo dependa de su temperatura. Para calentarlo más, se necesita más energía. Para calentarlo de T_1 a T_2, hay que comunicar al cuerpo una energía Q, en forma de calor, igual a

$$Q = C\,(T_2 - T_1)\,.$$

Aquí, C es un coeficiente de proporcionalidad que se llama capacidad calorífica del cuerpo. De la fórmula se deduce la definición del concepto de capacidad calorífica: C es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura en 1 ^oC. La misma capacidad calorífica depende de la temperatura: el calentamiento de 0 a 1 ^oC, o de 100 a 101 ^oC, necesita diferentes cantidades de calor.

Generalmente, las magnitudes C se relacionan a un gramo y se llaman capacidades caloríficas específicas. En este caso, éstas se indican con la letra minúscula c.

La cantidad de calor que se invierte en el calentamiento de un cuerpo de masa m viene dada por la fórmula:

$$Q = mc\,(T_2 - T_1)\,.$$

En adelante emplearemos el concepto de capacidad calorífica específica, pero, para abreviar, diremos simplemente calor específico.

Los valores de los calores específicos varían en unos límites bastante amplios. Naturalmente, en el calor específico del agua en calorías por grado es igual a 1, por definición.

La mayoría de los cuerpos tienen un calor específico menor que el del agua. Así, la mayoría de los aceites, de los alcoholes y otros líquidos, tienen un calor específico de cerca de 0.5 $\dfrac{cal}{g}$ · grado. El cuarzo, el vidrio, la arena, tienen un calor específico de unos 0.2 $\dfrac{cal}{g}$ · grado. El calor específico del hierro y del cobre es, aproximadamente, de 0.1 $\dfrac{cal}{g}$ · grado. He aquí algunos ejemplos del calor específico de ciertos gases: el del hidrógeno, 3.4 $\dfrac{cal}{g}$ · grado, el del aire, 0.24 $\dfrac{cal}{g}$ · grado.

Por regla general, el calor específico de todos los cuerpos disminuye con la disminución de la temperatura y, para la mayoría de los cuerpos, a temperaturas próximas al cero absoluto, toma valores insignificantes. Así, el calor específico del cobre, a la temperatura de 20 K, es igual solamente a 0.0035; esto es 24 veces menor que a la temperatura de la habitación.

El conocimiento de los calores específicos es muy útil para la solución de diversos problemas sobre la distribución del calor entre los cuerpos.

La diferencia entre el calor específico del agua y del terreno es una de las causas que determinan la diferencia entre el clima marítimo y continental. Teniendo, aproximadamente, cinco veces más calor específico que el terreno, el agua lentamente se calienta, y del mismo modo, lentamente se enfría.

En el verano, el agua, en las regiones litorales, calentándose más despacio que la tierra, enfría el aire; en el invierno, el mar caliente se enfría lentamente y, cediendo calor al aire, suaviza el frío. Es fácil calcular que 1 m^3 de agua de mar, enfriándose en 1 ^oC, calienta 3000 m^3 de aire en 1 ^oC. Por eso, en las regiones del litoral, las oscilaciones de la temperatura y la diferencia entre la temperatura del invierno y del verano no son tan considerables como en las continentales.

Conductibilidad térmica

Cada objeto puede servir de «puente» por el que pasa el calor del cuerpo más caliente al menos caliente.

Tal puente es, por ejemplo, la cucharita del té sumergida en el vaso con té caliente. Los objetos metálicos conducen bien el calor. El extremo de la cucharita sumergida en el vaso se calienta al cabo de un segundo.

Si hay que revolver alguna mezcla caliente, el mango del objeto tiene que ser de madera o de plástico. Estos cuerpos sólidos conducen el calor 1000 veces peor que los metales. Decimos que «conducen el calor», pero con el mismo éxito podíamos decir que «conducen el frío». Claro que las propiedades del cuerpo no se alteran porque el flujo del calor vaya en tal o cual sentido. En los días de mucho frío, tenemos cuidado de no tocar, en la calle, un objeto metálico con la mano desnuda, pero sin miedo cogemos un mango de madera.

Son malos conductores del calor, llamados también aisladores del calor, la madera, el ladrillo, el vidrio, los plásticos. Con estos materiales se hacen las paredes de las casas, de los hornos y de los frigoríficos.

Son buenos conductores todos los metales. Los mejores conductores son el cobre y la plata; éstos conducen el calor dos veces mejor que el hierro.

Claro que no sólo los cuerpos sólidos pueden servir de «puentes» para conducir el calor. Los líquidos también conducen el calor, pero mucho peor que los metales. En conductibilidad del calor, los metales superan a los cuerpos no metálicos sólidos y líquidos en centenares de veces.

Para demostrar la mala conductibilidad del agua, se realiza el siguiente experimento. En el fondo de una probeta con agua se fija un trozo de hielo, y la parte superior de la probeta se calienta con un mechero de gas; el agua empezará a hervir, mientras que el hielo ni siquiera se derrite. Si la probeta fuese de metal y estuviese sin agua, el trozo de hielo comenzaría a derretirse casi inmediatamente. El agua conduce el calor, aproximadamente, doscientas veces peor que el cobre.

Los gases conducen el calor decenas de veces peor que los cuerpos no metálicos. La conductibilidad térmica del aire es 20 000 veces menor que la del cobre.

La mala conductibilidad térmica de los gases da la posibilidad de coger con la mano un trozo de hielo seco, cuya temperatura es de $-78\ {}^oC$, y hasta tener en la palma de la mano una gota de nitrógeno líquido que tiene la temperatura de $-196\ {}^oC$. Si no se aprietan estos cuerpos fríos con los dedos, no habrá ninguna «quemadura». Esto se debe a que, al hervir enérgicamente, la gota de líquido o el trozo de cuerpo sólido se cubre de una «camisa de vapor» y la capa formada de gas sirve de aislador térmico.

El estado esferoidal del líquido (así se llama un estado en que las gotas están envueltas por una capa de vapor) se forma en el caso en que el agua cae en una sartén muy caliente. Una gota de agua hirviendo que ha caído en la palma de la mano quema mucho, a pesar de que la diferencia de temperaturas del agua hirviendo y del cuerpo humano es menor que la diferencia de temperaturas de la mano del hombre y del aire líquido. Como la mano está más fría que la gota de agua hirviendo, el calor se escapa de la gota, la ebullición se termina y, como resultado, no se forma la camisa de vapor.

Es fácil darse cuenta de que el mejor aislador del calor es el vacío. En el vacío no hay propagadores de calor y la conductibilidad térmica es mínima.

Por consiguiente, si queremos crear una defensa del calor, resguardar el calor del frío o el frío del calor, lo mejor es construir una envoltura con paredes dobles y extraer el aire del espacio entre las paredes. Aquí nos encontramos con la siguiente circunstancia curiosa. Si, a medida que se enrarece el gas, se va observando la variación de la conductibilidad térmica, se nota que hasta el mismo momento en que la presión alcanza unos cuantos milímetros de la columna de mercurio, la conductibilidad térmica, prácticamente, no varía, y solamente al pasar al alto vacío se realizan nuestras esperanzas: la conductibilidad térmica disminuye bruscamente.

¿A qué es debido esto?

Para comprender esto hay que procurar representarse claramente en qué consiste el fenómeno de propagación del calor en el gas.

La propagación del calor de un lugar caliente a otros fríos, se efectúa mediante una transmisión de la energía de cada molécula a la vecina. Se comprende que, generalmente, los choques de las moléculas rápidas con las lentas dan lugar a la aceleración de las moléculas que se mueven lentamente y a la retardación de las que se mueven con rapidez. Precisamente esto significa que el lugar caliente se enfría y el frío se calienta.

¿A qué conduce la disminución de la presión en la propagación del calor? Como la disminución de la presión da lugar a la disminución de la densidad, se reduce también el número de encuentros de las moléculas rápidas con las lentas, en los cuales se efectúa la transmisión de energía. Esto rebajaría la conductibilidad térmica. Sin embargo, por otra parte, la disminución de la presión da lugar al aumento de la longitud del recorrido libre de las moléculas que, de este modo, conducen el calor a grandes distancias, y esto contribuye, a su vez, al aumento de la conductibilidad térmica. Los cálculos muestran que ambos efectos se compensan, y la capacidad de conducción del calor no se altera durante cierto tiempo al extraer el aire.

Así será hasta que el vacío se haga tan considerable, que la longitud del recorrido se pueda comparar con la distancia entre las paredes del recipiente. Ahora, la disminución ulterior de la presión ya no puede alterar la longitud del recorrido de las moléculas, que se «mueven» entre las paredes; la reducción de la densidad no se «compensa» y la conductibilidad térmica disminuye con una rapidez que es proporcional a la presión, llegando hasta valores ínfimos al alcanzar el alto vacío. La construcción del termo está basada en la aplicación del vacío. Los termos están muy difundidos y se emplean, no sólo para conservar los alimentos fríos y calientes, sino también para las necesidades de la ciencia y de la técnica. En este caso llevan el nombre de su inventor, denominándose vasos de Dewar. En estos vasos se transporta el aire, el nitrógeno y el oxígeno líquidos. Más adelante explicaremos de qué modo se obtienen estos gases en estado líquido[11].

Convección

Pero si el agua es tan mal conductor del calor, ¿cómo se calienta en la tetera? El aire conduce peor el calor; entonces, no se comprende por qué, en invierno, en todas las partes de la habitación se establece una misma temperatura.

[11] Quien haya visto los balones de los termos, habrá observado que siempre tienen un baño de plata. ¿Por qué? Esto se debe a que la conductibilidad térmica de que hablábamos, no es la única forma de propagación del calor. Existe también otra forma de propagación llamada radiación, de la que se tratará en otro libro. En condiciones ordinarias, ésta es más débil que la conductibilidad térmica, pero, de todos modos, es bastante perceptible. El baño de plata en las paredes del termo sirve para debilitar la radiación.

El agua hierve rápidamente en la tetera a causa de la gravitación terrestre. Las capas inferiores del agua, calentándose, se dilatan, se hacen más ligeras y se elevan, y a su sitio afluye agua fría. El calentamiento rápido se efectúa a causa de la convección (ésta es una palabra latina que significa «mezclar»). No resulta fácil calentar el agua en la tetera situada en un cohete interplanetario.

Sobre otro caso de convección del agua, sin mentar esta palabra, ya habíamos hablado antes, explicando por qué los ríos no se hielan hasta el fondo.

¿Por qué las baterías de la calefacción central se colocan cerca del suelo, mientras que las ventanillas se ponen en la parte superior de la ventana? Posiblemente sería más cómodo abrir la ventanilla si ésta estuviera abajo y, para que las baterías no molestasen, no estaría mal colocarlas bajo el techo.

Si atendiésemos a estos consejos, observaríamos pronto que la habitación no se calentaría con las baterías y que no se ventilaría con la ventanilla abierta.

Con el aire en la habitación ocurre lo mismo que con el agua en la tetera. Cuando se conecta la batería de la calefacción central, el aire de las capas inferiores de la habitación comienza a calentarse. Éste se expande, se hace más ligero y se eleva hacia el techo. A su lugar afluyen capas más pesadas de aire frío. Calentándose, éstas se marchan hacia el techo. De este modo, en la habitación se crea una corriente continua de aire: el aire caliente va de abajo hacia arriba, y el frío, de arriba hacia abajo. Abriendo la ventanilla en invierno, dejamos entrar en la habitación al flujo del aire frío. Éste es más pesado que el de la habitación y tiende hacia abajo, desplazando al aire caliente, que se eleva hacia arriba y se escapa por la ventanilla.

El quinqué arde bien solamente cuando está cubierto de un cristal alto. No hay que creer que el vidrio se necesita sólo para proteger la llama del viento. Incluso cuando hace un tiempo tranquilo, la claridad de la luz aumenta inmediatamente en cuanto se coloca el cristal al quinqué. El papel del cristal consiste en que éste acrecienta el flujo del aire hacia la llama, crea el tiro. Esto es debido a que el aire que está dentro del cristal, escaso de oxígeno, gastado en la combustión, se calienta rápidamente y se escapa hacia arriba, mientras que a su sitio, introduciéndose por los orificios hechos en la mecha del quinqué, afluye el aire limpio frío.

El quinqué arderá mejor cuanto más alto sea el cristal. En efecto, la rapidez con que afluye el aire frío a la mecha depende de la diferencia de los pesos de la columna de aire caliente que está dentro del quinqué y del aire frío que está fuera de él. Cuanto más alta sea la columna de aire, tanto mayor será esta diferencia de pesos, y con ello, la rapidez del intercambio.

Por eso, las chimeneas de las fábricas las hacen altas. Para los fogones de las fábricas, hace falta que haya una afluencia muy intensa de aire, que haya buen tiro. Esto se consigue con las chimeneas altas.

La ausencia de convección en un cohete privado de gravedad, impido la utilización de las cerillas, el empleo del quinqué y de los mecheros de gas; los productos de la combustión ahogan la llama.

El aire es un mal conductor; con su ayuda se puede conservar el calor, pero con una condición: si se evita la convección, el intercambio del aire caliente y frío, que reduce a la nada las propiedades de aislamiento térmico del aire.

La eliminación de la convección se consigue aplicando diversas especies de cuerpos porosos y fibrosos. Dentro de estos cuerpos el aire se mueve con dificultad. Todos los cuerpos semejantes a éstos son buenos aisladores del calor gracias a la propiedad de retener una capa de aire. La conductibilidad de las mismas substancias fibrosas o de las paredes de los poros puede no ser muy pequeña.

Es bueno el abrigo de una piel espesa que contiene gran cantidad de fibras; el edredón permite preparar sacos de dormir calientes, que pesan menos de medio kilo, debido a la finura extraordinaria de sus fibras. Medio kilo de este plumón puede «retener» tanto aire, como una decena de kilogramos de guata.

Para disminuir la convección se emplean marcos dobles en las ventanas. El aire contenido entre los cristales no participa en la circulación de las capas de aire de la habitación.

Y viceversa, todo movimiento de aire acrecienta el intercambio y aumenta la transmisión del calor. Precisamente por esto, cuando nos hace falta que el calor se marche cuanto antes, nos abanicamos o conectamos el ventilador. Por eso, donde sopla el viento, hace más frío. Pero, si la temperatura del aire es más alta que la de nuestro cuerpo, el intercambio da lugar a un resultado inverso y el viento se siente como una respiración caliente.

El problema de la caldera de vapor consiste en obtener, con la mayor rapidez posible, vapor caliente a la temperatura necesaria. Para esto no es suficiente la convección natural en el campo de gravedad. Por eso, la creación de una circulación intensa del agua y del vapor, que de lugar al intercambio de las capas calientes y frías, es uno de los problemas fundamentales en la construcción de las calderas de vapor.

XII. Estados de la substancia

Vapor de hierro y aire sólido

¿Verdad que es muy extraña esta combinación de palabras? Sin embargo, esto no es una tontería; el vapor de hierro y el aire sólido existen en la naturaleza, pero no en las condiciones ordinarias.

¿De qué condiciones se trata? El estado de la substancia se determina por dos circunstancias: por la temperatura y por la presión.

Nuestra vida transcurre en condiciones relativamente poco variables. La presión del aire oscila entre los límites de un pequeño tanto por ciento, alrededor del valor de una atmósfera ($1\ \frac{kgf}{cm^2}$); por ejemplo, la temperatura del aire en Moscú, varía en el intervalo de $-30\ ^{\circ}C$ hasta $+30\ ^{\circ}C$; en la escala absoluta de temperaturas, en la que por cero se ha tomado la temperatura más baja posible ($-273\ ^{\circ}C$), este intervalo tiene un aspecto menos imponente: $240-300\ K$, que también forma solamente $10\,\%$ de la magnitud media.

Naturalmente estamos acostumbrados a estas condiciones ordinarias y, por eso, expresando las perogrulladas como: «el hierro es un cuerpo sólido, el aire es un gas», etc., nos olvidamos de agregar: «en condiciones normales».

Calentando el hierro, primeramente se funde y después se evapora. Si se enfría el aire, primero se convierte en líquido y luego se solidifica.

Es probable que hasta el lector que no haya visto nunca el vapor de hierro y el aire sólido, nos creerá sin ningún reparo, ya que, cambiando la temperatura, se puede obtener el estado sólido, líquido y gaseoso, o como también suele decirse la fase sólida, líquida o gaseosa de cualquier substancia.

Creer en esto es fácil, porque hay una substancia sin la cual la vida en la Tierra sería imposible, que todos la han observado en forma de gas, de líquido y de cuerpo sólido. Se trata, naturalmente, del agua.

Pero, ¿en qué condiciones se efectúan las transformaciones de la substancia de un estado a otro?

Ebullición

Si se sumerge el termómetro en el agua que está en la tetera, se conecta el hornillo eléctrico y se observa el comportamiento del mercurio en el termómetro, se verá lo siguiente: el nivel del mercurio inmediatamente sube. Ya llega a los $90\ ^{\circ}C$, a los $95\,^{\circ}C$, y, por fin, a los 100 $^{\circ}C$. El agua empieza a hervir y, a la vez, acaba el ascenso del mercurio. Ya hierve el agua muchos minutos, pero el nivel del mercurio no se altera. Hasta que no se evapore todo el agua, la temperatura no se alterará (Fig. 97).

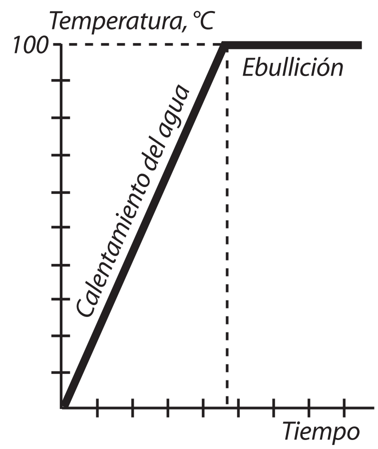


Fig. 97

¿En qué se gasta el calor, si la temperatura del agua no varía? La contestación es evidente, ya que el proceso de transformación del agua en vapor necesita energía.

Comparemos la energía de un gramo de agua y de un gramo del vapor que se ha formado de ella. Las moléculas del vapor están situadas más lejos una de otra que las moléculas de agua. Se comprende, por esto, que la energía potencial del agua se va a diferenciar de la energía potencial del vapor.

La energía potencial de las partículas que se atraen disminuye a medida que se acercan. Por eso, la energía del vapor es mayor que la del agua y la transformación del agua en vapor necesita energía. Este exceso de energía es la que transmite el hornillo eléctrico al agua que hierve en la tetera.

La energía que se necesita para convertir el agua en vapor se llama calor de vaporización. Para convertir $1\,g$ de agua en vapor se necesitan 539 cal (para la temperatura de 100 $^{\circ}C$).

Si se necesitan 539 cal para $1\,g$, para 1 molécula–gramo de agua se gastarán $18 \cdot 539 = 9700$ cal. Esta cantidad de calor hay que gastarla para romper las ligazones entre las moléculas.

Se puede comparar este número con la magnitud del trabajo que se necesita para romper las ligazones intermoleculares. Para disociar en átomos una molécula–gramo de vapor de agua se necesitan cerca de 220 000 cal, o sea, una energía 25 veces mayor. Esto demuestra claramente la debilidad de las fuerzas que unen las moléculas unas con otras, en comparación con las fuerzas que mantienen unidos los átomos en la molécula.

Dependencia de la temperatura de ebullición de la presión

La temperatura de ebullición del agua es igual a 100 ^oC; puede creerse que ésta es una propiedad intrínseca del agua, que en las condiciones que esté, el agua siempre hervirá a 100 ^oC.

Pero esto no es así, y esto lo saben perfectamente los que viven en los pueblos situados a alturas considerables sobre el nivel del mar.

Cerca del vértice del Elbruz hay una casita para los turistas y una estación científica. A veces, los que la visitan por primera vez, se extrañan de lo «difícil que es cocer un huevo en el agua hirviendo», o «por qué el agua hirviendo no quema». En estos casos se les indica que el agua hierve en el vértice del Elbruz a los 82 ^oC.

¿Qué es lo que ocurre? ¿Qué factor físico se inmiscuye en el fenómeno de la ebullición? ¿Qué importancia tiene la altura sobre el nivel del mar?

Este factor físico es la presión que actúa sobre la superficie del líquido. No hay que subir a la cumbre de la montaña para comprobar que lo dicho es cierto.

Colocando bajo una campana el agua que se calienta e introduciendo o extrayendo el aire de ella, puede convencerse uno de que la temperatura de ebullición sube al aumentar la presión y baja al disminuir.

El agua hierve a 100^oC solamente a una presión determinada: de 760 $mm\ Hg$.

En la Fig. 98 se muestra la curva de la temperatura de ebullición en dependencia de la presión. En la cumbre del Elbruz, la presión es igual a 0.5 atm; a esta presión corresponde la temperatura de ebullición de 82 ^oC.

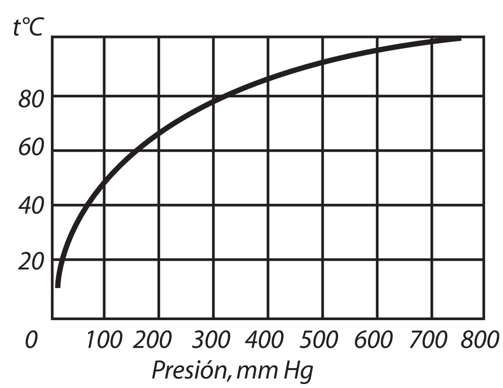


Fig. 98

Con agua que hierve a 10−15 $mm\ Hg$ se puede refrescar uno en un día de calor. A esta presión, la temperatura de ebullición baja hasta 10−15 ^oC.

Se puede obtener también «agua hirviendo» que tenga la temperatura del agua que se congela. Para eso, habrá que bajar la presión hasta 4.6 $mm\ Hg$.

Se puede observar un cuadro muy interesante, si se coloca bajo una campana un recipiente abierto con agua y se extrae el aire. La extracción obliga al agua a hervir, pero la ebullición necesita calor. Como no hay de donde tomarlo, el agua no tiene más remedio que ceder su energía, La temperatura del agua hirviendo empieza a bajar, pero como continúa la extracción, baja también la presión. Por lo tanto, la ebullición no se detiene, a pesar de que el agua continúa enfriándose, llegando, al fin y al cabo, a congelarse.

No sólo al extraer el aire se efectúa esta ebullición del agua fría. Por ejemplo, al girar la hélice de un barco, disminuye con rapidez la presión de la capa de agua que se mueve ligeramente cerca de la superficie metálica y, en esta capa, el agua hierve, es decir, se forma en ella una cantidad numerosa de burbujas llenas de vapor. Este fenómeno se llama cavitación (de la palabra latina cavitas que quiere decir cavidad).

Bajando la presión, se baja la temperatura de ebullición. ¿Y elevándola? Una gráfica, semejante a la nuestra, responde así a esta pregunta: la presión de 15 atm puede detener la ebullición del agua, ésta empieza sólo a los 200 ^oC; la presión de 80 atm obliga al agua a hervir solamente a los 300 ^oC.

Resumiendo, a una presión exterior determinada corresponde una temperatura determinada de ebullición. Pero esta afirmación se puede «invertir», diciendo: a cada temperatura de ebullición del agua corresponde una presión determinada. Esta presión se llama elasticidad del vapor o presión de vapor.

La curva que representa la temperatura de ebullición en dependencia de la presión, es, al mismo tiempo, la curva de elasticidad del vapor en dependencia de la temperatura.

Los números marcados en el diagrama de la temperatura de ebullición (o en el diagrama de la elasticidad del vapor) muestran que la elasticidad del vapor varía muy bruscamente con la alteración de la temperatura. A 0 ^oC. (o sea, a 273 K) la elasticidad del vapor es igual a 4.6 $mm\ Hg$; a 100 ^oC. (373 K), es igual a 760 $mm\ Hg$; es decir, aumenta en 165 veces. Al elevar la temperatura haciéndola dos veces mayor (desde 0 ^oC, es decir, 273 K, hasta 273 ^oC, es decir, 546 K), la elasticidad del vapor aumenta desde 4.6 $mm\ Hg$ casi hasta 60 atm, o sea, aproximadamente, en 10 000 veces.

Por el contrario, la temperatura de ebullición varía con la presión con bastante lentitud. Al doblar la presión, elevándola desde 0.5 atm hasta 1 atm, la temperatura de ebullición aumenta desde 82 ^oC (o sea, 355 K) hasta 100 ^oC (o sea, 373 K) y, al doblarla otra vez, elevándola desde 1 atm hasta 2 atm esta temperatura aumenta desde 100 ^oC (o sea, 373 K) hasta 120 ^oC (o sea, 393 K).

La misma curva que ahora examinamos es la que regula la condensación del vapor en agua.

Se puede convertir el vapor en agua, bien por compresión, bien por enfriamiento.

Tanto en la ebullición como en el proceso de la condensación, el punto no se mueve de la curva hasta que no termine por completo la transformación del vapor en agua o del agua en vapor. Esto también se puede enunciar así: en las condiciones de nuestra curva, y sólo en estas condiciones, pueden coexistir el líquido y el vapor. Si, en este caso, no se comunica y no se quita calor, las cantidades de vapor y de líquido en el recipiente cerrado se mantienen inalterables. Se dice que este vapor y líquido están en equilibrio, y se llama saturado el vapor que está en equilibrio con su líquido.

Como vemos, la curva de ebullición y condensación tiene también otro significado: es la curva de equilibrio del líquido y del vapor. La curva de equilibrio divide el campo del diagrama en dos partes. A la izquierda y arriba (hacia mayores temperaturas y menores presiones) está situada la región estable del vapor. A la derecha y abajo, la región estable del líquido.

La curva de equilibrio del vapor−líquido, o sea, la curva de dependencia de la temperatura de ebullición de la presión, o, lo que es lo mismo, de la elasticidad del vapor de la temperatura, es aproximadamente igual para todos los líquidos. En unos casos, la alteración puede ser un poco más brusca, en otros, un poco más lenta, pero la elasticidad del vapor siempre crece rápidamente con el aumento de la temperatura.

Ya hemos empleado muchas veces las palabras «gas» y «vapor». Estas dos palabras son bastante equivalentes. Se puede decir: el gas acuoso es el vapor de agua, el gas de oxígeno es el vapor del líquido de oxígeno. A pesar de todo, al utilizar estas dos palabras, se ha establecido una costumbre. Como estamos acostumbrados a un intervalo de temperaturas determinado y relativamente pequeño, la palabra «gas» la empleamos generalmente para las substancias, cuya elasticidad del vapor, a temperaturas ordinarias, es mayor que la presión atmosférica. Por el contrario, hablamos de vapor, cuando, a la temperatura de la habitación y a la presión atmosférica, la substancia es más estable en forma de líquido.

Evaporación

La ebullición es un proceso rápido, y en corto tiempo no queda ni huella del agua hirviendo, pues se convierte en vapor.

Pero existe también otro fenómeno de transformación del agua u otro líquido en vapor, éste es el de evaporación. La evaporación se efectúa a cualquier temperatura, independientemente de la presión, que en condiciones ordinarias siempre es de unos 760 $mm\ Hg$. La evaporación, a diferencia de la ebullición, es un proceso muy lento. El frasco de colonia que nos olvidamos de tapar, queda vacío al cabo de unos días; más tiempo se mantendrá el agua en un plato, pero tarde o temprano, éste también quedará seco.

En el proceso de evaporación juega un gran papel el aire. Éste, de por sí, no molesta a la evaporación del agua. En cuanto abrimos la superficie del líquido, las moléculas de agua empiezan a pasar a la capa más cercana de aire. La densidad del vapor empieza a crecer en esta capa; dentro de poco tiempo, la presión del vapor se hace igual a la elasticidad, característica para la temperatura del medio ambiente. Con esto, la elasticidad del vapor será exactamente igual que cuando no haya aire.

Claro que el paso del vapor al aire no quiere decir que aumente la presión. La presión total en el espacio sobre la superficie acuática no aumenta, solamente se eleva la parte de esta presión que toma el vapor y, respectivamente, disminuye la parte de aire que es desalojada por el vapor.

Sobre el agua hay vapor mezclado con aire; más arriba están las capas de aire sin vapor. Éstas, inevitablemente, se mezclan. El vapor de agua irá subiendo continuamente a las capas más altas y, a su sitio, a la capa inferior, afluirá el aire que no contiene moléculas de agua. Por eso, en la capa más cercana al agua, se irán librando todo el tiempo sitios para nuevas moléculas de agua. El agua se evaporará continuamente, manteniendo la presión del vapor de agua en la superficie, igual a la de la elasticidad, y el proceso continuará hasta que no llegue a evaporarse toda el agua.

Hemos comenzado con el ejemplo de la colonia y el agua. Bien se sabe que estos cuerpos se evaporan con rapidez distinta. Exclusivamente volátil es el éter; con bastante rapidez se evapora el alcohol, y mucho más lentamente, el agua. En seguida comprenderemos de qué se trata, si hallamos en una guía los valores de elasticidad de estos líquidos, por ejemplo, a la temperatura de la habitación. He aquí estos valores: para el éter, 437 $mm\ Hg$; para el alcohol, 44.5 $mm\ Hg$, y para el agua, 17.5 $mm\ Hg$.

Cuanto mayor sea la elasticidad, tanto más vapor habrá en la capa contigua de aire y con tanta mayor rapidez se evaporará el líquido. Ya sabemos que la elasticidad del vapor crece con el aumento de la temperatura. Es comprensible por qué aumenta la velocidad de la evaporación con el calentamiento.

También se puede influir en la velocidad de evaporación de otro modo. Si queremos facilitar la evaporación, tenemos que separar más rápidamente el vapor del líquido, es decir, tenemos que acelerar la mezcla del aire. Precisamente por esto, soplando, se acelera mucho la evaporación. El agua se disipa con bastante rapidez si se pone el plato al viento, a pesar de que posee, relativamente, poca elasticidad de vapor.

Es comprensible por esto, por qué siente frío en el viento el nadador que acaba de salir del agua. El viento acelera la mezcla del aire con el vapor y, por lo tanto, acelera la evaporación; el cuerpo del hombre está obligado a entregar su calor para la evaporación.

Una persona se siente mejor o peor, según que en el aire haya más o menos vapores de agua. El aire seco, así como el aire húmedo, son desagradables. La humedad se considera normal, cuando es igual a 60 %. Esto significa que la densidad del vapor de agua forma e1 60 % de la densidad del vapor de agua saturado a la misma temperatura.

Si se va enfriando el aire, la presión de los vapores de agua, al fin y al cabo, se hace igual a la elasticidad del vapor a esta temperatura. El vapor se satura y al continuar bajando la temperatura empezará a condensarse en agua. El rocío de la mañana que humedece la hierba y las hojas aparece precisamente gracias a este fenómeno.

La densidad de los vapores saturados de agua a 20 $^{\circ}C$ es aproximadamente de 0.00002 $\dfrac{g}{cm^2}$. Nosotros nos sentiremos bien, si los vapores de agua en el aire forman el 60 % de este número, que es, por consiguiente, un poco más de una cienmilésima parte de gramo en 1 cm^3.

A pesar de que este número es pequeño, para una habitación esto representa cantidades respetables de agua. No es difícil calcular, que en una habitación de 12 m^2 de área y de 3 m de altura, puede «caber» cerca de un kilogramo de agua en forma de vapor saturado.

Por lo tanto, si tal habitación se cerrase herméticamente, y se pusiese una barrica abierta de agua, la evaporación sería de un litro de agua, sea cual fuere la capacidad de la barrica.

Es interesante comparar este resultado para el agua con los datos correspondientes para el mercurio. A la misma temperatura de 20 $^{\circ}C$, la densidad del vapor saturado de mercurio es de $10^{-8}\ \dfrac{g}{cm^3}$. En la habitación que acabamos de citar, no habría más de 1 g de mercurio.

A propósito, los vapores de mercurio son muy venenosos y 1 g de estos vapores puede perjudicar seriamente la salud de cualquier persona. Trabajando con mercurio hay que procurar que no se vierta ni siquiera la más pequeña gota.

Temperatura crítica

¿Cómo convertir el gas en líquido? El diagrama de la ebullición responde a esta pregunta. Se puede convertir el gas en líquido, bien disminuyendo la temperatura, bien aumentando la presión.

En el siglo XIX, el aumento de la presión suponía un problema más fácil que la disminución de la temperatura. A comienzos de este siglo, el célebre físico inglés Michael Faraday, logró comprimir los gases hasta los valores de elasticidad de los vapores y, de este modo, consiguió convertir en líquidos muchos gases (el cloro, el gas carbónico, etc.).

Sin embargo, no se conseguía comprimir algunos gases, como el hidrógeno, el nitrógeno y el oxígeno. Por mucho que se aumentara la presión, no se convertían en líquido. Era obvio creer que el oxígeno y otros gases no podían licuarse y los llamaron gases verdaderos o constantes.

En realidad, los fracasos eran debidos a la incomprensión de una circunstancia importante.

Veamos el líquido y el vapor en estado de equilibrio y reflexionemos sobre lo que ocurrirá con ellos al aumentar la temperatura de ebullición y, naturalmente, al aumentar la presión correspondiente. Mejor dicho, figurémonos que en el diagrama de la ebullición, el punto se mueve hacia arriba a lo largo de la curva. Está claro que al elevarse la temperatura, el líquido se dilata y su densidad disminuye. En cuanto al vapor, es natural que, al aumentar la temperatura de ebullición, se facilite su expansión, pero, como ya dijimos, la presión del vapor saturado crece con mucha mayor rapidez que la temperatura de ebullición. Por eso, no disminuye la densidad del vapor, sino que, por el contrario, crece rápidamente con el aumento de la temperatura de ebullición.

Como la densidad del líquido disminuye, mientras que la densidad del vapor aumenta, moviéndose hacia «arriba» por la curva de ebullición, inevitablemente llegaremos a tal punto, en el que se igualen las densidades del líquido y del vapor (Fig. 99).

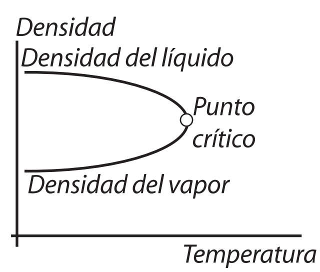


Fig. 99

En este punto extraordinario, llamado crítico, se interrumpe la curva de evaporación. Como todas las diferencias entre el gas y el líquido están ligadas a la diferencia de densidad, en el punto crítico resultan ser iguales las propiedades del líquido y del gas. Cada substancia tiene su temperatura crítica y su presión crítica. Así, para el agua, el punto crítico corresponde a la temperatura de 374 ^oC y a la presión de 218.5 atm.

Si se comprime un gas, cuya temperatura es menor que la crítica, el proceso de compresión se representará con una flecha que corta a la curva de ebullición (Fig. 100). Esto significa que en el momento en que la presión se haga igual a la elasticidad del vapor (punto de intersección de la flecha con la curva de ebullición), el gas comenzará a condensarse en líquido. Si nuestro recipiente fuese transparente, en este momento veríamos el comienzo de la formación de la capa de líquido en el fondo del recipiente. Siendo constante la presión, la capa de líquido irá creciendo hasta que, por fin, se convierta todo el gas en líquido. Para la compresión ulterior, se necesita ya un aumento de la presión.

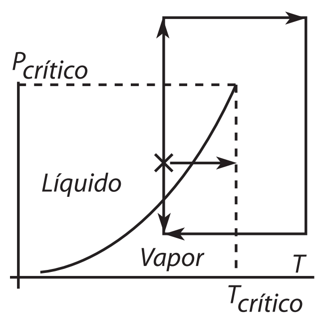


Fig. 100

Otra cosa completamente distinta ocurre al comprimir el gas, cuya temperatura es mayor que la crítica. El proceso de compresión se puede representar de nuevo en forma de una flecha que va de abajo hacia arriba. Pero ahora, esta flecha no se corta con la curva de ebullición. Por lo tanto, al comprimirse, el gas no se condensa, sino que se va haciendo continuamente más compacto.

A la temperatura mayor de la crítica, es imposible la existencia de líquido y gas separados por la frontera de división. Al comprimir hasta cualesquiera densidades, bajo el émbolo habrá una substancia homogénea y será difícil decir cuando se la puede llamar gas y cuándo líquido.

La existencia del punto crítico muestra que, en principio, no hay ninguna diferencia entre el estado líquido y gaseoso. A primera vista podría creerse que tal diferencia en principio existe solamente en el caso en que se trata de temperaturas mayores de la crítica. Sin embargo, esto no es así. La existencia del punto crítico señala la posibilidad de convertir el líquido —el verdadero líquido, que se puede verter en un vaso— en gas, sin recurrir a nada semejante a la ebullición.

Este camino de transformación se muestra en la Fig. 100. Con una cruz se señala el líquido verdadero; Si se rebaja un poco la presión (la flecha hacia abajo), hervirá; también hervirá si se eleva un poco la temperatura (la flecha hacia la derecha). Pero nosotros obraremos de otro modo. Comprimiremos fuertemente el líquido hasta una presión mayor de la crítica. El punto que representa el estado líquido subirá verticalmente. Después calentaremos el líquido: este proceso se representará por una línea horizontal. Ahora, después de hallarnos a la derecha de la temperatura crítica, bajamos la presión hasta el valor inicial. Si se disminuye ahora la temperatura, se puede obtener verdadero vapor, que se podía haber obtenido de este líquido de un modo más simple y breve.

Por consiguiente, cambiando la presión y la temperatura, evitando el punto crítico, siempre se puede obtener vapor mediante un paso continuo del líquido, o bien, líquido a partir del vapor. Para tal paso continuo no se necesita ni ebullición ni condensación.

Las primeras pruebas de licuación de los gases, como el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno, no tuvieron éxito, porque no se conocía la existencia de la temperatura crítica. Las temperaturas críticas de estos gases son muy bajas: la del nitrógeno es de $-147\ ^oC$; la del oxígeno, de $-119\,^oC$; la del hidrógeno, de $-240\,^oC$, o bien, $33\ K$. El helio bate el récord, su temperatura crítica es igual a $4.3\ K$. Convertir estos gases en líquido se puede solamente de un modo: haciendo descender sus temperaturas más abajo de las indicadas.

Obtención de bajas temperaturas

De diversos modos se puede conseguir una disminución esencial de la temperatura. Pero la idea de todos estos métodos es la misma: hay que obligar al cuerpo que queremos enfriar a gastar su energía interna.

¿Cómo hacer esto? Uno de los métodos consiste en hacer hervir al líquido sin comunicarle calor del exterior. Como ya sabemos, para eso, hay que disminuir la presión, reducirla al valor de la elasticidad del vapor. El calor que se consume en la ebullición va a ser extraído del líquido, y la temperatura del líquido y del vapor, y junto con ella la elasticidad del vapor, irán disminuyendo. Por eso, para que no cese la ebullición y se efectúe con mayor rapidez, hay que aspirar continuamente el aire del recipiente en que está el líquido.

Sin embargo, este proceso de rebajamiento de la temperatura tiene un límite: la elasticidad del vapor se reduce, al fin y al cabo, a un valor insignificante, y la presión necesaria no la pueden crear incluso las bombas aspirantes más potentes.

Para continuar la disminución de la temperatura se puede enfriar el gas con el líquido obtenido y convertirlo en líquido con una temperatura de ebullición más baja. Ahora se puede repetir el proceso de aspiración con la segunda substancia y, de este modo, obtener temperaturas más bajas. En caso de necesidad, se puede alargar este método de «cascada» para la obtención de temperaturas bajas.

Precisamente de este modo obraron al fin del siglo pasado; la licuación de los gases la efectuaban por escalones: transformaban sucesivamente en líquido el etileno, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, que son substancias con temperaturas de ebullición de $-103\ ^oC$, $-183\ ^oC$, $-196\ ^oC$ y $-253\ ^oC$. Disponiendo de hidrógeno líquido, se puede obtener el líquido de ebullición más baja, el helio ($-269\ ^oC$). El vecino de la «izquierda» ayudaba a obtener el vecino de la «derecha».

El método de enfriamiento de cascada tiene cerca de cien años. Con este método, en el año 1877 se obtuvo el aire líquido. En los años 1884−1885 fue obtenido por primera vez el hidrógeno líquido. Por fin, veinte años después, se tomó la última fortaleza: en el año 1908, en la ciudad holandesa Leyden, Kamerlingh Onnes convirtió en líquido el helio, que es la substancia de temperatura crítica más baja. No hace mucho que se celebró el 50 aniversario de este importante descubrimiento científico.

Durante muchos años el laboratorio de Leyden era el único laboratorio de «temperaturas bajas». Ahora en todos los países existen decenas de tales laboratorios, sin contar las fábricas que producen aire líquido para fines técnicos.

El método de cascadas de obtención de bajas temperaturas se emplea actualmente poco. En las instalaciones técnicas, para bajar la temperatura, se emplea otro método de disminución de la energía interna del gas: se hace que el gas se expanda rápidamente y que efectúe trabajo a cuenta de la energía interna.

Si, por ejemplo, se dirige el aire, comprimido hasta unas cuantas atmósferas, hacia el expansor, al efectuar el trabajo de desplazamiento del émbolo o de rotación de la turbina, el aire se enfría tan bruscamente, que se convierte en líquido. Si se despide rápidamente el gas carbónico de un balón, resulta un enfriamiento tan repentino, que inmediatamente se convierte en «hielo».

Los gases líquidos se emplean ampliamente en la técnica. El oxígeno líquido se usa en la técnica de las explosiones, como componente de la mezcla combustible en los motores de reacción.

La licuación del aire se emplea en la técnica para la separación de los gases que componen el aire, de lo cual se hablará más abajo.

La temperatura del aire líquido se usa ampliamente en diversas ramas de la técnica. Pero para muchas investigaciones físicas, esta temperatura no es suficientemente baja. En efecto, si se traducen los grados de Celsius a la escala absoluta, se ve que la temperatura del aire líquido es, aproximadamente, $\frac{1}{3}$ de la temperatura de la habitación. Mayor interés para los físicos tienen las temperaturas de «hidrógenos», o sea, las temperaturas de unos $14-20\ K$ y, particularmente, las temperaturas de los «helios». La temperatura más baja que se obtiene al extraer el helio líquido es de $0.7\ K$.

Los físicos consiguieron acercarse mucho más al cero absoluto. Actualmente se han obtenido temperaturas que se acercan al cero absoluto en unas cuantas milésimas de grado. Sin embargo, estas temperaturas muy bajas se obtienen con métodos que no se parecen a los que hemos descrito anteriormente.

Vapor sobrecongelado y líquido sobrecalentado

Al pasar la temperatura de ebullición, el vapor tiene que condensarse, convertirse en líquido. Sin embargo, resulta que, si el vapor no está en contacto con el líquido, y si el vapor es muy limpio, se puede obtener vapor sobrecongelado o sobresaturado, o sea, vapor que ya hace tiempo que tenía que ser líquido.

El vapor sobresaturado es muy inestable. A veces, es suficiente un golpe o un granito lanzado al espacio ocupado por el vapor para que comience inmediatamente la condensación retardada.

El experimento muestra que la condensación de las moléculas de vapor puede facilitarse bruscamente, introduciendo pequeñas partículas extrañas en el vapor. En el aire polvoriento no se efectúa la sobresaturación del vapor de agua. Se puede provocar la condensación con una nube de humo, pues éste se compone de pequeñas partículas sólidas. Cayendo en el vapor, estas partículas reúnen a su alrededor las moléculas, se convierten en centros de condensación.

Así pues, aunque en estado inestable, el vapor puede existir en las regiones de temperaturas adecuadas para la «vida» del líquido.

¿Puede «vivir» el líquido, en estas mismas condiciones, en las regiones de vapor? O bien, de otro modo, ¿se puede sobrecalentar el líquido?

Resulta que se puede. Para esto hay que conseguir que no se separen las moléculas del líquido de su superficie. Un medio radical consiste en liquidar la superficie libre, es decir, colocar el líquido en un recipiente tal, en donde esté comprimido por todas las partes por paredes sólidas. De este modo, se consigue alcanzar un sobrecalentamiento de unos cuantos grados, o sea, llevar hacia la derecha de la curva de ebullición el punto que representa el estado del líquido (Fig. 100).

Sobrecalentamiento es el desplazamiento del líquido a la región del vapor; por eso, el sobrecalentamiento del líquido se puede conseguir, bien comunicando calor, bien disminuyendo la presión.

Con el último método se puede lograr un resultado extraordinario. El agua u otro líquido, escrupulosamente liberada de los gases disueltos (esto no es fácil conseguir), se vierte en un recipiente con un émbolo que esté en contacto con la superficie del líquido. El recipiente y el émbolo tienen que mojarse con el líquido. Si ahora se tira del émbolo, el agua, adherida al fondo del émbolo, seguirá tras él. Pero la capa de agua adherida al émbolo arrastrará a la siguiente capa de agua, esta capa a la que está debajo y, como resultado, el líquido se dilatará.

Al fin y al cabo la columna de agua se romperá (precisamente la columna de agua se desprenderá del émbolo), mas esto ocurrirá cuando la fuerza sobre una unidad de superficie alcance decenas de kilogramos. Dicho de otro modo, en el líquido se crea una presión negativa de decenas de atmósferas.

Ya a pequeñas presiones positivas el estado de vapor de la substancia es estable. Pero se puede hacer que el líquido tenga presión negativa. Un ejemplo más claro de «sobrecalentamiento» es difícil aducir.

Fusión

No hay cuerpo sólido que pueda aguantar cuanto se quiera el aumento de la temperatura. Tarde o temprano, el trozo sólido se convierte en líquido; cierto es que, en algunos casos, no logramos alcanzar la temperatura de fusión, pues puede producirse una reacción química.

A medida que aumenta la temperatura, las moléculas se mueven más intensamente. Por fin, llega un momento en que resulta imposible poner orden entre las moléculas que oscilan intensamente. El cuerpo sólido se funde. La temperatura más alta de fusión la tiene el wolframio: 3380 $°C$. El oro se funde a 1063 $°C$, el hierro a 1539 $°C$. Desde luego, hay metales que se funden fácilmente. Como bien se sabe, el mercurio se funde ya a la temperatura de -39 ^{o}C. Las substancias orgánicas no tienen temperaturas altas de fusión. La naftalina se funde a 80 ^{o}C, el tolueno a -94.5 ^{o}C.

Es muy fácil medir la temperatura de fusión de un cuerpo, y, particularmente, si se funde en el intervalo de temperaturas que se miden con el termómetro ordinario. No es necesario estar mirando atentamente el cuerpo que se funde. Es suficiente mirar a la columna de mercurio del termómetro (Fig. 101). Mientras no ha comenzado la fusión, la temperatura del cuerpo se eleva. En cuanto empieza la fusión, cesa el aumento de la temperatura inalterable hasta que no termine por completo el proceso de fusión.

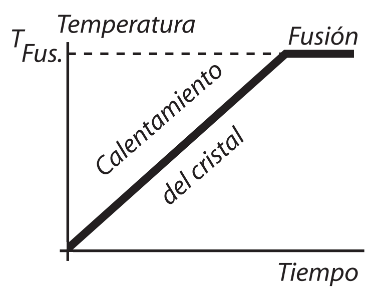


Fig. 101

Igual que la transformación del líquido en vapor, la transformación del cuerpo sólido en líquido necesita calor. La cantidad de calor que hace falta para esto, se llama calor latente de fusión. Por ejemplo, la fusión de un kilogramo de hielo necesita 80 calorías grandes.

El hielo es uno de los cuerpos que tienen un calor mayor de fusión. La fusión del hielo necesita, por ejemplo, 10 veces más de energía que la fusión de una masa igual de plomo. Naturalmente, se trata de la misma fusión y no se tiene en cuenta que hasta el comienzo de la fusión del plomo hay que calentarlo hasta 327 ^{o}C. Precisamente porque el calor de fusión del hielo es grande, se retarda el deshielo de la nieve. Figúrense que el calor de fusión fuese 10 veces menor. Entonces, los deshielos de primavera darían lugar cada año a desastres que no se puede uno imaginar.

Así, pues, el calor de fusión del hielo es muy grande, pero éste incluso es pequeño (siete veces menor), si se compara con el calor de vaporización, que es de 540 calorías grandes por kilogramo. Desde luego, esta diferencia es completamente natural. Convirtiendo el líquido en vapor, tenemos que separar las moléculas unas de otras, mientras que en la fusión, solamente tenemos que destruir el orden en la posición de las moléculas, manteniéndolas casi a las mismas distancias. Está claro que en el segundo caso se necesita menos trabajo.

Un síntoma importante de las substancias cristalinas es la existencia de un punto determinado de fusión. Precisamente por este síntoma se las diferencia fácilmente de otros cuerpos sólidos, llamados amorfos o vidrios. Los vidrios se encuentran, tanto entre las substancias orgánicas, como entre las inorgánicas. Los cristales de las ventanas se hacen generalmente de silicatos de sodio y calcio. Sobre los escritorios, frecuentemente, se pone un vidrio orgánico (llamado también plexiglás).

En contraposición a los cristales, las substancias amorfas no tienen una temperatura de fusión determinada. El vidrio no se funde, sino que se ablanda. Al calentar un trozo de vidrio, al principio de duro se convierte en blando y fácilmente se le puede doblar o alargar; a una temperatura mucho más alta, el trozo empieza a cambiar su forma por la acción de su propia gravedad. A medida que se va calentando, la masa espesa viscosa del vidrio va tomando la forma del recipiente en donde se halla. Esta pasta, primero es espesa como la miel, después, como la crema agria y, por fin, se convierte en un líquido casi tan poco viscoso como el agua. Por mucho que se quiera, no se puede señalar aquí una temperatura determinada del paso del cuerpo sólido al estado liquido, Las causas de esto estriban en la diferencia radical entre la estructura del vidrio y la de los cuerpos cristalinos. Como ya se dijo anteriormente, los átomos de los cuerpos amorfos están situados desordenadamente. Por su estructura, los vidrios parecen a los líquidos. En el vidrio sólido las moléculas están situadas desordenadamente. Por lo tanto, el aumento de la temperatura del vidrio solamente acrecienta la amplitud de las vibraciones de sus moléculas, facilitándolos, paulatinamente, una libertad cada vez mayor de traslación, Por eso, el vidrio se ablanda lentamente y no muestra un paso brusco «sólido»–«líquido», que es característico para el paso del estado del orden riguroso de las moléculas a la posición desordenada.

Cuando hablábamos de la curva de ebullición, dijimos que, aunque en estado inestable, el líquido y el vapor pueden existir en regiones extrañas; el vapor se puede sobrecongelar y trasladar a la izquierda de la curva de ebullición, el líquido se puede sobrecalentar y trasladarlo a la derecha de la misma curva.

¿Son posibles fenómenos análogos con respecto al cristal con líquido? Resulta que aquí la analogía no es completa.

Si se calienta un cristal, éste empieza a fundirse a su temperatura de fusión. Sobrecalentar el cristal no se puede. Por el contrario, enfriando el líquido, y tomando ciertas medidas, se puede «pasar más allá» de la temperatura de fusión con una facilidad relativa. En algunos líquidos se logra alcanzar grandes sobrefusiones. Hay también líquidos que son fáciles de sobrefundir, pero que cristalizan con dificultad. A medida que se enfría tal líquido, se hace más y más viscoso y, por fin, se solidifica sin cristalizarse, como el vidrio.

También se puede sobrefundir el agua. Las gotas de la niebla pueden no congelarse, incluso durante las heladas más fuertes. Si en el líquido sobrefundido se lanza un cristalito de substancia, germen, inmediatamente comienza la cristalización.

Por fin, en muchos casos, la cristalización retardada puede comenzar a causa de una agitación o de otros acontecimientos casuales. Es sabido, por ejemplo, que la glicerina cristalina fue obtenida por primera vez al transportarla por vía férrea. Los vidrios pueden cristalizarse después de estar mucho tiempo en reposo.

Cómo cultivar un cristal

Decíamos que la mayoría de los cuerpos sólidos se componen de cristalitos pequeñísimos que ordinariamente se ven sólo con ayuda del microscopio. En cuanto a los cristales individuales, suficientemente grandes, que tengan caracteres exteriores de cristal, tales como caras planas, aristas rectas y forma simétrica regular, raramente se encuentran en la naturaleza. Y esto no es casual. La cuestión está en que, si no se toman medidas especiales, al enfriar la fundición siempre se forman pequeñísimas substancias cristalinas, pero no cristales aislados. La explicación estriba en que el crecimiento de los cristales comienza a la vez en muchos sitios de la fundición y, paulatinamente, toda la fundición se cubre de una inmensa cantidad de cristalitos.

Si queremos cultivar un cristal solitario, tenemos que tomar medidas para que el cristal crezca de un sitio. Y, si han empezado a crecer ya unos cuantos cristalitos, hay que tomar medidas para que las condiciones de crecimiento sean satisfactorias solamente para uno de ellos.

He aquí el modo de proceder al cultivar cristales de los metales fáciles de fundir. Se funde el metal en una probeta de vidrio que tiene un extremo alargado. La probeta suspendida de un hilo dentro de un hornillo vertical cilíndrico, se va bajando lentamente. El extremo alargado va saliendo poco a poco del hornillo y se va enfriando. Comienza la cristalización. Primero se forman unos cuantos cristalitos, pero aquellos que crecen por el costado, se apoyan en la pared de la probeta y su crecimiento se retarda. Solamente se encuentra en condiciones favorables el cristalito que crece a lo largo del eje de la probeta, o sea, en el fondo de la fundición. A medida que se va bajando la probeta, nuevas porciones de fundido, que pasan a las regiones de bajas temperaturas, van «alimentando» este cristal único. Por eso, de todos los cristalitos, queda vivo sólo uno; a medida que se baja la probeta, éste continúa creciendo a lo largo de su eje. Al fin y al cabo, todo el metal fundido cristaliza en forma de un cristal solitario.

El cultivo de cristales refractarios de rubí se basa en la misma idea. El polvo fino de la substancia se vierte en chorro sobre una llama. Con esto, el polvillo se funde; las gotitas diminutas caen sobre un soporte refractario de un área muy pequeña, formando un conjunto de cristalitos. Al ir cayendo luego las gotas sobre el soporte, los cristalitos van creciendo, pero lo mismo que antes, crece solamente el que ocupa la posición más favorable para «recibir» las gotas que caen. Frecuentemente se cultivan los cristales de las disoluciones. Sobre esta cristalización se hablará un poco más adelante. ¿Para qué hacen falta los cristales grandes?

La ciencia y la industria frecuentemente necesitan cristales solitarios grandes. Para la técnica tienen gran importancia los cristales de sal de Seignette y de cuarzo, que poseen la propiedad admirable de transformar las acciones mecánicas (por ejemplo, la presión) en tensiones eléctricas.

La industria de la óptica necesita cristales grandes de calcita, de sal de piedra, de fluorita y otros.

Para las fábricas de relojes se necesitan rubíes, zafiros y otras piedras preciosas. Esto se debe a que algunas partes movibles de los relojes ordinarios hacen hasta 20 000 oscilaciones por hora. Esta velocidad tan grande presupone que los extremos de los ejes y de los cojinetes sean de una calidad extraordinaria. El desgaste es mínimo cuando un rubí o un zafiro sirve de cojinete para el extremo de un eje de $0.07-0.15$ *mm*.

Los cristales artificiales de estas substancias son muy resistentes y se desgastan muy poco en contacto con el acero. Es maravilloso que las piedras artificiales resulten ser mejores que las mismas piedras naturales.

Para el estudio de las propiedades de los metales es importante tener cristales solitarios grandes de hierro, cobre y otros.

Influencia de la presión en la temperatura de fusión

Si se cambia la presión, se altera también la temperatura de fusión. Ya nos encontramos con tal ley cuando hablábamos de la ebullición. Cuanto mayor sea la presión, tanto mayor será la temperatura de ebullición. Por regla general, esto es cierto también para la fusión. Sin embargo, hay algunas substancias que se comportan de una manera anormal: sus temperaturas de fusión disminuyen con el aumento de la presión.

La elevación de la temperatura de fusión con el aumento de la presión se debe a que la inmensa mayoría de los cuerpos sólidos son más densos que sus líquidos. Forman excepción de esta regla, precisamente, las substancias, cuyas temperaturas de fusión al cambiar la presión, varían de un modo extraordinario, como, por ejemplo, el agua. El hielo es más ligero que el agua y la temperatura de fusión del hielo disminuye al aumentar la presión.

La compresión facilita la formación de un estado más denso. Si el cuerpo en estado sólido es más denso que en el líquido, la compresión ayuda a la solidificación y dificulta la fusión. Pero el hecho de que la compresión dificulte la fusión, significa que la substancia se mantiene sólida, mientras que antes, a esta temperatura, se habría fundido ya; o sea, que al aumentar la presión, crece la temperatura de fusión. En el caso anómalo, el líquido es más denso que el cuerpo sólido y la presión ayuda a la formación del líquido, o sea, rebaja la temperatura de fusión.

La influencia de la presión en la temperatura de fusión es mucho menor que el efecto análogo de la ebullición. El aumento de la presión en más de 100 $\dfrac{kgf}{cm^2}$ disminuye la temperatura de fusión del hielo en 1 ^oC.

A propósito, de aquí se ve lo inocente que es la explicación que frecuentemente dan al resbalamiento de los patines sobre el hielo, afirmando que esto es debido a la disminución de la temperatura de fusión a causa de la presión. La presión sobre el filo del patín, de todos modos, no es mayor de 100 $\dfrac{kgf}{cm^2}$ y la disminución de la temperatura de fusión por esta causa no puede jugar gran papel para los patinadores.

Evaporación de los cuerpos sólidos

Cuando se dice que «la substancia se evapora», generalmente se supone que se evapora el líquido. Pero los cuerpos sólidos también pueden evaporarse. La evaporación de los cuerpos sólidos se llama sublimación.

La naftalina, por ejemplo, es un cuerpo sólido que se evapora. La naftalina se funde a los 80 ^oC y se evapora a la temperatura de la habitación. Precisamente esta propiedad de la naftalina permite usarla para la exterminación de las polillas. Un abrigo de piel en el que se ha echado naftalina, se empapa con los vapores de la naftalina y crea una atmósfera que la polilla no puede soportar. Toda substancia sólida olorosa se sublima de modo considerable, pues el olor lo llevan las moléculas que se han separado de la substancia y que han alcanzado nuestra nariz. Sin embargo, son más frecuentes los casos en que la substancia se sublima en grado insignificante, y, a veces, tan insignificante, que no se puede percibir ni siquiera con experimentos muy escrupulosos.

En principio, cualquier substancia sólida se evapora (literalmente cualquiera, hasta el hierro o el cobre). Si no observamos la sublimación es porque la densidad del vapor saturado es muy insignificante.

La densidad del vapor saturado que está en equilibrio con el cuerpo sólido crece rápidamente con el aumento de la temperatura (Fig. 102). Es posible convencerse, que una serie de substancias que dan fuerte olor a la temperatura de la habitación, lo pierden a temperatura baja.

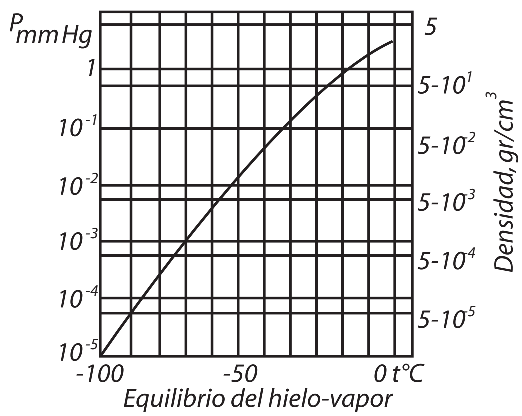


Fig. 102

En la mayoría de los casos no se puede aumentar esencialmente la densidad del vapor saturado del cuerpo sólido por la simple razón de que la substancia se funde antes.

El hielo también se evapora. Esto lo saben bien las amas de casa que en las heladas cuelgan la ropa húmeda a secar. Primero se hiela el agua y luego se evapora el hielo, con lo que la ropa queda seca.

Punto triple

Así, pues, existen condiciones en las que el vapor, el líquido y el cristal, pueden estar en equilibrio a pares.

¿Pueden estar en equilibrio todos los estados? Tal punto existe en el diagrama presión–temperatura; se llama punto triple. ¿Dónde está este punto?

Si en un recipiente cerrado se vierte agua a cero grados junto con hielo flotante, en el espacio libre empezarán a formarse vapores de agua (y de «hielo»). A la presión de 4.6 $mm\ Hg$, la evaporación se termina y empieza la saturación. Ahora, las tres fases, el hielo, el agua y el vapor, se encuentran en estado de equilibrio. Éste es el punto triple.

El diagrama para el agua, representado en la Fig. 103, muestra palpablemente y con claridad la correlación entre los diferentes estados.

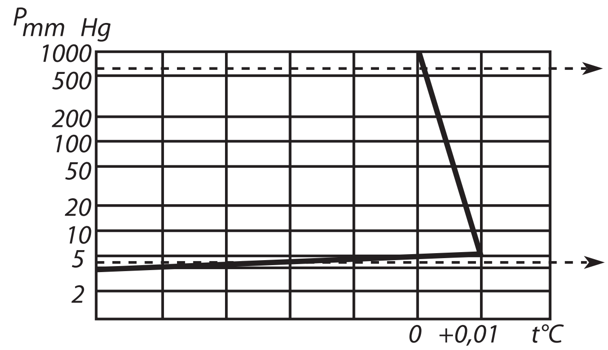


Fig. 103

Tal diagrama se puede construir para cualquier cuerpo. Ya conocemos las curvas del dibujo: son las curvas de equilibrio entre el hielo y el vapor, entre el hielo y el agua, y entre el agua y el vapor. Como de ordinario, en el eje vertical se indica la presión y en el horizontal, la temperatura.

Las tres curvas se cortan en un punto triple y dividen el diagrama en tres regiones, que son los espacios de existencia del hielo, del agua y del vapor de agua.

El diagrama de constitución es una guía breve. Su objetivo consiste en contestar a la pregunta, qué estado del cuerpo es estable a tal presión y a tal temperatura.

Si el agua o el vapor se ponen en las condiciones de la «región de la izquierda», éstos se convierten en hielo. Si se introduce en la «región inferior» un cuerpo líquido o sólido, éste se evapora. En la «región de la derecha», el vapor se condensa y el hielo se funde.

El diagrama de constitución de las fases permite explicar directamente qué ocurriría con la substancia al calentarla o al comprimirla. El calentamiento a presión constante se representa en el diagrama mediante una línea horizontal.

El punto que representa el estado del cuerpo se mueve de izquierda a derecha por esta línea.

En la figura están representadas dos líneas de éstas, una de las cuales representa el calentamiento a presión normal. La línea está situada por encima del punto triple. Por esto, ésta se corta, primero, con la curva de fusión y, después, fuera del dibujo, con la curva de evaporación. El hielo, a presión normal, se funde a la temperatura de 0 ^oC, y el agua formada hierve a 100 ^oC.

Otra cosa ocurre con el hielo que se calienta a presión bastante baja, por ejemplo, un poco menor de $5\,mm\,Hg$.

El proceso de calentamiento se representa por una línea que va por debajo del punto triple. Las curvas de fusión y de ebullición no se cortan con esta línea. A tan insignificante presión, el calentamiento da lugar al paso directo del hielo a vapor.

En la Fig. 104 este mismo diagrama muestra el fenómeno interesante que ocurrirá al comprimir el vapor de agua en el estado que está marcado en el dibujo con una cruz. Primero, el vapor de agua se convierte en hielo, y luego, se funde. El dibujo permite averiguar inmediatamente la presión a que empieza el crecimiento del cristal y el momento en que se efectúa la fusión.

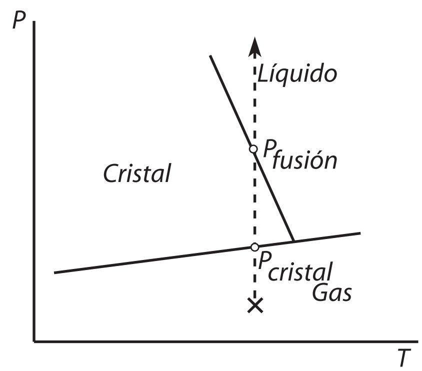


Fig. 104

Los diagramas de constitución de todas las substancias se parecen unos a otros, desde el punto de vista de la vida cotidiana, surgen grandes diferencias a causa de que el lugar donde está el punto triple en el diagrama puede ser muy diferente para diversas substancias.

Las condiciones en que nosotros vivimos son próximas a las «normales», o sea, a una presión de cerca de una atmósfera. Para nosotros, es muy importante saber dónde está situado el punto triple de la substancia con respecto a la línea de la presión normal.

Si en el punto triple la presión es menor que la atmosférica, para nosotros, que vivimos en condiciones «normales», la substancia es de las que se funden. Al elevar la temperatura, primero se convierte en líquido y, después, hierve. En el caso contrario, cuando la presión en el punto triple es mayor que la atmosférica, al calentarla, no veremos la fase líquida, el cuerpo sólido se convertirá directamente en vapor. Así se comporta el «hielo seco», que es muy cómodo para los vendedores de helados. Los helados se pueden colocar entre trozos de «hielo seco», sin tener miedo a que se moje el helado. El «hielo seco» es el gas carbónico CO_2 sólido. El punto triple de esta substancia está situado a 73 atm. Por eso, al calentar el sólido CO_2, el punto que representa su estado se mueve por la horizontal que corta solamente a la curva de evaporación del cuerpo sólido (igual que para el hielo ordinario a la presión de unos 5 $mm\ Hg$).

Unos mismos átomos, pero diferentes cristales

El grafito negro mate y blando con el que escribimos y el brillante y transparente diamante sólido, que corta los cristales de las ventanas, se componen de unos mismos átomos: de átomos de carbono. ¿Por qué son, entonces, tan diferentes las propiedades de estas dos substancias de igual composición?

Recuerden la malla del grafito de capas, cada átomo del cual tiene tres vecinos próximos, y la malla del diamante, cuyo átomo tiene cuatro vecinos próximos. En este ejemplo se ve con claridad cómo se determinan las propiedades de los cristales por la posición relativa de los átomos. Con el grafito hacen crisoles refractarios que aguantan una temperatura de dos mil a tres mil grados, mientras que el diamante arde a la temperatura de 700 $^{\circ}C$; el peso específico del diamante es 3.5 y el del grafito, 2.3; el grafito es conductor de la corriente eléctrica, mientras que el diamante no lo es, etc.

No sólo el carbono posee esta particularidad de formar diferentes cristales. Casi cada elemento químico, y no sólo los elementos, sino cualquier substancia química, puede existir en unas cuantas variedades. Se conocen seis variedades de hielo, nueve variedades de azufre, cuatro variedades de hierro.

Al estudiar el diagrama de constitución, no dijimos nada sobre los diversos tipos de cristales y representamos una región única del cuerpo sólido. Esta región, para muchas substancias, se divide en dominios, cada uno de los cuales corresponde a una determinada «especie» de cuerpo sólido o, como suele decirse, a una determinada fase sólida (una modificación cristalina determinada).

Cada fase cristalina tiene su región de estado de equilibrio, limitado por un intervalo determinado de presiones y temperaturas. Las leyes de transformación de una variedad cristalina en otra son iguales que las leyes de fusión y evaporación.

Para cada presión se puede señalar la temperatura en que ambos cristales pueden coexistir pacíficamente. Aumentando la temperatura, el cristal de una especie se convierte en cristal de otra especie. Disminuyendo la temperatura, se efectúa la transformación inversa.

Para que el azufre rojo se convierta en amarillo a presión normal, se necesita una temperatura inferior a 110 $^{\circ}C$. Por encima de esta temperatura, hasta el punto de fusión, el orden de colocación de los átomos, que es propio para el azufre rojo, está en equilibrio. Bajando la temperatura, disminuyen las vibraciones de los átomos, y, comenzando desde 110 $^{\circ}C$, la misma naturaleza halla un orden cómodo para colocarlos. Se efectúa la transformación del otro.

Nadie ha dado nombre a las seis especies diversas de hielo. Se dice así: hielo uno, hielo dos... hielo siete. ¡Cómo siete, si en total había seis especies! Es que, repitiendo los experimentos, nunca se ha observado el hielo cuatro.

Si se comprime el agua a una temperatura de cerca de cero grados, entonces, a la presión de unas 2000 atm, se forma el hielo cinco y a la presión de unas 6000 atm, el hielo seis.

El hielo dos y el hielo tres están en equilibrio a temperaturas menores de cero grados.

El hielo siete es hielo caliente; éste se forma al comprimir el agua caliente hasta presiones de unas 20 000 atm.

Todos los hielos, excepto el ordinario, son más pesados que el agua. El comportamiento del hielo que se obtiene en condiciones exteriores normales, es anómalo; por el contrario, el hielo obtenido en condiciones diferentes de la norma, se comporta normalmente.

Decíamos que a cada modificación cristalina correspondía una región determinada de existencia. Pero, entonces, ¿de qué modo existen en condiciones iguales el grafito y el diamante?

Tal «arbitrariedad» se encuentra con mucha frecuencia en el mundo de los cristales. Para éstos es casi una regla vivir en condiciones «extrañas». Si para trasladar el vapor o el líquido a regiones extrañas de existencia hay que recurrir a diversas artimañas, el cristal, por el contrario, casi nunca se consigue mantenerlo en los límites que le ha impuesto la naturaleza.

Los sobrecalentamientos y sobrefusiones de los cristales se explican por la dificultad de transformar una variedad en otra en condiciones de estrechez extrema. El azufre amarillo debe convertirse en rojo a 95.5 ^{o}C. Calentando con mayor o menor ligereza, «saltamos» este punto de transformación y alcanzamos la temperatura de fusión del azufre de 113 ^{o}C.

La temperatura verdadera de transformación se observa con mayor facilidad al poner en contacto los cristalitos. Si éstos se colocan uno sobre otro, estrechamente, y se mantiene la temperatura de 96 ^{o}C, el rojo absorberá al amarillo, y a 95 ^{o}C, el amarillo absorberá al rojo. En contraposición con el paso «cristal–líquido», la transformación «cristal–cristal» se retiene lo mismo al sobrefundirse que al sobrecalentarse.

En algunos casos nos encontramos con estados de la substancia que tendrían que existir a otras temperaturas.

El estaño blanco debe convertirse en gris al bajar la temperatura hasta +13 ^{o}C. Generalmente trabajamos con el estaño blanco, y sabemos que en el invierno no le pasa nada. Éste aguanta admirablemente sobrefusiones de $20-30$ grados. Sin embargo, en condiciones de un invierno crudo, el estaño blanco se convierte en gris. El desconocimiento de este hecho fue una de las circunstancias que malogró la expedición de Scott al Polo Sur (año 1912). El combustible líquido que llevaba la expedición estaba en recipientes soldados con estaño. Con los grandes fríos, el estaño blanco se convirtió en polvo gris, los recipientes se destañaron y el combustible se derramó. No en vano, la aparición de manchas grises en el estaño blanco la llaman peste del estaño.

Al igual que en el caso del azufre, el estaño blanco puede convertirse en gris a una temperatura un poco menor de 13 ^{o}C, solamente si sobre el objeto de estaño cae un granito insignificante de la variedad gris.

La existencia de unas cuantas variedades de una misma substancia y la retención de sus transformaciones mutuas tienen una gran importancia para la técnica.

A la temperatura de la habitación, los átomos de hierro forman una malla cúbica de volumen centrado, en la que los átomos ocupan los vértices y el centro del cubo. Cada átomo tiene 8 vecinos. A alta temperatura, los átomos de hierro forman una estructura más densa, pues cada átomo tiene 12 vecinos. El hierro con un número de vecinos igual a 8, es blando; el hierro, con el número de vecinos igual a 12, es duro. Resulta que se puede obtener hierro del segundo tipo a la temperatura de la habitación. Este método de templar se emplea ampliamente en la metalurgia.

El temple se efectúa de un modo muy simple: se calienta el objeto metálico hasta que se ponga rojo, y cuando está candente, se sumerge en agua o en aceite. El enfriamiento se efectúa con tanta rapidez, que la estructura que está en equilibrio a alta temperatura no le da tiempo a transformarse. De este modo, la estructura de alta temperatura subsistirá indefinidamente en condiciones que no le son propias: la recristalización en una estructura de equilibrio se efectúa con tanta lentitud que, prácticamente, no se nota.

Hablando del temple del hierro, no hemos sido muy exactos. Lo que se templa, es el acero, o sea, el hierro que contiene ciertas partes de carbono. La existencia de pequeñísimas impurezas de carbono retiene la transformación del hierro duro en blando y permite hacer el temple. En cuanto al hierro puro del todo, resulta imposible templarlo, pues, incluso con el más rápido enfriamiento, da tiempo a que se efectúe la transformación de la estructura.

Cambiando la presión y la temperatura, en dependencia de la forma del diagrama de constitución, se consiguen tales o cuales transformaciones.

Variando únicamente la presión, se observan muchas transformaciones de un cristal en otro. El fósforo metálico fue obtenido de este modo.

Sólo empleando simultáneamente una temperatura alta y una gran presión, se consiguió convertir el grafito en diamante. En la Fig. 105 se muestra el diagrama de constitución del carbono. El grafito es una modificación de equilibrio a presiones menores de diez mil atmósferas y a temperaturas menores de 4000 K. De este modo, el diamante existe en condiciones «extrañas», por eso se le puede convertir sin dificultad en grafito. Pero el problema inverso tiene interés práctico. Elevando solamente la presión, no se puede realizar la transformación del grafito en diamante. Probablemente, la transformación de la fase en estado sólido se efectúa con demasiada lentitud. La forma del diagrama de constitución señala la solución justa: hay que aumentar la presión y, a la vez, calentar. Entonces se obtiene (el ángulo de la derecha del diagrama) carbono fundido. Enfriándolo a alta presión, tenemos que caer en la región del diamante.

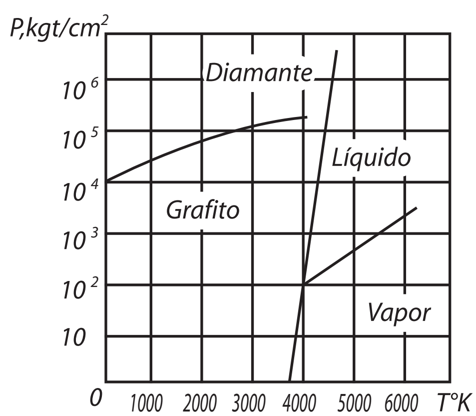


Fig. 105

La posibilidad práctica de semejante proceso fue demostrada en el año 1955 y, actualmente, se considera que este problema está técnicamente resuelto.

Un líquido extraordinario

Reduciendo la temperatura de un cuerpo, éste, tarde o temprano, se endurece y toma una estructura cristalina. En este caso, es indiferente la presión a que se efectúe el enfriamiento. Parece que esta circunstancia es completamente natural desde el punto de vista de las leyes de la física que ya conocemos. En efecto, bajando la temperatura, disminuye la intensidad del movimiento térmico. Cuando el movimiento de las moléculas se haga tan débil que deje de estorbar a las fuerzas de su interacción, las moléculas se colocarán en un orden riguroso, formarán un cristal. El enfriamiento ulterior substraerá de las moléculas toda la energía de su movimiento y, en el cero absoluto, la substancia tendrá que existir en forma de moléculas inertes colocadas en malla regular.

Los experimentos muestran que de este modo se comportan todas las substancias. Todas, excepto una sola: este «monstruo» es el helio.

Ya comunicamos al lector algunos datos sobre el helio. El helio es el campeón por el valor de su temperatura crítica. Ninguna substancia tiene una temperatura crítica más baja de 4.3 K. Sin embargo, de por sí, esto no significa algo extraordinario. Lo que asombra es lo siguiente: enfriando el helio hasta una temperatura más baja que la crítica, alcanzando prácticamente el cero absoluto, no obtenemos helio sólido. El helio se mantiene líquido hasta en el cero absoluto.

El comportamiento del helio no tiene explicación alguna desde el punto de vista de las leyes expuestas del movimiento y es uno de los síntomas de la validez limitada de estas leyes de la naturaleza, que parecían ser universales.

Si el cuerpo es líquido, sus átomos están en movimiento. Pero, enfriando el cuerpo hasta el cero absoluto, le hemos quitado toda la energía del movimiento. No hay más remedio que reconocer, que el helio tiene una energía tal de movimiento, que es imposible quitársela. Esta conclusión es incompartible con la mecánica que hemos estudiado hasta ahora. De acuerdo con esta mecánica, siempre se puede frenar el movimiento de un cuerpo hasta que se pare por completo, despojándole de toda su energía cinética; del mismo modo, se puede interrumpir el movimiento de las moléculas quitándoles su energía al chocar contra las paredes del recipiente que se enfría. Para el helio, de ningún modo vale esta mecánica.

La conducta «rara» del helio es señal de un hecho de gran importancia. Por primera vez nos encontramos con la imposibilidad de la aplicación de las leyes de la mecánica al mundo de los átomos, a pesar de que estas leyes fueron establecidas por el estudio directo del movimiento de los cuerpos visibles y que parecían ser un fundamento inquebrantable de la física.

El hecho de que en el cero absoluto, el helio se «niegue» a cristalizarse, de ningún modo puede armonizar con la mecánica que acabamos de estudiar. La contradicción con que nos encontramos por primera vez, la insubordinación del mundo de los átomos a las leyes de la mecánica, es el primer eslabón en la cadena de contradicciones todavía más agudas y violentas de la física.

Estas contradicciones dan lugar a la necesidad de revisar las bases de la mecánica del mundo atómico. Esta revisión es muy profunda y conduce a un cambio de toda nuestra comprensión de la naturaleza.

La necesidad de una revisión radical de la mecánica del mundo atómico, no significa que haya que poner una cruz a todas las leyes de la mecánica que estudiamos. Sería injusto obligar a estudiar al lector las cosas que no hacen falta. La mecánica vieja es justa por completo en el mundo de los cuerpos grandes. Ya esto es suficiente para tener un respeto cabal a los capítulos correspondientes de la física. Sin embargo, es de importancia el hecho de que una serie de leyes de la mecánica «vieja» pasen sin modificación alguna a la mecánica «nueva». Esto se refiere, en particular, a la ley de conservación de la energía.

La existencia de una energía «indespojable» en el cero absoluto, no es una propiedad particular del helio. Resulta, que energía «nula» tienen todas las substancias. Únicamente en el helio esta energía es suficiente para impedir que los átomos formen una malla cristalina regular.

No hay que creer que el helio no puede presentarse en estado cristalino. Para la cristalización del helio, solamente hay que elevar la presión hasta 25 atm, aproximadamente. El enfriamiento efectuado por encima de esta presión, conduce a la formación del helio sólido cristalino con todas las propiedades ordinarias. El helio forma una malla cúbica de caras centradas.

En la Fig. 106 se muestra el diagrama de constitución del helio. Se diferencia notablemente de los diagramas de todas las demás substancias por la ausencia del punto triple. Las curvas de fusión y de ebullición no se cortan.

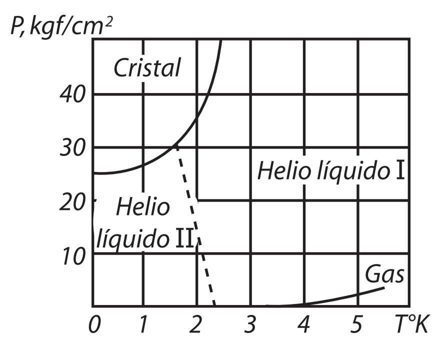


Fig. 106

XIII. Disoluciones

¿Qué es una disolución?

Si se agrega sal al caldo y se revuelve con una cuchara, no queda ni una huella de sal. No hay que creer que esto es porque no se ven a simple vista los granitos de la sal. Los cristalitos de la sal no se pueden observar de ningún modo, por la simple razón de que se han disuelto. Agregando pimienta al caldo no resulta disolución alguna. Ya se puede estar revolviéndolo días enteros, que los diminutos granitos negros no desaparecen.

Pero, ¿qué significa que «la substancia se ha disuelto»? ¡Si los átomos o las moléculas de las que la substancia está compuesta no pueden desaparecer sin dejar huella alguna! Claro que no, éstos no desaparecen. En la disolución desaparece solamente el granito de la substancia, el cristalito, la acumulación de las moléculas de una especie. La disolución consiste en una mezcla de partículas tal, que las moléculas de una substancia se distribuyen entre las moléculas de la otra. La disolución es una mezcla de moléculas o de átomos de distintas substancias.

La disolución puede contener diversas cantidades de soluto. La composición de la disolución se caracteriza por su concentración, por ejemplo, por la razón del número de gramos de soluto al número de litros de la disolución.

A medida que se agrega soluto, la concentración aumenta, pero no ilimitadamente. Tarde o temprano, la disolución queda saturada y termina de «ingerir» soluto. La concentración de la disolución saturada, o sea, la concentración «límite» de la disolución, se llama solubilidad.

En el agua caliente se puede disolver una cantidad extraordinariamente grande de azúcar. A la temperatura de 80 $^{\circ}C$, un vaso lleno de agua puede asimilar, sin dejar residuos, 720 g de azúcar. A esta disolución saturada, espesa y viscosa, los cocineros la llaman jarabe. Esta cantidad de azúcar corresponde a un vaso de 0.2 litros de capacidad. Por lo tanto, la concentración del azúcar en el agua a 80 $^{\circ}C$ es igual a 3600 $\dfrac{g}{litro}$ (se lee, «gramos por litro»).

La disolución de algunas substancias depende mucho de la temperatura. A la temperatura de la habitación (20 $^{\circ}C$), la solubilidad del azúcar en el agua se reduce a 2000 $\dfrac{g}{litro}$. Por el contrario, la alteración de la solubilidad de la sal con el cambio de la temperatura, es harto insignificante.

El azúcar y la sal se disuelven bien en el agua. Sin embargo, la naftalina es prácticamente insoluble en el agua. Substancias diversas se disuelven en distintos disolventes de un modo absolutamente diferente.

Las disoluciones se utilizan para el cultivo de monocristales. Si en una disolución saturada se suspende un cristalito pequeñito de soluto, a medida que se va evaporando el disolvente, la substancia disuelta va sedimentándose sobre la superficie de este cristalito. En este caso, las moléculas van manteniendo un orden riguroso, y como resultado, el cristalito pequeñito se convierte en uno grande, que también es monocristal.

Disoluciones de líquidos y gases

¿Se puede disolver un líquido en otro? Naturalmente que se puede. Por ejemplo, la vodka (especie de aguardiente) es una disolución de alcohol en agua (o, si se quiere, de agua en alcohol, según de lo que haya más). La vodka es una disolución verdadera, las moléculas de agua y alcohol están completamente mezcladas.

No siempre ocurre esto al mezclar dos líquidos. Hagan la prueba de echar petróleo al agua. Como quiera que se mezcle, nunca se conseguirá una disolución homogénea; esto es tan imposible como disolver pimienta en la sopa. En cuanto acaben de mezclar, los líquidos se situarán en capas: el agua, que es más pesada, por debajo; el petróleo, que es más ligero, por encima. Por las propiedades de disolubilidad, el petróleo con agua y el alcohol con agua, son sistemas contrapuestos.

Sin embargo, hay casos intermedios. Si se mezcla el éter con el agua, se verán claramente en el recipiente dos capas. A primera vista, se podría creer que por encima se sitúa el éter y por debajo el agua. En realidad, ambas capas son disoluciones, tanto la superior como la inferior: abajo está el agua en la que está disuelta parte del éter (una concentración de 25 g de éter por un litro de agua); arriba está el éter, en el que hay una cantidad notable de agua (60 $\frac{g}{litro}$).

Veamos ahora las disoluciones de los gases. Está claro que todos los gases se disuelven unos en otros en cantidades indefinidas. Dos gases siempre se mezclan de tal modo, que las moléculas de uno se introducen entre las moléculas del otro. Esto se debe a que las moléculas de los gases actúan muy débilmente unas con otras y, cada gas, en presencia de otro, se comporta, en cierto sentido, sin prestar «atención» a su cohabitante.

Los gases pueden disolverse también en los líquidos.

Ahora que, ya no en cantidades cualesquiera, sino en cantidades limitadas, no diferenciándose en este sentido de los cuerpos sólidos, Además, diversos gases se disuelven de distinto modo, y estas diferencias pueden ser muy grandes. En el agua se pueden disolver grandes cantidades de amoníaco (en medio vaso de agua fría, cerca de 100 g), inmensas cantidades de gas sulfhídrico y de dióxido de carbono. El oxígeno y el nitrógeno se disuelven en el agua en cantidades insignificantes (0.07 y 0.03 g para cada litro de agua fría). De este modo, en un litro de agua fría hay solamente cerca de una centésima parte de gramo de aire. Sin embargo, en la Tierra, esta pequeña cantidad juega un gran papel en la vida, pues, los peces respiran el oxígeno del aire disuelto en el agua.

Cuanto mayor sea la presión del gas, tanto más cantidad se disolverá en el líquido.

Si la cantidad de gas disuelto no es muy grande, entre ésta y la presión del gas sobre la superficie del líquido existe una proporción directa.

¿Quién no ha quedado satisfecho del agua fría gaseosa que tan bien quita la sed? La obtención del agua con gas es posible gracias a la dependencia entre la cantidad de gas disuelto y la presión. El gas carbónico se introduce a presión en el agua (de los balones que tienen en cada kiosco, donde se vende el agua con gas). Cuando se vierte el agua en el vaso, la presión baja hasta la atmosférica y del agua se desprende el gas «excesivo» en forma de burbujas.

Teniendo en cuenta efectos semejantes, a los buzos no se les puede subir rápidamente del fondo del agua a la superficie. A causa de la gran presión existente en las profundidades, en la sangre del buzo se disuelve una cantidad complementaria de aire. Al subir, la presión disminuye y el aire comienza a despedirse en forma de burbujas y puede taponar los vasos sanguíneos.

Disoluciones sólidas

En la práctica corriente, la palabra «disolución» se aplica a los líquidos. Sin embargo, existen también mezclas sólidas, cuyos átomos y moléculas están homogéneamente mezclados. Pero, ¿cómo obtener disoluciones sólidas? Con la maza y el mortero no se obtienen. Por eso, las substancias que se mezclan hay que hacerlas primero líquidas, o sea, hay que fundirlas, después hay que mezclar los líquidos y dejar endurecer la mezcla. También se puede obrar de otro modo: se disuelven las dos substancias que se quieren mezclar en un líquido y se evapora después el disolvente. De estos modos se pueden obtener disoluciones sólidas. Se pueden obtener, pero ordinariamente no se obtienen. Las disoluciones sólidas son muy raras. Si se echa un trozo de azúcar en el agua salada, éste se disuelve admirablemente. Evaporemos el agua; en el fondo de la taza se observan diminutos cristalitos de sal y de azúcar. La sal y el azúcar no proporcionan disoluciones sólidas.

Se pueden fundir el cadmio y el bismuto en un crisol. Después del enfriamiento veremos por el microscopio la mezcla de los cristalitos de cadmio y de bismuto. El bismuto y el cadmio tampoco forman disoluciones sólidas.

La condición necesaria, aunque no suficiente, para la creación de disoluciones sólidas, es la proximidad en forma y en dimensión de las moléculas o de los átomos de las substancias a mezclar. En este caso, al congelarse la mezcla, se forma una especie de cristalitos. Por lo general, los nudos de la malla de cada cristal están habitados desordenadamente por átomos (moléculas) de diversas especies.

Las aleaciones de los metales que tienen gran importancia técnica, representan frecuentemente soluciones sólidas. Disolviendo cantidades pequeñas de mezclas, se pueden cambiar bruscamente las propiedades del metal. Una ilustración clara de esto es la obtención de uno de los materiales más difundidos en la técnica, del acero, que representa una disolución sólida en el hierro, de pequeñas cantidades de carbono, que forman alrededor del 0.5 % del peso (un átomo de carbono para 40 átomos de hierro); además, los átomos del carbono están introducidos desordenadamente entre los átomos del hierro.

En el hierro se disuelve solamente un pequeño número de átomos de carbono. Sin embargo, al mezclar substancias en cualquier proporción, se forman algunas disoluciones sólidas. La aleación del cobre con el oro puede servir de ejemplo. Los cristales del oro y del cobre tienen una malla del mismo tipo: cúbica de caras centradas. La misma malla tiene la aleación del cobre con el oro. Para tener una idea de la estructura de una aleación con más y más partes de cobre, hay que figurarse que se separan los átomos de oro de la malla y que se sustituyen por los átomos de cobre. En este caso, la sustitución se efectúa desordenadamente, los átomos de cobre se distribuyen generalmente por los nudos de la malla de cualquier modo. Las aleaciones del cobre con el oro se pueden llamar disoluciones por sustitución; el acero es una disolución de otro tipo, por penetración.

En la inmensa mayoría de los casos no se crean disoluciones sólidas y, como ya se dijo anteriormente, después de enfriarse, se puede ver por el microscopio que la substancia se compone de una mezcla de cristalitos pequeñitos de ambas substancias.

Cómo se congelan las disoluciones

Enfriando la disolución de alguna sal en el agua, se observa que la temperatura de congelación del agua desciende. Ya ha llegado a cero grados y la solidificación no se ha efectuado. Sólo a la temperatura de unos cuantos grados bajo cero se forman cristalitos en el líquido. Éstos son de hielo puro; la sal no se disuelve en el hielo sólido.

La temperatura de congelación depende de la concentración de la disolución. Aumentando la concentración de la disolución, disminuye la temperatura de cristalización. La disolución saturada tiene la temperatura de congelación más baja. El descenso de la temperatura de congelación de la disolución no es pequeño; así, la disolución saturada de sal común en el agua congela a $-21\ ^oC$. Con ayuda de otras sales se puede conseguir un mayor descenso de la temperatura; por ejemplo, el cloruro de calcio permite reducir la temperatura de cristalización de la disolución hasta $-55\ ^oC$.

Veamos ahora cómo es el proceso de congelación. Después de desprenderse los primeros cristalitos de hielo de la disolución, la concentración aumenta. Ahora, el número relativo de las moléculas extrañas se hace mayor, aumentando también los obstáculos para la cristalización del agua y bajando la temperatura de congelación. Si no se baja más la temperatura, la cristalización se para. Al continuar bajando la temperatura, los cristalitos de agua (el disolvente) siguen desprendiéndose. Por fin, la disolución queda saturada. El enriquecimiento ulterior de la disolución con el soluto se hace imposible y la disolución se congela inmediatamente; mirando la mezcla congelada por el microscopio, se puede ver que se compone de cristalitos de hielo y de cristalitos de sal.

Por lo tanto, la disolución no se congela igual que el líquido simple. El proceso de congelación se alarga en un amplio intervalo de temperaturas.

¿Qué ocurre si se echa sal en una superficie congelada? Los barrenderos saben responder bien a esta pregunta: en cuanto la sal se ponga en contacto con el hielo, éste empezará a disolverse. Para que ocurra este fenómeno, es necesario, naturalmente, que la temperatura de congelación de la disolución saturada de sal sea más baja que la temperatura del aire. Si se cumple esta condición, en el diagrama, la constitución de la mezcla hielo–sal se encontrará en una región extraña, en la región de disolución estable. Por esto, la mezcla del hielo con la sal se convertirá en disolución, es decir, el hielo se fundirá y la sal se disolverá en el agua formada. Al fin y al cabo, todo el hielo se deshará o se formará una disolución de tal concentración, que su temperatura de congelación igual a la temperatura del medio ambiente.

La superficie de un patio de 100 metros cuadrados está cubierta de una corteza de hielo de 1 cm de espesor; esto no es una cantidad pequeña de hielo, pues representa cerca de una tonelada. Calculemos la cantidad de sal que se necesita para limpiar el patio si la temperatura es de $-3\ {}^{o}C$. La disolución que tiene esta temperatura de cristalización (fusión), es la de sal con una concentración de 45 $\dfrac{g}{litro}$.

Un litro de agua corresponde, aproximadamente, a 1 kg de hielo. Por lo tanto, para derretir una Tm de hielo a $-3\ {}^{o}C$, se necesitan 45 kg de sal. Prácticamente se emplean cantidades mucho más pequeñas, ya que no es necesario el derretimiento total del hielo.

Al mezclar el hielo con sal, el hielo se funde y la sal se disuelve en agua. Pero, para la fusión, se necesita calor, y el hielo toma este calor de sus alrededores. De este modo, la agregación de sal al hielo da lugar a una disminución de la temperatura.

Nosotros estamos acostumbrados a comprar helados preparados en la fábrica. Antes, el helado lo hacían en casa, y el papel de frigorífico lo jugaba la mezcla de hielo con sal.

Ebullición de las disoluciones

El fenómeno de ebullición de las disoluciones tiene mucho de común con el fenómeno de la congelación.

La existencia del soluto dificulta la cristalización. Por estas mismas causas, el soluto dificulta también la ebullición. En ambos casos, parece como si las moléculas extrañas lucharan por la conservación de una solución que sea lo más diluida posible. En otras palabras, las moléculas extrañas estabilizan el estado de la substancia fundamental (es decir, contribuyen a su existencia), la cual puede disolverlas.

Por eso, las moléculas extrañas obstaculizan la cristalización del líquido y, por lo tanto, bajan la temperatura de cristalización. Del mismo modo, las moléculas extrañas obstaculizan también la ebullición del líquido y, por consiguiente, elevan la temperatura de la ebullición.

Es curioso que hasta ciertos límites de concentración (para disoluciones no muy concentradas), la disminución de la temperatura de cristalización de la disolución, al igual que el aumento de la temperatura de ebullición, no depende en nada de las propiedades del soluto y se determina solamente por la cantidad de sus moléculas. Esta circunstancia interesante se aplica para la determinación del peso molecular del soluto. Esto se efectúa mediante una fórmula excelente (aquí no tenemos la posibilidad de exponerla), que liga la variación de la temperatura de congelación o de ebullición con la cantidad de moléculas en una unidad de volumen de la disolución (y con el calor de fusión o de ebullición).

El aumento de la temperatura de ebullición del agua es unas tres veces menor que la disminución de la temperatura de su congelación. Así pues, el punto de ebullición del agua de mar, que contiene, aproximadamente, 3.5 % de sales, es de 100.6 $°C$, mientras que su temperatura de congelación disminuye en 2 $°C$.

Si un líquido hierve a una temperatura más alta que otro, la elasticidad de su vapor (a la misma temperatura), es menor. Por lo tanto, la elasticidad del vapor de la disolución es menor que la elasticidad del vapor del disolvente puro. Los datos siguientes dan una idea de esta diferencia: la elasticidad del vapor de agua a 20 $°C$ es igual a 17.5 $mm\ Hg$; la elasticidad del vapor de la disolución saturada de sal común, a la misma temperatura, es igual a 13.2 $mm\ Hg$.

El vapor de 15 $mm\ Hg$ de elasticidad no está saturado para el agua, mientras que está sobresaturado para una disolución saturada de sal. En presencia de tal disolución, el vapor comienza a condensarse y a pasar a la disolución. Naturalmente que no sólo la disolución de sal absorberá el vapor de agua del aire, sino que también hará lo mismo la sal en polvo, ya que la primera gota de agua que caiga sobre la sal, la disolverá y creará una disolución saturada.

La absorción del vapor de agua del aire por la sal da lugar a que ésta se humedezca. Esto lo saben bien las amas de casa por los disgustos que les ocasiona. Pero este fenómeno de disminución de la elasticidad del vapor sobre la disolución también resulta útil y, en la práctica del laboratorio, se emplea para secar el aire. Éste se hace pasar por el cloruro de calcio, que es el campeón en recoger la humedad del aire. Si la elasticidad del vapor de la disolución saturada de sal común es de 13.2 $mm\ Hg$, para el cloruro de calcio es de 5.6 $mm\ Hg$. Hasta este valor bajará la elasticidad del vapor de agua al hacerlo pasar por una cantidad suficiente de cloruro de calcio (1 kg del cual «acoge» en sí 1 kg de agua, aproximadamente). Después de esto la humedad en el ambiente es insignificante y se puede considerar que el aire está seco.

Cómo se limpian los líquidos de impurezas

Uno de los métodos más importantes de limpieza de los líquidos de impurezas es la destilación. El líquido se hierve y el vapor se conduce a un condensador. Al enfriarse en el condensador, el vapor se convierte de nuevo en líquido; pero éste es más puro que el inicial.

Con la destilación es fácil librarse de las substancias sólidas disueltas en el líquido. Prácticamente, en el vapor no hay moléculas de estas substancias. De este modo se obtiene el agua destilada, que es agua pura e insípida, despojada de mezclas minerales.

Empleando la destilación, también es posible librarse de las impurezas líquidas y separar los componentes de una mezcla de dos o más líquidos. Para ello nos basamos en que dos líquidos que forman una mezcla hierven con distinta «facilidad».

Veamos cómo se comporta la mezcla de dos líquidos al hervirla. Sea, por ejemplo, la mezcla del agua con el alcohol etílico tomados en proporciones iguales (la vodka de 50 grados).

A presión normal, el agua hierve a 100 ^{o}C, el alcohol a 78 ^{o}C. La mezcla de que se trata hierve a una temperatura intermedia, igual a 81.2 ^{o}C. El alcohol hierve con mayor facilidad, por eso, la, elasticidad de su vapor es mayor, y con la composición inicial no la de la mezcla del cincuenta por ciento, la primera porción de vapor contendrá el 80 % de alcohol.

La porción obtenida de vapor se puede llevar al condensador y. obtener un líquido enriquecido de alcohol. Después se puede repetir este proceso. Sin embargo, está claro que este método no es práctico, pues cada destilación siguiente va a proporcionar menor cantidad de substancia. Para que no haya tales pérdidas, se emplean los rectificadores.

La idea de la construcción de este interesante aparato consiste en lo siguiente. Figurémonos una columna vertical, en cuya parte inferior hay una mezcla líquida. A la parte inferior de la columna se comunica calor, en la parte superior se produce un enfriamiento. El vapor que se forma en la ebullición se eleva y se condensa; el líquido formado se vierte hacia abajo. Comunicando constantemente calor por debajo y despidiéndolo por encima, en la columna cerrada se establece una corriente de vapor que va hacia arriba y una corriente de líquido que va a su encuentro, hacia abajo.

Prestemos atención a una sección horizontal cualquiera de la columna. Por esta sección el líquido pasa hacia abajo y el vapor se eleva, sin retenerse ni una de las substancias que forman parte de la mezcla líquida. Si se trata de una columna con una mezcla de alcohol y de agua, la cantidad de alcohol que pasa hacia abajo y hacia arriba, así como la cantidad de agua que pasa hacia abajo y hacia arriba, son iguales. Como el líquido va hacia abajo y el vapor hacia arriba, en cualquier altura de la columna las cantidades de líquido y de vapor son iguales.

Como se acaba de aclarar, el equilibrio del líquido y del vapor de una mezcla de dos substancias presupone, por el contrario, que sean diversas la fase líquida y la fase de vapor. Por eso, a cualquier altura de la columna, se efectúa una transformación del líquido en vapor y del vapor en líquido. Con esto se condensa la parte de la mezcla de alta ebullición, mientras que el componente de baja ebullición se convierte de líquido en vapor.

Por esto, la corriente de vapor que va hacia arriba, recogerá el componente de baja ebullición de todas las alturas, mientras que la corriente de líquido que se vierte hacia abajo irá enriqueciéndose continuamente de la parte de alta ebullición. En cada altura se establece diferente composición de la mezcla: cuanto más alto, tanto mayor es el tanto por ciento del componente de baja ebullición. En el caso ideal, arriba habrá una capa pura del componente de baja ebullición, mientras que abajo se formará una capa pura de alta ebullición.

Ahora hay que obrar lo más cautelosamente posible, para no infringir el cuadro ideal descrito: elegir la substancia pura de baja ebullición por arriba y la de alta ebullición por debajo.

Para efectuar prácticamente la separación, o la purificación, hay que dar la posibilidad de que se mezclen como se debe las corrientes opuestas de vapor y de líquido. Con este fin se retienen las corrientes de líquido y de vapor en unos platos, colocados uno sobre otro y comunicados por unos tubos de salida o bajantes. De los platos llenos, el líquido se puede verter a los platos inferiores. El vapor que va hacia arriba en corriente rápida (de 0.3−1 $\frac{m}{seg}$) se abre paso a través de la capa fina de líquido, penetrando en ella por medio de unas campanas con aberturas laterales colocadas encima del plato. El esquema de la columna se muestra en la fig. 107.

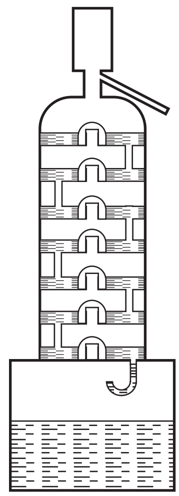


Fig. 107

No siempre se consigue purificar por completo el líquido. Algunas de las mezclas poseen la propiedad «desagradable» siguiente: con una composición determinada de la mezcla, la correlación de las moléculas de los componentes que se evaporan es igual a la correlación en la mezcla líquida. Naturalmente que, en este caso, se hace imposible la purificación ulterior con este método. Tal es la mezcla que contiene el 96 % de alcohol y el 4 % de agua: ésta proporciona un vapor de la misma composición. Por esto, el alcohol de 96 % es el mejor que se puede obtener con el método de evaporación.

La rectificación (o destilación) de los líquidos es un proceso muy importante de la tecnología química. Mediante la rectificación se consigue obtener, por ejemplo, la gasolina del petróleo.

Es curioso que la rectificación es el método más barato de obtención de oxígeno. Naturalmente que para esto, hay que convertir previamente el aire en líquido, después de lo cual, rectificándolo, se separa en nitrógeno y oxígeno casi puros.

Purificación de los cuerpos sólidos

Por lo general, en un frasco con una substancia química, junto con la denominación química, se pueden leer las siguientes letras: «p», «p.p.a», o bien, «espc.p». Con estas letras se señala condicionalmente el grado de pureza de la substancia: «p», significa un pequeño grado de pureza de la substancia, en donde puede haber impurezas de orden igual a 1 %; «p.p.a», significa, «puro para el análisis» y no puede contener más de unas cuantas décimas de uno por ciento de impurezas; «espc.p», significa, substancia espectralmente pura.

No es fácil obtener esta substancia, puesto que en el análisis espectral se observan impurezas que constituyen una milésima parte de la mezcla. La escritura «espc.p» indica que la pureza de la substancia se caracteriza, al menos, por «cuatro nueves», es decir, que el contenido de la substancia principal no es menor de 99.99 %.

La necesidad de substancias sólidas puras es muy grande. Para muchas propiedades físicas son perjudiciales las impurezas mayores de milésimas partes de uno por ciento, y para un problema especial que interesa extraordinariamente a la técnica contemporánea, para el problema de la obtención de materiales transistores (semiconductores), se necesitan purezas de siete nueves. Esto significa que para la resolución de problemas de ingeniería, un átomo innecesario entre diez millones de necesarios, representa un obstáculo. Para la obtención de tales materiales superpuros se recurre a métodos especiales.

Se pueden obtener germanio y silicio superpuros (éstos son los principales representantes de los materiales semiconductores), estirando paulatinamente el cristal creciente de la fundición. En la superficie del silicio fundido (o del germanio) se coloca una varilla, en cuyo extremo está fijo el cristal germen. Después se comienza a levantar lentamente la varilla; el cristal que va saliendo de la fundición se forma con los átomos de la substancia principal; los átomos de las impurezas se quedan en la fundición.

El método llamado de fusión en zonas ha hallado una aplicación más amplia. Del elemento a purificar se prepara una varilla de longitud arbitraria y de unos cuantos milímetros de diámetro. A lo largo de la varilla se desplaza un pequeño hornillo cilíndrico que la abarca. La temperatura del hornillo es suficiente para la fusión, y la porción de metal situada dentro del hornillo, se funde. De este modo, a lo largo de la varilla se desplaza una pequeña zona de metal fundido.

Generalmente, los átomos de la mezcla se disuelven con mayor facilidad en el líquido que en el cuerpo sólido. Por eso, en la frontera de la zona fundida, los átomos de la mezcla pasan de los lugares sólidos a la zona fundida y no retornan. La zona de fundición en movimiento va arrastrando a los átomos de las impurezas junto con la fundición. En la marcha de vuelta, el hornillo se desconecta, y la operación de arrastre de la zona fundida por la varilla de metal se repite una multitud de veces. Después de un número suficiente de ciclos no queda más que cortar el extremo impurificado de la varilla. Los materiales superpuros se obtienen en el vacío o en una atmósfera de gas inerte.

Cuando hay una gran parte de átomos extraños, la purificación se efectúa por otros métodos; la fusión por zonas y la extracción del cristal de la fundición, se emplea solamente para la purificación final del material.

Adsorción

Raramente se disuelven los gases en los cuerpos sólidos, es decir, raramente se introducen en los cristales. En cambio existe otro método de absorción de los gases por los cuerpos sólidos. Las moléculas de los gases se adhieren a la superficie de los cuerpos sólidos. Este fenómeno singular se llama adsorción[12]. Así, tenemos que la adsorción tiene lugar

[12]No se debe confundir la adsorción con la absorción, pues esta última presupone introducción de las moléculas.

cuando la molécula no puede introducirse en el cuerpo, pero se adhiere fácilmente a su superficie.

Adsorver significa adherirse a la superficie. Mas, ¿qué importancia puede tener este fenómeno? Una capa de una molécula de espesor, que cubre un objeto relativamente; grande no pesa más que unas insignificantes partes de gramo.

Hagamos el cálculo. El área de una molécula no muy grande es de unos 10 Angstrom cuadrados, o sea, 10^{-15} cm^2. Por lo tanto, en 1 cm^2 entrarán 10^{15} moléculas. Tal cantidad de moléculas, por ejemplo, de agua, pesa poco, $3{\cdot}10^{-8}$ g. Incluso en un metro cuadrado se distribuyen solamente 0.0003 g de agua.

En superficies de centenares de metros cuadrados se forman cantidades notables de substancia. En 100 m^2 entran ya 0.03 g de agua (10^{21} moléculas).

Pero, ¿es que nos encontramos en los trabajos del laboratorio con superficies tan considerables? Sin embargo, no es difícil darse cuenta que, a veces, cuerpos pequeñitos, que caben en el extremo de una cucharilla de té, tienen inmensas superficies, de cientos de metros cuadrados.

Un cubo de 1 cm de arista tiene una superficie de 6 cm^2 de área. Recortemos el cubo en 8 cubos iguales de 0.5 cm de arista. Las áreas de las caras de los cubos pequeños son de 0.25 cm^2. En total hay $6 \cdot 8 = 48$ caras. Su área total es igual a 12 cm^2. La superficie se ha hecho el doble.

De este modo, cada división del cuerpo aumenta su superficie. Dividamos ahora un cubo de 1 cm de arista en partículas de dimensiones de 1 micrón. 1 micrón $= 10^{-4}$ cm, por lo tanto, el cubo grande se dividirá en 10^{12} partículas. Cada partícula (para simplificar suponemos que éstas son cúbicas) tiene un área de 6 micrones cuadrados, o sea, $6 \cdot 10^{-3}$ cm. El área total de las, partículas es igual a $6 \cdot 10^4$ cm^2, o sea, a 6 metros cuadrados. La división hasta micrones no representa un límite.

Está completamente claro que la superficie específica (o sea, la superficie de un gramo de substancia) puede expresarse por números grandísimos. Ésta crece rápidamente a medida que se desmenuza la substancia, pues la superficie de un granito disminuye proporcionalmente al cuadrado de la dimensión, pero el número de granitos en una unidad de volumen aumenta proporcionalmente al cubo de la dimensión. Un gramo de agua que se ha vertido en el fondo del vaso tiene una superficie de unos cuantos centímetros cuadrados. Este mismo gramo, en forma de gotitas de agua, tendrá ya una superficie de decenas de centímetros cuadrados y un gramo de gotitas de niebla tiene una superficie de unos cuantos centenares de metros cuadrados.

El carbón desmenuzado (y cuanto más desmenuzado mejor), es capaz de adsorber amoníaco, dióxido de carbono y otros gases venenosos. Esta última propiedad le ha valido su aplicación en las caretas antigás. El carbón se desmenuza extraordinariamente bien y las dimensiones lineales de sus partículas se pueden hacer hasta de decenas de Angstrom. Por eso, un gramo de carbón especial (carbón «activado»), tiene una superficie de unos cuantos centenares de metros cuadrados. La careta antigás con carbón es capaz de adsorber decenas de litros de gas.

La adsorción tiene un empleo amplio en la industria química. Las moléculas de diversos gases, adsorbiéndose en la superficie, se ponen en contacto unas con otras y con mayor facilidad toman parte en las reacciones químicas. Para la aceleración de los procesos químicos, se emplea con frecuencia el carbón, así como metales finamente desmenuzados, como el níquel, el cobre y otros.

Las substancias que aceleran las reacciones químicas se llaman catalizadores.

Osmosis

Entre los tejidos de los animales hay unas membranas originales que tienen la facultad de dejar pasar a través de ellas las moléculas de agua, manteniéndose impermeables para las moléculas de las substancias disueltas en el agua.

Las propiedades de estas membranas son la causa de unos fenómenos físicos llamados osmóticos (o, simplemente ósmosis).

Figurémonos que tal pared semipermeable divide en dos partes un tubo preparado en forma de la letra U. En un brazo del tubo se vierte la disolución, en el otro, agua u otro disolvente. Vertiendo en ambos brazos cantidades iguales de líquido, se observa con asombro que, a igual nivel, no hay equilibrio. Después de breve tiempo, los líquidos se establecen a diversos niveles, elevándose el nivel en el brazo donde está la disolución. El agua, separada de la disolución por la pared semipermeable, tiende a diluir la disolución. Este fenómeno se llama ósmosis y la diferencia de niveles, presión osmótica.

¿Cuál es la causa que origina la presión osmótica? En el brazo de la derecha del tubo (Fig. 108), la presión se realiza solamente por el agua. En el brazo de la izquierda, la presión total se compone de la presión del agua y de la presión del soluto. Pero la comunicación está libre solamente para el agua y, siendo la pared semipermeable, el equilibrio se establece, no cuando la presión de la izquierda es igual a la presión total de la derecha, sino cuando la presión del agua pura es igual a la presión de la parte «acuosa» de la disolución. La diferencia que se crea de presiones totales es igual a la presión del soluto.

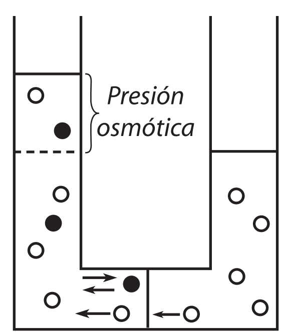


Fig. 108

Este exceso de presión representa la presión osmótica. Como muestran los experimentos y el cálculo, la presión osmótica es igual a la presión de un gas formado solamente por el soluto y que ocupa el mismo volumen. No es extraño por esto, que la presión osmótica se mida con números considerables.

Calculemos la presión osmótica creada en 1 litro de agua al disolver 20 g de azúcar (posiblemente que la concentración de azúcar en un vaso de té sea mayor). El peso molecular del azúcar, que tiene la fórmula química $C_{12}H_{22}O_{11}$, es igual a 342. Por las condiciones del problema, en un litro hay $\frac{20}{342}$ partes de mol de azúcar. Por lo tanto, a un mol de azúcar corresponde un volumen de $\frac{342}{20} = 17.1$ litros.

Pero, en condiciones «normales», a 0 $^{\circ}C$ y 1 atm, de presión, un mol de gas ocupa 22.4 litros. En correspondencia con las leyes de los gases ideales, la presión, considerándola como gas de azúcar a 0 $^{\circ}C$, sería igual a $\frac{22.4}{17.1}\,atm$, y a 20 $^{\circ}C$, a $\frac{22.4}{17.1} \cdot \frac{293}{273} = 1.4\ atm$. Ésta es la presión osmótica del azúcar.

En el experimento con la membrana semipermeable, esta presión osmótica equilibraría una columna de agua de 14 m de altura.

Con riesgo de causar al lector recuerdos desagradables, veamos cómo está ligada la presión osmótica con la acción purgante de las disoluciones de ciertas sales. Las paredes de los intestinos son semipermeables para una serie de disoluciones. Si la sal no pasa por el intestino (como la mirabilita o sal de Glauber), en éste se crea una presión osmótica que aspira el agua por los tejidos del organismo al intestino.

¿Por qué el agua muy salada no apaga la sed? Resulta que la culpa es también de la presión osmótica. Los riñones no pueden efectuar la secreción de la orina con una presión osmótica mayor que la presión en los tejidos del organismo. Por eso, el organismo que ha adquirido agua de mar, no sólo no la cede a los líquidos de los tejidos, sino que, por el contrario, segrega con la orina el agua que ha extraído de los tejidos.

XIV. Rozamiento

Fuerzas de rozamiento

No es la primera vez que hablamos del rozamiento. Y, verdaderamente, ¿cómo se podría hablar del movimiento sin mentar el rozamiento? Casi cada movimiento de los cuerpos que nos rodean va acompañado de rozamiento. El automóvil en el que el chofer ha desconectado el motor, se para; después de muchas oscilaciones se para el péndulo; lentamente se sumerge en una lata de aceite de girasol una bolita metálica pequeñita que se ha lanzado en ella. ¿Qué obliga a pararse a los cuerpos que se mueven por una superficie? ¿A qué se debe la caída paulatina de la bolita en el aceite? Nosotros respondemos: son las fuerzas de rozamiento que se crean al moverse unos cuerpos por las superficies de otros.

Pero, las fuerzas de rozamiento no sólo se crean en el movimiento. Probablemente ustedes han tenido que trasladar los muebles de un lugar a otro de la habitación. Sabrán que es difícil mover de su sitio un pesado armario. La fuerza que se opone a este esfuerzo se llama fuerza estática de rozamiento.

También se crean fuerzas de rozamiento cuando movemos un objeto y cuando lo rodamos. Éstos son dos fenómenos físicos un poco diferentes. Por eso, se distinguen el rozamiento de deslizamiento y el rozamiento de rodadura. El rozamiento de rodadura es decenas de veces menor que el de deslizamiento.

Claro que, en algunos casos, el deslizamiento también se efectúa con gran facilidad. Los trineos se deslizan fácilmente por la nieve y los patines todavía mejor por el hielo.

¿De qué causas dependen las fuerzas de rozamiento? La fuerza de rozamiento entre los cuerpos sólidos depende poco de la velocidad del movimiento, sin embargo, es proporcional al peso del cuerpo. Si el peso del cuerpo aumenta el doble, será dos veces más difícil moverlo del sitio o arrastrarlo. No nos hemos expresado con plena exactitud, pues no es tanto el peso lo que importa, sino la fuerza que presiona al cuerpo hacia la superficie. Si el cuerpo es ligero pero con la mano hacemos fuerte presión sobre él, esta presión influirá, naturalmente, en la fuerza de rozamiento. Si se indica con P la fuerza que presiona al cuerpo sobre la superficie (la mayoría de las veces, ésta es el peso), para la fuerza de rozamiento F_{roz} es valedera esta fórmula sencilla:

$$F_{roz} = kP.$$

Y, ¿cómo se tienen en cuenta las propiedades de estas superficies? Pues, se sabe bien que unos mismos trineos, con unos mismos patines, se deslizan de diverso modo, según que estos patines estén forrados de hierro o no lo estén. Estas propiedades las tiene en cuenta el coeficiente de proporcionalidad k. Éste se llama coeficiente de rozamiento.

El coeficiente de rozamiento del metal con la madera es igual a $\frac{1}{2}$. Para mover un bloque metálico de 2 kgf de peso, situado en una mesa pulida de madera, solamente hace falta una fuerza de 1 kgf.

El coeficiente de rozamiento del acero con el hielo es solamente igual a 0.027. El mismo bloque se consigue moverlo con una fuerza que es solamente igual a 54 gf.

El área de la superficie no está incluida en la fórmula expuesta: la fuerza de rozamiento no depende del área de la superficie de contacto de los cuerpos. Se necesita una misma fuerza para mover del sitio o arrastrar con una velocidad constante una hoja amplia de acero de un kilogramo de peso y una pesa de un kilo que se apoya solamente en una pequeña área de la superficie.

Otra observación más sobre las fuerzas de rozamiento por deslizamiento. Es más difícil mover un cuerpo del sitio que arrastrarlo; la fuerza de rozamiento que se vence en el primer instante del movimiento (el rozamiento estático), es mayor que los valores sucesivos de la fuerza de rozamiento en un $20{-}30\,\%$.

¿Qué se puede decir de la fuerza de rozamiento de rodadura, por ejemplo, de una rueda? Al igual que la fuerza de deslizamiento, ésta es tanto mayor, cuanto mayor sea la fuerza que presiona a la rueda sobre la superficie. Además, la fuerza de rozamiento de rodadura es inversamente proporcional al radio de la rueda. Esto es comprensible: cuanto mayor sea la rueda, tanto menor importancia tendrán las asperezas de la superficie por la que ésta rueda.

Si se comparan las fuerzas que se tienen que vencer al hacer deslizar o rodar un cuerpo, se obtiene una diferencia considerable. Por ejemplo, para arrastrar por el asfalto un bloque de acero de $1\,Tm$ de peso, hay que aplicar una fuerza de $200\,kgf$, fuerza que son capaces de aplicar solamente los atletas. Sin embargo, para llevar este mismo bloque en un carro se necesita una fuerza que no sobrepase de $10\,kgf$ y esto lo puede hacer un niño.

No tiene nada de extraño que el rozamiento de rodadura «haya vencido» al rozamiento por deslizamiento. No en vano, la humanidad pasó ya hace mucho tiempo al transporte de ruedas.

La sustitución de los patines por las ruedas no es todavía una victoria completa sobre el rozamiento de deslizamiento. Pues, la rueda hay que ponerla en el eje. A primera vista es imposible evitar el rozamiento de los ejes sobre los cojinetes. Así pensaban a lo largo de los siglos, y procuraban disminuir el rozamiento de deslizamiento en los cojinetes solamente con diversos lubricantes. No son pocos los servicios de los lubricantes: el rozamiento de deslizamiento disminuye en $8{-}10$ veces. Pero, incluso con la lubricación, en muchísimos casos, el rozamiento de desplazamiento es tan grande que resulta demasiado caro. Esta circunstancia representaba al fin del siglo pasado un serio freno en el desarrollo de la técnica. Entonces es cuando apareció la idea admirable de sustituir en los cojinetes el rozamiento de deslizamiento por el de rodadura. Esta sustitución se efectúa con el cojinete de bolas. Entre el eje y el casquillo se colocaron bolitas. Al girar la rueda, las bolitas ruedan por el casquillo, y el eje, por las bolitas. En la Fig. 109 se muestra la construcción de este mecanismo. De este modo, el rozamiento de deslizamiento se sustituyó por el de rodadura. Con esto, las fuerzas de rozamiento disminuyeron decenas de veces.

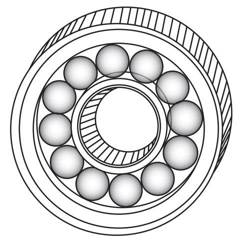


Fig. 109

Resulta difícil apreciar el papel de los cojinetes de rotación en la técnica moderna. Éstos se hacen con bolitas, con rodillos cilíndricos, con rodillos cónicos. Todas las máquinas, están provistas de cojinetes, tanto las grandes como las pequeñas. Existen cojinetes de bolas, cuyas dimensiones son de un milímetro; algunos cojinetes, para máquinas grandes, pesan más de una tonelada. Se construyen cojinetes de bolas (claro, los habrán visto en las vitrinas de las ferreterías) de los más diversos diámetros, desde unas cuantas partes de milímetro hasta unos cuantos centímetros.

Fricción viscosa en los líquidos y en los gases

Hasta ahora hemos hablado del rozamiento «seco», o sea, del rozamiento que surge al ponerse en contacto cuerpos sólidos. Pero, los cuerpos que flotan y los que vuelan también están sometidos a la acción de las fuerzas de rozamiento. Lo que pasa es que es otro el origen del rozamiento: el rozamiento seco se sustituye por el «húmedo».

La resistencia que experimenta un cuerpo que se mueve en el agua o en el aire está sujeta a otras leyes, que se diferencian esencialmente de las leyes del rozamiento seco. En lo que se refiere al rozamiento, el comportamiento de los líquidos no se diferencia del de los gases. Por eso, todo lo que se diga a continuación, se refiere en igual grado a los gases y a los líquidos.

Una de las distinciones del rozamiento «húmedo» del seco consiste en la ausencia del rozamiento estático; generalmente, se puede mover del sitio un objeto suspendido en el agua o en el aire con una fuerza tan pequeña como se quiera. En cuanto a la fuerza de rozamiento que experimenta un cuerpo en movimiento, ésta depende de la velocidad del movimiento, de la forma y las dimensiones del cuerpo y de las propiedades del fluido. El estudio del movimiento de los cuerpos en los líquidos y en los gases ha mostrado que no hay una ley única para el rozamiento «húmedo», sino que hay dos leyes diferentes: una, para velocidades pequeñas y, otra, para velocidades grandes. La existencia de dos leyes significa, que a velocidades grandes y pequeñas de los cuerpos sólidos, en los líquidos y en los gases, la corriente del fluido en el que se mueven los cuerpos tiene diferente carácter.

A velocidades pequeñas, la fuerza de la resistencia es directamente proporcional a la velocidad y a la dimensión del cuerpo:

$$F \propto vL.$$

¿Cómo se debe comprender la proporcionalidad a la dimensión, si no se ha dicho de qué forma de cuerpo se trata? Esto significa, que para dos cuerpos que tienen una forma completamente semejante (o sea, que todas sus dimensiones están en igual razón), las fuerzas de resistencia se relacionan igual que las dimensiones lineales de ellos.

La magnitud de la resistencia depende en gran parte de las propiedades de los fluidos. Comparando las fuerzas de rozamiento que experimentan objetos iguales, que se mueven con velocidades iguales en diferentes fluidos, vemos que los cuerpos experimentan tanto mayor resistencia, cuanto más denso sea el fluido, o como suelen decir, cuanto más viscoso sea éste. Por esto, resulta oportuno denominar el rozamiento de que tratamos, fricción viscosa. Es comprensible que el aire origina una fricción viscosa insignificante, que es, aproximadamente, 60 veces menor que la del agua. Los líquidos pueden ser «no espesos», como el agua, y muy viscosos, como la crema agria o la miel.

Sobre el grado de viscosidad de un líquido se puede juzgar, bien por la rapidez con que se sumergen en él los cuerpos sólidos, bien por la rapidez con que sale el líquido por los orificios.

Medio litro de agua sale por un embudo en unos segundos. Un líquido muy viscoso sale por el mismo durante horas, o incluso, durante días. Se puede aducir un ejemplo de líquido todavía más viscoso. Los geólogos han observado que en las pendientes interiores de los cráteres de algunos volcanes, entre las acumulaciones de lava, se encuentran trozos de forma esférica. A primera vista es incomprensible en absoluto cómo se pudo formar tal bola de lava dentro del cráter. Esto no se entiende si se habla de la lava como de un cuerpo sólido. Si la lava se comporta como un líquido, saldrá del cañón del cráter en forma de gotas, como cualquier otro líquido. Pero hay una gota que se forma, no en una parte de segundo, sino durante decenas de años. Cuando la gota se haga muy pesada, se desprenderá y «goteará» al fondo del cráter del volcán.

De este ejemplo queda claro, que no se deben equiparar los cuerpos sólidos verdaderos y los cuerpos amorfos que, como ya sabemos, son más parecidos a los líquidos que a los cristales. Precisamente la lava es un cuerpo amorfo. Parece que es sólido, pero en realidad es un líquido muy viscoso.

¿Qué les parece, el lacre, es un cuerpo sólido o no? Tomemos dos corchos y coloquémoslos en el fondo de dos tazas. Echemos en una de ellas una sal cualquiera fundida (por ejemplo, salitre, que es fácil conseguir), y en la otra echemos lacre. Ambos líquidos se cuajan (se solidifican) cubriendo y sepultando a los corchos. Coloquemos estas tazas en el armario y olvidémonos por mucho tiempo de ellas. Después de unos cuantos meses veremos la diferencia entre el lacre y la sal. El corcho cubierto de sal reposa como antes en el fondo de la taza, mientras que el corcho cubierto de lacre ha emergido a flote. ¿Cómo ha ocurrido esto? Simplemente, el corcho ha emergido igual que lo hubiera hecho en el agua. La diferencia está solamente en el tiempo; cuando las fuerzas de fricción viscosa son pequeñas, el corcho emerge inmediatamente, mientras que en los líquidos muy viscosos la emergencia dura meses enteros.

Las fuerzas de resistencia a grandes velocidades

Pero, volvamos a examinar las leyes del rozamiento «húmedo». Como ya hemos aclarado, a velocidades pequeñas la resistencia depende de la viscosidad del fluido, de la velocidad del movimiento y de las dimensiones lineales del cuerpo. Examinemos ahora las leyes de rozamiento a velocidades grandes. Pero primero hay que decir qué velocidades se consideran pequeñas y qué velocidades se consideran grandes. No nos interesa el valor absoluto de la velocidad, pero nos interesa si ésta es suficientemente pequeña para que se cumpla la ley de la fricción viscosa examinada más arriba.

Resulta que no se puede señalar un número de metros por segundo que, para todos los casos, a velocidades menores, sean aplicables las leyes de la fricción viscosa. El límite de aplicación de la ley que se estudia, depende de las dimensiones del cuerpo y del grado de viscosidad y de densidad del fluido.

Para el aire son «pequeñas» las velocidades menores de:

$$\frac{0.75}{L\ (cm)}\,\frac{cm}{seg},$$

para el agua, las menores de:

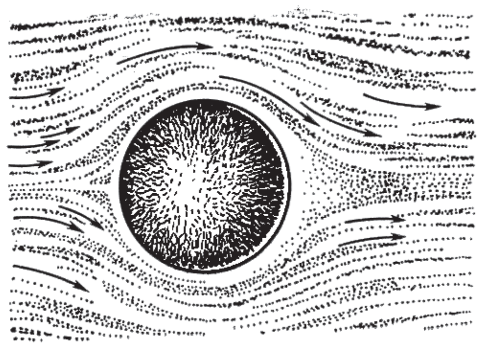
$$\frac{0.05}{L\ (cm)}\,\frac{cm}{seg},$$

y para los líquidos viscosos, tales como la miel espesa, las menores de:

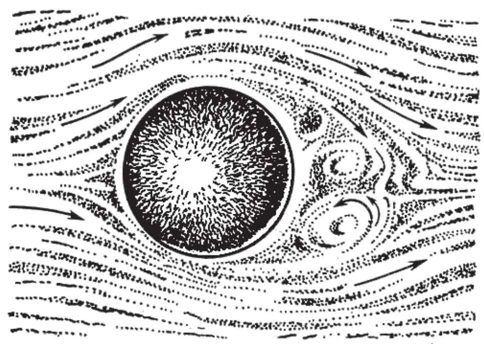
$$\frac{100}{L\ (cm)}\,\frac{cm}{seg}.$$

Por lo tanto para el aire y, sobre todo, para el agua, son poco útiles las leyes de fricción viscosa; incluso para pequeñas velocidades de alrededor de 1 $\frac{cm}{seg}$; éstas son aplicables solamente para cuerpos diminutivos que miden cerca de un milímetro. La resistencia que experimenta una persona que bucea en el agua, no se somete en grado alguno a la ley de la fricción viscosa.

¿Cómo se explica que al variar la velocidad, se altera la ley de resistencia del medio ambiente? Hay que buscar las causas en la alteración del carácter aerodinámico del líquido en el que se mueve el cuerpo. En la Fig. 110 están representados dos cilindros circulares que se mueven en un líquido (el eje del cilindro es perpendicular a la figura). Si el movimiento es lento, el líquido circunda suavemente el objeto en movimiento; la fuerza de resistencia que tiene que vencer es la de fricción viscosa (Fig. 110 *a*). Si la velocidad es grande, por detrás del cuerpo en movimiento se crea un complicado movimiento del líquido (Fig. 110 *b*). A veces aparecen y a veces desaparecen en el fluido unas figuras extravagantes que forman anillos, remolinos, etc. El cuadro de las figuras varía constantemente. La aparición de este movimiento, llamado turbulento, cambia radicalmente la ley de la resistencia.



a)



b)

Fig. 110

La resistencia al avance depende de la velocidad y de las dimensiones del objeto, pero de otro modo que la de viscosidad; aquélla es proporcional al cuadrado de la velocidad y al cuadrado de las dimensiones lineales. En este movimiento, la viscosidad del fluido ya no juega un papel importante; la propiedad determinante es ahora su densidad y, además, la fuerza de resistencia es proporcional a la primera potencia de la densidad del fluido. Por lo tanto, para la fuerza F de la resistencia al avance vale la fórmula:

$$F \propto \rho v^2 L^2,$$

donde v es la velocidad del movimiento; L, las dimensiones lineales del objeto y ρ, la densidad del medio ambiente. El coeficiente numérico de proporcionalidad, que no hemos escrito, tiene diferentes valores en dependencia de la forma del cuerpo.

Forma currentilínea

Como ya se dijo anteriormente, el movimiento en el aire casi siempre es «ligero», o sea, que el papel principal lo juega la resistencia al avance y no la de viscosidad.

Experimentan resistencia al avance los aviones, los pájaros, los paracaidistas. Si una persona cae en el aire sin paracaídas, después de cierto tiempo el descenso se hace uniforme (la resistencia se equilibra con el peso), pero con una velocidad considerable, de unos 50 $\dfrac{m}{seg}$. La apertura del paracaídas da lugar a un retardamiento brusco del descenso: el mismo peso se equilibra ahora con la resistencia de la cúpula del paracaídas. Como la fuerza de la resistencia es proporcional a la velocidad del movimiento, al igual que a las dimensiones del objeto que cae, la velocidad disminuirá en tantas veces, en cuantas se alteren las medidas lineales de éste. Como el diámetro del paracaídas es de cerca de 7 m y el «diámetro» del hombre de cerca de un metro, la velocidad del descenso disminuirá hasta 7 $\dfrac{m}{seg}$. Con esta velocidad se puede aterrizar sin peligro alguno.

Hay que subrayar que es más fácil resolver el problema del aumento de la resistencia que el problema inverso. Los problemas técnicos para disminuir la resistencia que el aire ofrece al automóvil y al avión, o la resistencia que ofrece el agua al submarino, son muy importantes y difíciles.

Resulta que, cambiando la forma del cuerpo, se puede disminuir en muchas veces la resistencia al avance. Para esto, hay que reducir al mínimo el movimiento turbulento, que es el origen de la resistencia. Esto se consigue dando al objeto una forma especial, o como suelen decir, una forma currentilínea (aerodinámica).

¿Qué forma es, en este sentido, la mejor? A primera vista se puede creer que al cuerpo hay que darle una forma afilada por delante. Como si este filo «cortase» mejor el aire. Pero resulta que lo importante no es cortar el aire, sino perturbarle lo menos posible, para que éste suavemente circunde el objeto. El mejor perfil para un cuerpo que se mueve en un fluido, es la forma achatada por delante y afilada por detrás[13]. En este caso, el fluido se desliza suavemente por el borde afilado y el movimiento turbulento se reduce al mínimo. De ningún modo se deben dirigir los ángulos agudos hacia adelante, puesto que los filos provocan la formación de un movimiento turbulento.

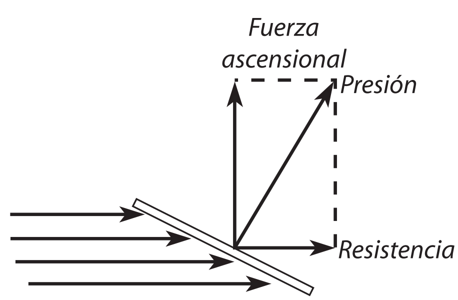


Fig. 111

[13]Las proas afiladas de las lanchas y de los barcos se necesitan para «cortar» las olas, o sea, solamente cuando el movimiento se efectúa por la superficie.

La forma currentilínea del ala del avión, no sólo ofrece menor resistencia al movimiento, sino que crea mayor fuerza ascensional cuando la superficie currentilínea está inclinada hacia arriba en dirección del movimiento. El aire, siguiendo el contorno del ala, presiona sobre ésta, fundamentalmente en la dirección perpendicular a su plano (Fig. 111). Está claro que para el ala inclinada esta fuerza está dirigida hacia arriba.

Con el aumento del ángulo, la fuerza ascensional crece. Pero un razonamiento fundado solamente en ideas geométricas, nos llevaría a la conclusión errónea de que, cuanto mayor sea el ángulo en dirección del movimiento, tanto mejor. En realidad, a medida que aumenta el ángulo, se hace más difícil el deslizamiento suave a lo largo del contorno del plano y, a un valor determinado del ángulo, como se ilustra en la Fig. 112 se crea una fuerte turbulencia; la resistencia aumenta bruscamente y disminuye la fuerza ascensional.

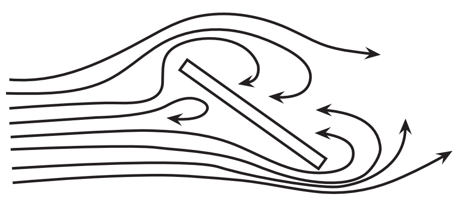


Fig. 112

Desaparición de la viscosidad

Frecuentemente, explicando algún fenómeno o describiendo la conducta de tales o cuales cuerpos, nos referimos a ejemplos conocidos. Está completamente claro, solemos decir, que este objeto se mueve de tal modo, pues los otros cuerpos se mueven de acuerdo con las mismas reglas. En la mayoría de los casos es satisfactoria la explicación de lo nuevo mediante lo conocido. Por eso, no hemos experimentado dificultades especiales al explicar al lector las leyes por las que se mueven los fluidos, pues todos han visto cómo corre el agua, y las leyes de este movimiento parecen completamente naturales.

Sin embargo, hay un líquido absolutamente extraordinario, que no se parece a ningún líquido y que se mueve según unas leyes especiales, propias de él. Éste es el helio líquido.

Ya dijimos que el helio líquido se mantiene líquido hasta la temperatura del cero absoluto. Sin embargo, el helio a temperatura mayor de 2 K (más exactamente, de 2.19 K), y el helio a una temperatura menor, son líquidos diferentes por completo. A más de dos grados, el helio, por sus propiedades, no se distingue de los demás líquidos. Más bajo de esta temperatura, el helio se convierte en un líquido maravilloso, llamado helio II.

La propiedad más sorprendente del helio II es su superfluidez, descubierta por P. Kapitza en el año 1938, que consiste en la ausencia absoluta de viscosidad.

Para observar la superfluidez se prepara un recipiente, en cuyo fondo haya una rendija estrecha, de medio micrón solamente. Un líquido ordinario casi no pasa por esta rendija; así se comporta también el helio a temperaturas mayores de 2.19 K. Pero, en cuanto la temperatura se hace menor de 2.19 K, la velocidad con que pasa el helio por la rendija aumenta bruscamente, por lo menos en mil veces. El helio II mana por una abertura finísima casi instantáneamente, o sea, pierde la viscosidad por completo. La superfluidez del helio da lugar a un fenómeno todavía más extraño. El helio II es capaz de «salir» del vaso o de la probeta que lo contiene.

En la Fig. 113 se muestra el esquema de la realización de este experimento. La probeta con el helio II se coloca en un vaso de Dewar (un termo) sobre un baño de helio. «Sin más ni más», el helio se eleva por la pared de la probeta en forma de una membrana finita, imperceptible por completo, y va saliendo del borde; de la parte inferior de la probeta se van desprendiendo las gotas.

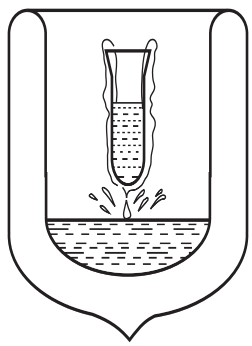


Fig. 113

Hay que recordar, que gracias a las fuerzas capilares; de las que se ha hablado en la pág. 156, las moléculas de cualquier líquido que moja las paredes del recipiente, suben por esta pared y forman en ésta una membrana finísima, cuyo espesor es del orden de una millonésima parte de centímetro. Esta membrana es imperceptible y, en general, no se distingue nada del líquido viscoso ordinario.

Si operamos con helio privado de viscosidad, el cuadro cambia por completo. Esto es debido a que las rendijas estrechas no impiden el movimiento del helio superfluido, y una membrana superficial fina es lo mismo que una rendija estrecha. El líquido desprovisto de viscosidad se vierte formando una capa finísima. La membrana superficial forma un sifón a través del borde del vaso o de la probeta, por el cual el helio se vierte del borde del recipiente.

Está claro que en el líquido ordinario no se observa nada parecido. Teniendo una viscosidad normal, el líquido no puede «penetrar» prácticamente por un sifón de un espesor insignificante. El movimiento es tan lento, que la penetración duraría millones de años.

Así pues, el helio II está privado de viscosidad alguna. Sería lógico sacar la conclusión de que un cuerpo sólido tendría que moverse en tal líquido sin rozamiento. Coloquemos en el helio líquido un disco suspendido de un hilo y comencemos a torcer el hilo. Dejando libre este simple dispositivo, se crea algo parecido al péndulo: el hilo con el disco se pone en oscilación y se va retorciendo periódicamente hacia una u otra parte. Si no hubiese rozamiento, el disco tendría que vibrar eternamente. Sin embargo, no ocurre nada semejante. Después de un tiempo relativamente corto, aproximadamente igual que para el helio I normal (o sea, para el helio a la temperatura mayor de 2.19 K), el disco se para. ¡Qué cosa más rara! Vertiéndose por la rendija, el helio se comporta como un líquido sin viscosidad, mientras que en relación a los cuerpos que se mueven en él, se comporta como un líquido viscoso ordinario. ¡Esto sí que realmente es extraordinario e incomprensible!

Ahora no queda más que recordar lo dicho con respecto al hecho de que el helio no se endurece hasta el cero absoluto. Todo esto indica que no sirven nuestras ideas habituales sobre el movimiento. Si el helio se mantiene «ilegalmente» líquido, ¿hay que asombrarse de la conducta ilegítima de este líquido?

Solamente se puede entender el comportamiento del helio desde el punto de vista de las nuevas ideas sobre el movimiento, que han recibido el nombre de mecánica cuántica. Hagamos la prueba de dar una idea muy general sobre la explicación que da la mecánica cuántica al comportamiento del helio líquido.

La mecánica cuántica es una teoría muy perspicaz y difícil de comprender, y no debe asombrarse el lector de que la explicación parezca más extraña que el mismo fenómeno. Resulta que cada partícula de helio líquido participa simultáneamente en dos movimientos: en uno, que es superfluido y que no está ligado a la viscosidad y, en otro, que es ordinario.

El helio II se comporta como si estuviese compuesto de una mezcla de dos líquidos que se mueven absolutamente independientes «uno a través del otro». La conducta de un líquido es normal, es decir, que éste posee viscosidad ordinaria, mientras que la otra parte componente es superfluida.

Cuando el helio fluye por la rendija o se vierte por el borde del vaso, observamos el fenómeno de superfluidez. Sin embargo, en las oscilaciones del disco sumergido en el helio, el rozamiento que detiene al disco se produce debido a que en la parte normal del helio el rozamiento del disco es inevitable.

La facultad de participar en dos movimientos diferentes origina también unas insólitas propiedades de conductibilidad térmica del helio, que son extrañas por completo. Como ya se advirtió, generalmente, los líquidos son malos conductores del calor. El helio I se comporta de un modo semejante a los líquidos ordinarios. Cuando se efectúa la transformación en helio II, su conductibilidad térmica aumenta, aproximadamente, en mil millones de veces. He aquí que el helio II conduce el calor mejor que los mejores conductores ordinarios del calor, como el cobre y la plata.

Esto es debido a que el movimiento superfluido del helio no participa en la propagación del calor. Por esto, cuando en el helio II hay cambios de temperatura, se crean dos corrientes que van en direcciones opuestas, y una de ellas, la normal, lleva consigo calor. Esto no se parece en nada a la conductibilidad térmica ordinaria. En el líquido ordinario, el calor se transmite por los choques de las moléculas. En el helio II, el calor se propaga junto con la parte ordinaria del helio que fluye como un líquido. En este caso, el término «flujo del calor» está completamente justificado. Este método de transmisión del calor es el que da lugar a una conductibilidad térmica elevadísima.

Esta explicación de la conductibilidad térmica del helio puede parecer tan extraña que posiblemente se resistan a creerla. Pero pueden convencerse directamente de que lo dicho es justo en el siguiente experimento, cuya idea es muy sencilla.

En un baño de helio líquido hay un vaso de Dewar, lleno también de helio. El recipiente está comunicado con el baño por un apéndice capilar. El helio del recipiente se calienta con una espiral eléctrica; el calor no se transmite al helio que le rodea, puesto que las paredes del recipiente no propagan el calor.

Enfrente del tubo capilar hay una laminilla colgada de un hilo. Si el calor fluye como un líquido, aquél tiene que hacer girar a la laminilla. Precisamente esto es lo que ocurre. Además, la cantidad de helio en el recipiente no varía. ¿Cómo explicar este fenómeno maravilloso? De un sólo modo: durante el calentamiento se crea una corriente de la parte normal del líquido que va del lugar caliente al lugar frío, y una corriente de la parte superfluida que va en dirección contraria. La cantidad de helio en cada punto no varía, pero como junto con la transmisión del calor se mueve la parte normal del líquido, la laminilla gira gracias al rozamiento de viscosidad de esta parte y se mantiene inclinada tanto tiempo, cuanto dure el calentamiento.

Del hecho de que el movimiento superfluido no transmite calor, se deduce también otra consecuencia. Antes se ha dicho que el helio «se deslizaba» por el borde del vaso. Pero, «se escapa» del vaso la parte superfluida y se queda la parte normal. El calor está ligado solamente con la parte normal del helio y no acompaña a la parte superfluida que «se escapa». Por lo tanto, a medida que «se escapa» el helio del recipiente, una misma cantidad de calor va correspondiendo a una cantidad cada vez menor de helio; el helio que queda en el recipiente tiene que calentarse. Realmente, esto se observa en el experimento.

Las masas de helio, que están ligadas con los movimientos superfluido y normal, no son iguales. Su relación depende de la temperatura. Cuanto menor sea la temperatura, tanto mayor será la parte superfluida de la masa del helio. En el cero absoluto, todo el helio se hace superfluido. A medida que aumenta la temperatura, mayor parte de helio empieza a portarse normalmente y, a la temperatura de 2.19 K, todo el helio se hace normal y adquiere las propiedades de un líquido ordinario.

Pero el lector ya tendrá en la punta de la lengua las preguntas: ¿Qué helio superfluido es ése?, ¿cómo puede una partícula de líquido participar simultáneamente en dos movimientos?, ¿cómo explicar el mismo hecho de que haya dos movimientos de una partícula?... Sintiéndolo mucho nos vemos obligados a dejar aquí sin respuesta todas estas preguntas. La teoría del helio II es demasiado complicada y para explicarla necesitaríamos mucho espacio y tiempo.

Plasticidad

Plasticidad es la capacidad del cuerpo de recobrar su forma después de haber dejado de actuar una fuerza sobre él. Si se suspende una pesa de un kilogramo de un alambre de acero de un metro de largo y de 1 mm^2 de sección transversal, el alambre se alarga. El alargamiento es insignificante, solamente de 0.05 mm, pero es fácil observarlo. Si se quita la pesa, el alambre se encoge en los mismos 0.05 mm y la línea de referencia vuelve a la posición anterior. Tal deformación se llama elástica.

Anotemos, que el alambre de 1 mm^2 de sección, bajo la acción de una fuerza de 1 kgf, y el alambre de 1 cm^2 de sección, bajo la acción de una fuerza de 100 kgf, están, como suele decirse, en condiciones iguales de tensión mecánica. Por esto, siempre hay que describir el comportamiento del material indicando la tensión (y no la fuerza, que carece de sentido, si no se conoce la sección del cuerpo), o sea, la fuerza por unidad de superficie. Generalmente, los cuerpos, como los metales, el vidrio, las piedras, se pueden dilatar por elasticidad, en el mejor de los casos, en algunos tantos por ciento solamente. La goma posee unas cualidades elásticas admirables. La goma se puede alargar en varios centenares de tantos por ciento (o sea, se puede hacer dos y tres veces más larga que la original), y, soltando tal cordón de goma, vemos que vuelve a la posición primitiva.

Bajo la acción de fuerzas pequeñas, todos los cuerpos sin distinción tienen elasticidad. Sin embargo, el límite de elasticidad aparece en unos cuerpos antes y en otros mucho después. Por ejemplo, para los metales blandos como el plomo, el límite de elasticidad aparece cuando se suspende del extremo de un alambre de un milímetro cuadrado de sección, una carga de $0.2-0.3$ kgf. Para los materiales duros, como el acero, este límite es, aproximadamente, 100 veces mayor, o sea alrededor de 25 kgf.

Con respecto a las grandes fuerzas que superan el límite de elasticidad, los cuerpos se pueden dividir en dos clases: frágiles, tales como el vidrio, y plásticos, tales como la arcilla.

Si se comprime con el dedo un trozo de arcilla, quedará en ésta una huella, que con mucha exactitud reproducirá hasta las ondulaciones más complicadas del dibujo de la piel. Si se golpea con el martillo un trozo de hierro maleable o un trozo de plomo, quedará una huella bien clara. La acción ha cesado, mientras que la deformación se mantiene; esta deformación se llama plástica o residual. Tales huellas residuales no se consiguen obtener en el vidrio; si se sobrepasa cierto límite, éste se rompe. Lo mismo de frágiles son algunos metales y aleaciones, como, por ejemplo, el hierro colado. Un balde de hierro, golpeando con un martillo, se aplasta, mientras que un puchero de hierro colado se raja.

Sobre la resistencia de los cuerpos frágiles se puede juzgar por los datos siguientes. Para convertir en polvo un trozo de hierro colado hay que obrar con una fuerza de cerca de $50-80$ kgf sobre un milímetro cuadrado de superficie. Para el ladrillo, este número baja hasta $1.5-3$ kgf.

Como para cualquier clasificación, la división de los cuerpos en frágiles y plásticos es en cierto grado convencional. En primer lugar, un cuerpo que es frágil a temperatura baja puede ser plástico a temperaturas superiores. El vidrio se puede trabajar admirablemente como material plástico, si se le calienta hasta una temperatura de unos cuantos centenares de grados.

Los metales maleables como el plomo se pueden forjar fríos, mientras que los metales duros se forjan solamente calentándolos mucho, en forma incandescente. El aumento de la temperatura eleva bruscamente las propiedades plásticas de los materiales.

Una de las propiedades fundamentales de los metales, que los hacen ser materiales de construcción insustituibles, es su dureza a temperaturas de la habitación y su plasticidad a temperaturas más altas; a los metales candentes es fácil darles la forma que se necesita, mientras que a la temperatura de la habitación, solamente se les puede alterar la forma con fuerzas considerables.

La estructura interna del material ejerce una influencia esencial en las propiedades mecánicas. Está claro que las grietas y los vacíos debilitan la resistencia del cuerpo y lo hacen más frágil.

Es admirable la facultad de consolidación de los cuerpos plásticos deformables. El cristal solitario del metal, que acaba de crearse en la fundición, es muy blando. Los cristales de muchos metales son tan blandos, que es fácil doblarlos con los dedos, pero... desdoblarlos, es imposible. Se ha efectuado su consolidación. Ahora, este ejemplar se puede deformar plásticamente aplicando una fuerza sensiblemente mayor. Resulta que la plasticidad no sólo es una propiedad del material, sino también una propiedad de su tratamiento.

¿Por qué se preparan los instrumentos en la forja y no fundiendo el metal? La causa es clara, el metal sometido a la forja (o a la laminación o estiramiento), es mucho más resistente que el fundido.

Por mucho que se forje el metal, nunca podremos elevar su resistencia más de cierto límite, llamado punto de fluencia. Para el acero, este límite se encuentra en el intervalo de $30 - 50\ \dfrac{kgf}{mm^2}$.

Este número significa lo siguiente. Si de un alambre de un milímetro cuadrado de sección se suspende una pesa de un *pud*[14], (inferior a la carga de fluencia) el alambre empieza a alargarse y a consolidarse. Por consiguiente, el alargamiento termina rápidamente y la pesa queda suspendida del alambre. Si se suspendiera del mismo alambre una pesa de dos o de tres *puds* (superior a la carga de fluencia), el cuadro sería diferente. El alambre se estiraría continuamente hasta que se rompiese. Subrayemos de nuevo, que el comportamiento mecánico del cuerpo no se determina por la fuerza, sino por la tensión. Un alambre de 100 micrones cuadrados de sección se rompe a causa de la acción de una carga de kgf, es decir, de $3 - 5\ gf$.

Dureza

La tenacidad y la dureza no van emparejadas. Un bramante, un trozo de paño, un hilo de seda, pueden tener gran tenacidad; para romperlos se necesita una tensión considerable. Naturalmente, nadie dirá que el bramante y el paño son materiales duros. Por el contrario, la tenacidad del vidrio no es grande y es, en cambio, un material duro.

El concepto de dureza que se emplea en la técnica se ha reproducido de la vida cotidiana. La dureza es la reacción a la penetración. Un cuerpo es duro si es difícil rayarlo, si es difícil dejar una huella en él. Al lector le puede parecer que estas definiciones son un poco confusas. Es que estamos acostumbrados a que el concepto físico se exprese por un número. ¿Cómo hacer esto con respecto a la dureza?

[14]El pud es una medida rusa antigua, de poco uso en la actualidad, equivalente a 16 kg (N. del T.).

Los mineralogistas emplean ya hace mucho un método bastante primitivo, pero útil en la práctica. Colocan en fila diez minerales determinados. Primero está el diamante, detrás le sigue el corindón, luego, el topacio, el cuarzo, el feldespato, la apatita, la fluorita, la caliza, el yeso y el talco. La serie está elegida del modo siguiente: el diamante puede rayar a todos los demás minerales, pero ni uno de éstos puede rayarle. Esto significa que el diamante es el mineral más duro. La dureza del diamante se aprecia con el número 10. El siguiente, después del diamante, el corindón, es más duro que todos los demás minerales que le siguen; el corindón puede rayarlos. Al corindón le atribuyen el número 9 de dureza. Los números 8, 7 y 6 se atribuyen, por las mismas razones, al topacio, al cuarzo y al feldespato, respectivamente. Cada uno de ellos es más duro (o sea, que puede rayar) que los minerales que van a continuación y es más blando (puede ser rayado) que los minerales que tienen mayor número de dureza. El mineral más blando es el talco y tiene una unidad de dureza.

La «medición» (no hay más remedio que poner esta palabra entre comillas) de la dureza, empleando esta escala, consiste en hallar para el mineral que nos interesa el lugar que le corresponde en esta serie de diez patrones elegidos.

Si a un mineral desconocido se le puede rayar con el cuarzo, pero él, a su vez, puede rayar al feldespato, su dureza es igual a 6.5.

Los metalistas emplean otro método de determinación de la dureza. Presionando una bolita de acero de 1 cm de diámetro con una fuerza patrón (ordinariamente de 3000 kgf) sobre el material que se experimenta, se deja en éste una impresión. El radio de la impresión formada se toma como número de dureza.

No siempre concuerda la dureza con respecto al rayado y la dureza por indentación, y un material puede ser más duro que otro por el método del rayado y más blando por el de indentación.

De este modo, no hay un concepto universal de dureza que no dependa del método de medición. Por esto, la dureza no es un concepto físico, sino técnico.

XV. El sonido

Vibraciones acústicas

Ya comunicamos al lector muchos conocimientos sobre las oscilaciones. El quinto capítulo de este libro fue dedicado a las cuestiones relacionadas con las oscilaciones del péndulo, a las oscilaciones de la bolita suspendida de un resorte, a las leyes de las vibraciones de una cuerda. Nosotros no dijimos qué le ocurre al aire o a otro medio ambiente cuando un cuerpo situado en él efectúa vibraciones. No hay duda de que el medio ambiente no puede mantenerse indiferente ante estas vibraciones. El cuerpo que vibra empuja al aire, desplaza a las partículas de aire de las posiciones que antes ocupaban. Está claro también, que la cosa no puede limitarse solamente a la influencia de las capas próximas del aire. El cuerpo comprime a la capa cercana, ésta presiona sobre la siguiente, y así, capa por capa, partícula por partícula, se pone en movimiento todo el aire de alrededor. Nosotros decimos que el aire se ha puesto a vibrar o que en el aire se producen vibraciones acústicas.

A las vibraciones del medio las llamamos acústicas, pero esto no significa que oímos todas las vibraciones acústicas. La física emplea el concepto de vibraciones acústicas en un sentido más amplio. Más adelante se dirá qué vibraciones acústicas oímos.

Si se trata del aire es porque frecuentemente el sonido se propaga por él. Pero es natural que el aire no es el único medio que posee propiedades para poder efectuar vibraciones acústicas. Éstas pueden surgir en cualquier medio que sea capaz de comprimirse, y como en la naturaleza no hay cuerpos incompresibles, pueden encontrarse en estas condiciones las partículas de cualquier material. Por lo general, el estudio de tales vibraciones se llama acústica.

En las vibraciones acústicas, cada partícula del aire se mantiene, por término medio, en un mismo sitio; ésta solamente efectúa vibraciones alrededor de la posición de equilibrio. En el más simple de los casos, la partícula de aire puede efectuar vibraciones armónicas que, como recordamos, se realizan según la ley del seno. Éstas se caracterizan por la elongación máxima de la posición de equilibrio: por la amplitud y por el período de vibración; o sea, por el tiempo que se tarda en efectuar una vibración completa.

Para describir las propiedades de las vibraciones acústicas se emplea más a menudo el concepto de frecuencia que el de período. La frecuencia $\nu = \dfrac{1}{T}$, es la magnitud inversa del período. La unidad de frecuencia es la inversa del segundo (seg^{-1}). Si la frecuencia de la vibración es igual a 100 seg^{-1}, esto significa que durante un segundo la partícula de aire efectúa 100 vibraciones completas. En lugar de decir: «100 segundos inversos», se puede decir, «100 hertz» (Hz) o «100 ciclos». Como en la física se suele tratar a menudo con frecuencias que son muchas veces más grandes que el hertz, tienen amplia aplicación las unidades kilohertz (kilociclo) y megahertz (megaciclo); 1 $kHz = 10^3\ Hz$, 1 $megHz = 10^6\, Hz$.

Al pasar por la posición de equilibrio, la velocidad de la partícula vibrante es máxima. Por el contrario, en las posiciones extremas de desplazamiento, la velocidad de la partícula es, naturalmente, igual a cero. Ya dijimos que, si el desplazamiento de la partícula se efectúa según la ley de las vibraciones armónicas, la variación de la velocidad de las vibraciones se efectúa según la misma ley. Si la amplitud del desplazamiento se indica con s_0, y la velocidad con v_0, se tiene que $v_0 = \dfrac{2\pi s_0}{T}$, o bien, $v_0 = 2\pi\nu s_0$. Una conversación en voz alta provoca vibraciones de las partículas de aire con una amplitud de desplazamiento que es solamente igual a unas cuantas millonésimas partes de centímetro. El valor de la amplitud de la velocidad es de unos 0.02 $\dfrac{cm}{seg}$.

Otra importante magnitud física, que varía junto con el desplazamiento y con la velocidad de la partícula, es la presión excesiva, llamada también sonora o acústica. Las vibraciones acústicas del aire consisten en unas alternaciones periódicas de sobrepresiones y depresiones del medio, en cada uno de sus puntos. La presión del aire en cualquier sitio es, ya mayor, ya menor, que cuando no había sonido. Este exceso (o escasez) de presión es lo que se llama presión acústica. La presión acústica representa una parte insignificante de la presión normal del aire. En nuestro ejemplo de la conversación en voz alta, la amplitud de la presión acústica es, aproximadamente, igual a una millonésima parte de una atmósfera. La presión acústica es directamente proporcional a la velocidad de vibración de la partícula y, además, la razón de estas magnitudes físicas depende sólo de las propiedades del medio. Por ejemplo, a la presión acústica en el aire de 1 $\dfrac{dina}{cm^2}$ le corresponde una velocidad de vibración de 0.025 $\dfrac{cm}{seg}$.

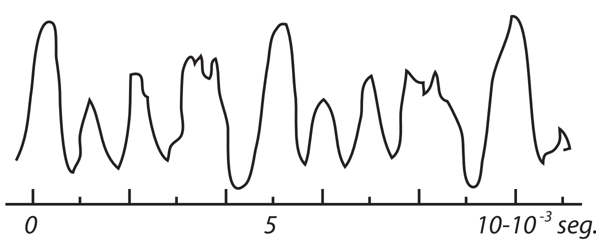


Fig. 114

La cuerda, que oscila según la ley del seno, anima también a las partículas del aire a hacer vibraciones armónicas. Los ruidos y los sonidos musicales complicados presentan un cuadro mucho más complejo. En la Fig. 114 están dibujadas las oscilaciones acústicas, o más exactamente, se representa la presión acústica en dependencia del tiempo. Esta curva se parece poco a la sinusoide. Resulta que cualquier oscilación, por muy complicada que sea, se puede representar como el resultado de una superposición, una sobre otra, de una gran cantidad de sinusoides de diferentes amplitudes y frecuencias. Estas oscilaciones simples forman, como suele decirse, el espectro de la oscilación compleja. En la Fig. 115 se representa un caso sencillo de adición de oscilaciones.

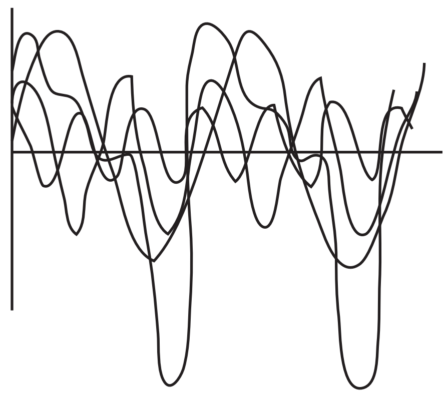


Fig. 115

La velocidad del sonido

No hay que temer al rayo después de haber tronado. Ustedes probablemente habrán oído decir esto. Y, ¿por qué? Ocurre, pues, que la luz se propaga con una velocidad incomparablemente mayor que la del sonido: es prácticamente instantánea. El trueno y el rayo se producen al mismo tiempo, pero el rayo lo vemos al instante de surgir, mientras que el sonido del trueno llega a nosotros con una velocidad, aproximadamente, de un kilómetro durante tres segundos (la velocidad del sonido en el aire es de 330 $\frac{m}{seg}$). Por lo tanto, cuando se oye el trueno, el peligro de que nos caiga el rayo ya ha pasado.

Generalmente, sabiendo la velocidad de propagación del sonido, se puede determinar la distancia de la tormenta. Si desde el momento en que se ve el relámpago hasta cuando suena el trueno han pasado 12 segundos, la tempestad está a 4 kilómetros de nosotros.

La velocidad del sonido en los gases es, aproximadamente, igual a la velocidad media del movimiento de las moléculas del gas. No depende de la densidad del gas y es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. Los líquidos son mejores propagadores del sonido que los gases. En el agua, el sonido se propaga con una velocidad de 1450 $\frac{m}{seg}$, o sea, 4.5 veces más rápidamente que en el aire. Todavía mayor es la velocidad del sonido en los cuerpos sólidos; por ejemplo, en el hierro, es de cerca de 6000 $\frac{m}{seg}$.

Cuando el sonido pasa de un medio a otro, su velocidad de propagación se altera. Pero, simultáneamente, ocurre también otro fenómeno interesante: la reflexión parcial del sonido en la frontera de los dos medios. La parte del sonido que se refleja depende, fundamentalmente, de la razón de las densidades. En el caso de que el sonido vaya del aire a una superficie sólida o líquida o, por el contrario, de medios densos al aire, el sonido se refleja casi por completo. Cuando el sonido va del aire al agua o, por el contrario, del agua al aire, en el segundo medio penetra solamente $\frac{1}{1000}$ parte del sonido. Si los dos medios son densos, la razón entre el sonido que penetra y el reflejado puede no ser muy grande. Por ejemplo, del agua al acero o del acero al agua, pasa el 13 % y se refleja el 87 % del sonido.

El fenómeno de reflexión de sonido se emplea ampliamente en la navegación. En él se basa la construcción del aparato para la medición de la profundidad, el sondador acústico (Fig. 116). En un bordo del barco y debajo del agua se coloca un foco sonoro. Los impulsos sonoros atraviesan el espesor de agua y se reflejan en el fondo del mar o del río, volviendo parte del sonido al barco, donde es captado por unos aparatos sensibles. Unos relojes muy exactos indican el tiempo que ha tardado el sonido en hacer este viaje. Como la velocidad del sonido en el agua es conocida, con un simple cálculo se puede obtener una información exacta de la profundidad.

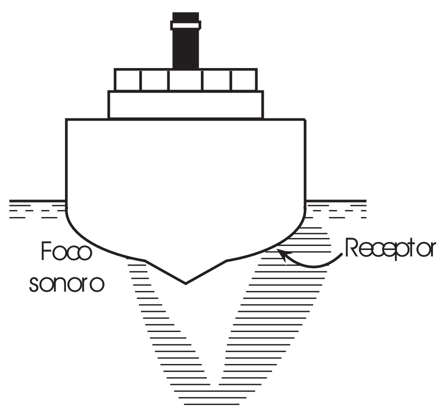


Fig. 116

Dirigiendo el sonido, no hacia abajo, sino hacia adelante o hacia los lados, se puede determinar con su ayuda, si hay cerca del barco escollos o icebergs, en los cuales la mayor parte de su masa de hielo va sumergida.

Onda sonora

Si el sonido se propagase instantáneamente, todas las partículas del aire vibrarían como una sola. Pero el sonido no se propaga instantáneamente y los volúmenes de aire situados en la línea de propagación se ponen en movimiento uno tras otro, como si fuesen arrastrados por la onda que parte del foco. De este mismo modo, una astilla permanecerá tranquilamente en el agua hasta que las ondas circulares del agua producidas por una piedra que se ha lanzado, la alcancen y la hagan vibrar.

Prestemos atención a una partícula en vibración y comparemos su comportamiento con el movimiento de otras partículas situadas en la misma línea de propagación del sonido. La partícula vecina se pone a vibrar un poco más tarde, la siguiente, todavía más tarde. El retardamiento va creciendo hasta que, por fin, nos encontramos con una partícula que se ha retardado un período entero y que, por eso, va al compás de la partícula inicial. Así, el corredor desafortunado retardándose en una vuelta entera, pasa por la línea final junto con el líder. Pero, ¿a qué distancia encontraremos el punto que vibra al compás con el punto inicial? No es difícil calcular que esta distancia λ es igual al producto de la velocidad de propagación del sonido por el período T de las oscilaciones. La distancia λ se llama longitud de la onda,

$$\lambda = cT.$$

A cada intervalo λ encontramos puntos que vibran al compás. Los puntos situados a la distancia $\dfrac{\lambda}{2}$ efectuarán movimiento uno con relación al otro, lo mismo que un objeto que oscila perpendicularmente con relación a su imagen.

Representando el desplazamiento (o la velocidad, o la presión acústica) de todos los puntos situados en la línea de propagación del sonido armónico, resulta de nuevo una sinusoide.

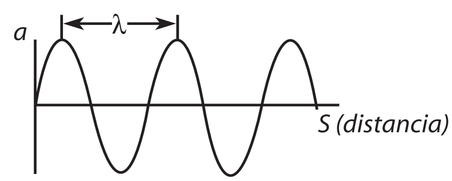


Fig. 117

No se deben confundir las gráficas del movimiento ondulatorio y de las vibraciones. Los dibujos 117 y 118 son muy parecidos, pero en el primero, en el eje horizontal está marcada la distancia, mientras que en el segundo está marcado el tiempo. Un dibujo representa el desarrollo temporal de la vibración, mientras que el otro representa la «fotografía» instantánea de la onda. Confrontando estos dibujos se ve que la longitud de la onda puede llamarse también período espacial; el papel de T en el tiempo lo juega en el espacio la magnitud λ.

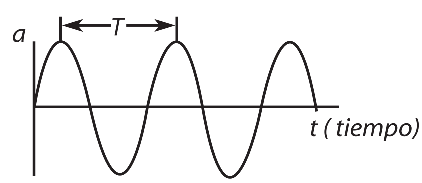


Fig. 118

En el dibujo de la onda sonora, los desplazamientos de la partícula están marcados en la vertical, y la dirección de la propagación de la onda, a lo largo de la cual se mide la distancia, es la horizontal. Esto puede dar lugar a la idea errónea de que el desplazamiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. En realidad, las partículas de aire siempre vibran a lo largo de la dirección de propagación del sonido. Tal onda se llama longitudinal.

Sonidos audibles

¿Qué vibraciones acústicas percibe el oído del hombre? Resulta, que éste es capaz de percibir solamente las vibraciones que están comprendidas, aproximadamente, en el intervalo de 20 hasta 20 000 Hz.

Los sonidos de gran frecuencia se llaman altos, los de pequeña frecuencia, bajos.

¿Qué longitudes de ondas corresponden a las frecuencias límites audibles? Como la velocidad del sonido es aproximadamente igual a 300 $\frac{m}{seg}$ por la fórmula $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$, hallamos que las longitudes de las ondas sonoras audibles están comprendidas entre los 15 m para los tonos más bajos y hasta 3 cm para los más altos.

¿De qué modo «oímos» estas vibraciones?

El trabajo de nuestro órgano auditivo está basado en el fenómeno de la resonancia. Ustedes recordarán, que así se llama el fenómeno del balanceo del cuerpo cuando son iguales las frecuencias de las oscilaciones exteriores y las oscilaciones del cuerpo. Es fácil de aducir un ejemplo de resonancia acústica. Abran la tapa de un piano, tomen la guitarra y extraigan de ésta un tono puro y breve. Estén atentos: el piano contesta; se ha puesto a vibrar la cuerda del piano que está afinada a la misma frecuencia que la cuerda de la guitarra que han tocado.

Dentro del oído hay cerca de 4.5 millares de fibras de diversa longitud. La naturaleza ha «afinado» a estas fibras en todos los tonos posibles. El tímpano transmite las vibraciones a estas fibras finísimas, pero se ponen a vibrar solamente aquellas que están «afinadas» al tono correspondiente.

Algunas personas son capaces de distinguir absolutamente todos los tonos; tomen en el piano un acorde complicado y el auditor le dirá las teclas que han tocado. Esto significa que su oído es capaz de descomponer el complicado sonido en sus componentes armónicos.

La música

Ya fue ilustrada la diferencia entre el sonido musical y el ruido, por las curvas de la presión acústica. El tono musical simple se crea por la vibración periódica de una frecuencia determinada. Los sonidos compuestos representan una combinación de tonos puros.

La orquesta de música reproduce casi todas las frecuencias audibles. El diapasón del piano de cola abarca los tonos con frecuencias desde 25 hasta 4000 Hz, aproximadamente.

No todas las combinaciones de los sonidos son agradables para el oyente. Resulta que producen sensaciones agradables los sonidos, cuyas frecuencias de vibración están en razones simples. Si las frecuencias acústicas están en la razón 2 : 1, se dice que forman una octava, si están en la razón 5 : 4, forman una tercera, si están en la razón 4 : 3, forman una cuarta, y si están en la razón 3 : 2, forman una quinta. Si las frecuencias de las vibraciones acústicas no se pueden representar por estas relaciones sencillas, la sensación agradable del sonido se pierde. En este caso, los músicos dicen que hay disonancia. El oído es muy sensible a las combinaciones de diversos tonos. Por eso, incluso la gente que tiene mal oído, percibe la disonancia.

Un músico, con instrumentos sin teclas, del tipo del violín, puede tomar cualquier tono y dar sonoridad a cualquier combinación de ellos.

En un instrumento tal como el piano de cola, la cosa ocurre de otro modo. Las cuerdas del piano están afinadas a unas frecuencias determinadas y el golpe sobre la tecla no puede cambiar el tono del sonido. El teclado del piano de cola incluye siete octavas completas. El «do» menor proporciona un tono con la frecuencia de 32.64 Hz, y el mayor, con la frecuencia de $32.64 \times 2^7 \approx 4178$ Hz. El problema consiste en dividir las octavas, es decir, en determinar los tonos intermedios que se deben introducir para satisfacer dos condiciones: En primer lugar, las frecuencias tienen que estar en las razones más simples posibles. En segundo lugar, hay que dividir la octava en iguales intervalos (razones entre las frecuencias), puesto que solamente en este caso se puede tocar una misma melodía empezando desde cualquier nota de la octava (la misma melodía en otro tono). Hablando estrictamente, estas dos condiciones son contradictorias. Se cumplen aproximadamente al utilizar la llamada escala temperada.

Veamos qué es lo que ocurre al dividir la octava en 12 intervalos iguales. Cada uno de estos intervalos será igual a $2^{\frac{1}{12}} = 1.059$. Esto significa que la razón de dos tonos contiguos será igual a este número.

Escribamos ahora los números siguientes:

$$
\begin{array}{lll}
1)\ 2^{\frac{1}{12}} = 1.059 & 2)\ 2^{\frac{2}{12}} = 1.122 & 3)\ 2^{\frac{3}{12}} = 1.189 \\[1em]
4)\ 2^{\frac{4}{12}} = 1.260 & 5)\ 2^{\frac{5}{12}} = 1.335 & 6)\ 2^{\frac{6}{12}} = 1.414 \\[1em]
7)\ 2^{\frac{7}{12}} = 1.498 & 8)\ 2^{\frac{8}{12}} = 1.587 & 9)\ 2^{\frac{9}{12}} = 1.682 \\[1em]
10)\ 2^{\frac{10}{12}} = 1.782 & 11)\ 2^{\frac{11}{12}} = 1.888 & 12)\ 2^{\frac{12}{12}} = 2
\end{array}
$$

El músico queda satisfecho por completo al observar que la aritmética le resuelve su problema: la octava ha quedado dividida en intervalos rigurosamente iguales y, a su vez, las razones de muchos tonos son muy próximas a las razones de unos números muy sencillos. Aquí hallamos la quinta (7) y la cuarta (5), y la tercera mayor (4), puesto que, aproximadamente, $1.498 \approx \dfrac{3}{2}$; $1.260 \approx \dfrac{5}{4}$ y $1.335 \approx \dfrac{4}{3}$. Es formidable todo en otros casos, donde la diferencia no sobrepasa el 1 %: $1.414 \approx \dfrac{7}{5}$; $1.122 \approx \dfrac{9}{8}$; $1.587 \approx \dfrac{8}{5}$; $1.682 \approx \dfrac{5}{3}$; $1.888 \approx \dfrac{17}{9}$ y solamente el primer intervalo $1.059 \approx \dfrac{18}{17}$ da una disonancia clara.

Para el oído son poco notables las desviaciones pequeñas de la escala limpia (o sea, en la que las razones de las frecuencias son exactamente iguales a las razones de los números enteros) y la escala temperada del piano de cola está difundida.

El timbre del sonido

¿Han visto cómo afinan la guitarra? Se tensa la cuerda con la clavija. Con la longitud y tensión correspondientes, la cuerda produce, al tocarla, un tono completamente determinado.

Sin embargo, si escuchamos el sonido de la cuerda, tocándola en los diversos trastes, por el medio, a un cuarto del clavijero o en otro sitio del mástil, oiremos sonidos que no son absolutamente iguales. El tono es el mismo, pero el matiz del sonido, o, como suelen decir los músicos, el timbre, es diferente. ¿Qué es lo que ocurre aquí, y qué es lo que da diversos matices al sonido de un mismo tono?

Lo que pasa es que una misma cuerda puede vibrar, no de uno, sino de muchos modos. En la Fig. 119 se muestran unos cuantos tipos de vibraciones posibles de la cuerda. La vibración de menor frecuencia (ésta se llama también frecuencia fundamental) se muestra en el esquema de la izquierda. Los puntos extremos están fijos; el punto medio efectúa vibraciones de mayor amplitud. Para que el lector se pueda figurar con claridad la vibración de toda la cuerda como un todo, en la figura están representadas unas cuantas posiciones sucesivas de ella. Hay también una posición en la que toda la cuerda está estirada en línea recta: todos sus puntos pasan a la vez por la posición de equilibrio. En el esquema de en medio se muestra la vibración que se efectúa con una frecuencia doble. Ahora, además de los puntos extremos fijos, está también en reposo el punto medio de la cuerda. Tal punto, que permanece en reposo, se llama nodo. La mayor amplitud de vibración la poseen los puntos que están alejados de los extremos a la distancia de $\frac{1}{4}$ de la cuerda. Sobre estos puntos se dice que están situados los vientres de la vibración. Para mayor claridad, se representan unas cuantas posiciones de la cuerda. En este caso, al igual que en los demás, todos los puntos de la cuerda pasan simultáneamente por el cero.

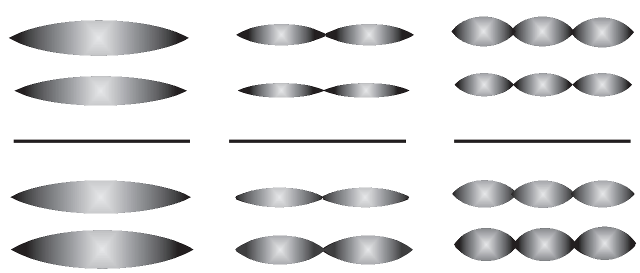


Fig. 119

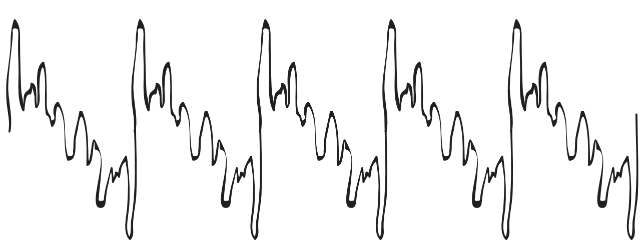
Se puede dejar de comentar el dibujo de la derecha, donde se muestra la vibración con una frecuencia triple, aproximadamente; para esta vibración son característicos dos nodos y tres vientres.

En dependencia del pulsamiento, la cuerda puede vibrar también con mayores frecuencias. Como se suele decir, todas estas frecuencias pertenecen a las vibraciones propias de la cuerda.

Las vibraciones propias de la cuerda, además del sonido fundamental, producen otros sonidos, llamados sobretonos. El sonido de la cuerda se compone de los sonidos del tono fundamental y de los sobretonos. Tocando la cuerda en puntos diversos, creamos diferentes espectros de vibración. Así, pues, tocando en el medio, logramos que el tono fundamental sea muy fuerte; al tocar a la distancia de $\frac{1}{4}$, conseguimos una sonoridad esencial del sobretono de frecuencia doble. En el caso general, el espectro de la vibración contendrá muchos sobretonos de intensidad diversa. Estos sobretonos son los que crean el matiz (el timbre) del sonido.

Ahora se comprende por qué suena diferente un mismo tono cantado por diversas voces o extraído del piano de cola o del violín. Todos éstos son sonidos de un mismo tono, pero de diferente composición de sobretonos. Esto es lo que da a los sonidos un matiz específico. Comparen, por ejemplo, las dos curvas *a*) y *b*) de la Fig. 120. Son las inscripciones del sonido de un mismo tono, emitido por el clarinete y por el piano de cola. Vemos que ambos sonidos no representan vibraciones sinusoidales simples. En los dos casos, la frecuencia fundamental de las vibraciones es igual; esto es lo que crea la igualdad de los tonos. Pero los dibujos de las curvas son diferentes. Éstos muestran lo que es el timbre.

a)



b)

Fig. 120

La facultad del oído de distinguir la nota «do» del piano de la misma nota del clarinete, también se basa en la descomposición del sonido en componentes armónicos, o sea, en el tono fundamental y en los sobretonos.

El clarinete pertenece a la clase de instrumentos de viento. ¿Qué vibraciones son las que crean, en estos casos, los sonidos de un tono determinado pero de diferentes timbres? Éstas son las vibraciones de las columnas de aire.

El músico que toca un instrumento de viento, actúa con su respiración más bien como un guitarrista con la mano, que como un cantante. El solamente pone en vibración la columna de aire del tubo. En lo que se refiere al tono y al timbre, éstos los establece el músico variando la longitud de la columna de aire. En dependencia de esta longitud, el aire que hay en el tubo, al igual que la cuerda, se pone a vibrar con frecuencias determinadas.

La orquesta en movimiento

Figúrense que están descansando bajo un árbol al lado de la carretera, y que por ésta pasa una camioneta con una orquesta que va tocando. O bien, el caso inverso: que pasan por algunas aldeas, donde una fiesta rural está en su apogeo. En ambos casos, al oído del auditor llegarán unas cuantas frases musicales. ¿Se cambia el sonido cuando lo oímos en marcha?

Prestemos atención primero a las impresiones musicales de un chofer que se acerca a la orquesta. Si el automóvil se mueve al encuentro de la onda sonora, el número de condensaciones del aire que llegan a los oídos del conductor del coche durante una unidad de tiempo es, claro, mayor que si el coche estuviese parado.

Todo ocurre exactamente igual que si al encuentro del chofer se moviese no una onda del sonido, sino una fila de deportistas corriendo. Para que la analogía sea completa, hay que suponer que los corredores conservan entre sí una distancia igual (ésta es la longitud de la onda) y que corren con una velocidad constante.

Claro que, si el automóvil se mueve al encuentro, el número de corredores que pasan al lado del coche durante un segundo será mayor. La velocidad relativa del coche y de los corredores es igual a $c+u$. El número de deportistas que pasan al lado del automóvil durante una unidad de tiempo aumentará en la misma cantidad de veces en que ha aumentado la velocidad relativa.

Por lo tanto, la razón de la frecuencia $\nu_{\text{mov.}}$, medida por el observador en movimiento, a la frecuencia $\nu_{\text{mov.}}$, medida por el observador en reposo será igual a la razón de las velocidades:

$$\frac{\nu_{\text{mov.}}}{\nu} = \frac{c+u}{c},$$

o bien, de otra forma,

$$\nu_{\text{mov.}} = \left(1 + \frac{u}{c}\right)\nu.$$

Como muestra la fórmula obtenida, al acercarse en automóvil a la orquesta, la frecuencia del sonido aumenta. Si el coche va con una velocidad de 70 $\frac{km}{hora}$ la frecuencia del sonido aumenta en un 6 %.

Si el coche se aleja de la orquesta, hay que cambiar el signo de la velocidad u por el signo contrario. En este movimiento relativo, la frecuencia del sonido disminuye. Por lo tanto, cuando el automóvil pasa al lado de la orquesta, la frecuencia del sonido se altera en $2 \times 6 = 12\,\%$. La frecuencia de 100 Hz se percibirá como la frecuencia de 106 o de 94 Hz, que representa un cambio de medio tono, aproximadamente. Este cambio es sensible, incluso para un auditor sin experiencia musical.

Si $u = -c$, o sea, que el auditor se escapa del foco sonoro con la velocidad del sonido, se tiene, $\nu_{\text{mov.}} = 0$, hablando propiamente, el sonido no se oirá. Si la velocidad de la fuga supera a la velocidad del sonido, la audición aparece y la frecuencia del sonido irá aumentando a medida que crezca la velocidad de la fuga. En la fórmula aparecerá el signo menos. Éste no tiene un sentido directo, ya que la frecuencia es una magnitud positiva. Sin embargo, al aparecer el signo menos, el fenómeno mismo adquiere, en cierto sentido, carácter inverso. Al escaparse con una velocidad mayor que la del sonido, el auditor todo el tiempo irá alcanzando a éste, primero, al que se había emitido, por ejemplo, un segundo antes, luego, al que se había emitido dos segundos antes, más tarde, el oído del viajero alcanzará los sonidos que se habían emitido al espacio tres, cuatro y etc. segundos antes. De este modo, todos los sonidos se oirán en orden inverso.

Volvamos a ver la fórmula general para la variación de la frecuencia. ¿Se puede utilizar esta misma fórmula para el caso de la orquesta en movimiento? Sin duda que se puede, solamente que hay que usarla bien.

En la fórmula que deducimos para el caso del observador en movimiento figuran dos frecuencias: la frecuencia del sonido en el medio, que, naturalmente, coincide con la frecuencia del sonido percibido por el auditor en reposo o emitido por el instrumento inmóvil, y la frecuencia del sonido $\nu_{\text{mov.}}$, igual al número de vibraciones por segundo transmitidas al aire por el cuerpo en movimiento o que vienen del aire hacia el cuerpo en movimiento.

Por lo tanto, si en el primer ejemplo, las frecuencias emitida y percibida son, respectivamente, la frecuencia ν del medio y la frecuencia $\nu_{\text{mov.}}$ en el movimiento, en el segundo ejemplo, por el contrario, ν es la frecuencia percibida y $\nu_{\text{mov.}}$, la frecuencia emitida.

Para el observador móvil, $\nu_{\text{obs.}} = \nu_{\text{foco}}\left(1 + \dfrac{u}{c}\right)$.

Para el foco sonoro móvil, $\nu_{\text{obs.}} = \dfrac{\nu_{\text{foco}}}{1 + \dfrac{u}{c}}$.

Hay que tener en cuenta además, que la velocidad positiva corresponde, en el primer caso, al acercamiento del foco al observador y, en el segundo caso, a su alejamiento.

Fácilmente se ve que ambas fórmulas dan una parecida variación del desplazamiento de la frecuencia con la velocidad. Si, por ejemplo, $\dfrac{u}{c} = 0.2$, la frecuencia aumenta en un $20\,\%$ al moverse el observador al encuentro del foco, y en un $25\,\%$, al moverse el foco al encuentro del observador.

Hasta ahora, tácitamente hemos supuesto que la orquesta y el auditor se movían a lo largo de la línea que coincide con la dirección de propagación del sonido. ¿Qué es lo que cambiaría si el auditor no se moviese al encuentro, sino que pasase a un lado de la orquesta que toca? Está claro que solamente tiene valor la componente de la velocidad del automóvil que va a lo largo de la línea de propagación del sonido. El movimiento del observador a lo largo del frente de la onda sonora, o sea, perpendicularmente a la dirección de propagación del sonido, no juega papel alguno.

Estas mismas razones se pueden aplicar también a la orquesta en movimiento. En este caso, aplicando la fórmula, hay que tener en cuenta que la velocidad del movimiento tiene que ser tomada en el momento de la emisión de la onda sonora y no en el momento en que se percibe.

Si el observador, así como el foco sonoro, están en movimiento con respecto al aire, las fórmulas se unen. La frecuencia del sonido percibido resulta ser igual a

$$\nu_{\text{obs.}} = \frac{1 + \frac{u}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \nu_{\text{foco}},$$

donde u es la velocidad del observador y v la velocidad del foco sonoro.

La variación de la frecuencia del sonido al moverse el observador o el foco sonoro, se llama efecto Doppler.

La energía del sonido

Todas las partículas de aire que rodean a un cuerpo sonoro se encuentran en estado de vibración. Como se aclaró en el capítulo V, el punto material que vibra según la ley del seno posee una energía total determinada y constante.

Cuando el punto vibrante pasa por la posición de equilibrio, la velocidad es máxima. Como en este instante, el desplazamiento del punto es igual a cero, toda su energía se reduce a la cinética:

$$E = \frac{mv^2_{\text{máx.}}}{2}.$$

Por consiguiente, como ya se aclaró en la pág. 89, la energía total es proporcional al cuadrado del valor de la amplitud de la velocidad de la vibración.

Esto es cierto también para las partículas de aire que vibran junto con la onda sonora. Sin embargo, la partícula de aire es una cosa indeterminada. Por eso, la energía del sonido se refiere a una unidad de volumen. Esta magnitud se puede llamar densidad de la energía del sonido.

Como la masa de una unidad de volumen es la densidad ρ, la densidad de la energía sonora será

$$w = \frac{\rho v^2_{\text{máx.}}}{2}.$$

Más arriba hablamos de una magnitud física importante que efectuaba vibraciones según la ley del seno con la misma frecuencia que la velocidad. Ésta es la presión excesiva o sonora. Como estas magnitudes son proporcionales, se puede decir que la densidad de la energía es proporcional al cuadrado del valor de la amplitud de la presión sonora.

Antes hemos expuesto el valor de la amplitud de las vibraciones del sonido para el caso de una conversación en voz alta. La amplitud de la velocidad era igual a 0.02 $\frac{cm}{seg}$. Pero 1 cm^3 de aire pesa cerca de 0.001 g.

Por lo tanto, la densidad de la energía es igual a

$$\frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot (0.02)^2 \ \frac{erg}{cm^3} = 2 \cdot 10^{-7} \ \frac{erg}{cm^3}.$$

Supongamos que oscila el foco del sonido. Éste emite energía sonora al aire que le rodea. Parece como si la energía «emanase» del cuerpo sonoro. Por cada superficie perpendicular a la línea de propagación del sonido pasa, durante un segundo, una cantidad determinada de energía. Esta magnitud se llama flujo de la energía que pasa a través de la superficie. Si, además, se ha tomado una superficie de 1 cm^2, la cantidad de energía que pasa a través de ella se llama intensidad de la onda sonora.

Es fácil cerciorarse de que la intensidad del sonido I es igual al producto de la densidad de la energía w por la velocidad del sonido c. Figurémonos un cilindro pequeño de 1 cm de altura y de 1 cm^2 de superficie básica, cuyas generatrices son paralelas a la dirección de propagación del sonido. La energía w contenida dentro de este cilindro saldrá por completo de él después del tiempo $\frac{1}{c}$. Por lo tanto, durante una unidad de tiempo pasará a través de una unidad de superficie la energía $\frac{w}{\frac{1}{c}}$ o sea,wc. Parece como si la energía se moviese con la velocidad del sonido.

En una conversación en voz alta, la intensidad del sonido alrededor de los interlocutores será igual a (utilizamos el número obtenido anteriormente) $2 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^4 = 0.006$ $\frac{erg}{cm^2 \ seg}$, aproximadamente.

Debilitamiento del sonido con la distancia

Claro que del instrumento sonoro se propaga la onda sonora por todos los lados.

Figurémonos que alrededor del foco sonoro se han trazado dos esferas de diferente radio. Es natural, que la energía del sonido que pasa a través de la primera esfera, pasará también a través de la segunda. Si se señala con I la intensidad del sonido, la energía de la onda que pasa a través de la esfera se puede escribir así: $I \cdot 4\pi r^2$, puesto que $4\pi r^2$ es el área de la superficie de una esfera de radio r. Si no se ha perdido energía en el trayecto desde la primera esfera hasta la segunda, se tendrá:

$$I_1 \cdot 4\pi r_1^2 = I_2 \cdot 4\pi r_2^2.$$

Por lo tanto, las intensidades I_1 y I_2 de la onda, que se hallan respectivamente a las distancias r_1 y r_2 del foco sonoro, son inversamente proporcionales a los cuadrados de las distancias. Como la intensidad del sonido es proporcional a la densidad de la energía, aquélla, al igual que ésta, será proporcional al cuadrado de la amplitud de la vibración. De aquí se deduce, que las amplitudes de la onda a las distancias r_1 y r_2 del foco sonoro, son inversamente proporcionales a las distancias. La disminución de la intensidad del sonido es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia hasta el foco, mientras que la amplitud es inversamente proporcional a la primera potencia de la distancia. En realidad, el sonido disminuye un poco más rápido, puesto que parte de la energía se absorbe por el camino. Esto ocurre porque, al vibrar las partículas del medio, una parte de la energía se gasta en vencer el rozamiento de viscosidad. Sin embargo, estas pérdidas no son relativamente grandes, y la causa principal de que se oiga peor desde lejos que de cerca estriba en la ley de los cuadrados inversos.

Alto y bajo

En muchos casos, los órganos de los sentidos del hombre son más perfectos que los mejores instrumentos. Esto se refiere también al oído. Nosotros somos capaces de percibir, en forma de sonido, ondas de intensidades, desde $10^{-9}\ \dfrac{erg}{cm^2\ seg}$ hasta 10^4 unidades de éstas. Por lo tanto, el sonido más fuerte se diferencia del más débil en diez billones de veces.

¿Qué es lo que representa el sonido más bajo que es capaz de percibir una persona? Un susurro que casi no se oye, crea en el tímpano una presión de $2 \cdot 10^{-4}\ \dfrac{dinas}{cm^2}$ o sea, de dos diezmillonésimas partes de un gramo, aproximadamente. Ni las balanzas más precisas poseen tanta sensibilidad como el oído del hombre.

Si el sonido es de una intensidad mayor de $10^4\ \dfrac{erg}{cm^2\ seg}$, el hombre ya no oye el sonido, pero siente dolor. La presión sobre el tímpano alcanza, en este caso, $0.2\ \dfrac{gf}{cm^2}$. El oído percibe con dolor precisamente la onda de presiones, o sea, los golpes de sobrepresiones y depresiones que se alternan rápidamente. Si la presión constante del aire aumenta en la magnitud indicada de $0.2\ gf$, es natural que el oído «no lo note». La presión atmosférica normal, igual aproximadamente a $1\ \dfrac{kgf}{cm^2}$ aumentará en más de $0.2\ gf$ cuando se baja de un segundo piso a la calle.

La intensidad de la onda, que lleva consigo un sonido potente, es muchísimas veces mayor que la de la onda que nos proporciona un susurro y murmullos. Por eso, es prácticamente incómodo apreciar la sonoridad por la magnitud de la intensidad. Figúrense que un empleado que está buscando medios para luchar contra los ruidos de la calle, tuviese que hacer un informe en la sesión del Consejo Urbano, donde tuviera que explicar en cuánto disminuiría el ruido, si se sustituyese el tranvía por el trolebús o por el autobús, si se prohibiese en la calle el uso de las bocinas de los coches, etc. Para mayor claridad habría que recurrir a los diagramas. Como está convenido, al construir diversas especies de diagramas, se podrían dibujar unas columnas, cuyas alturas representaran el grado del ruido. Mas, si la sonoridad se determinase por la magnitud de la intensidad, se crearía una dificultad que no se podría superar: el silencio y el ruido se diferencian tanto entre sí, que representados en el diagrama, en una misma escala, sería mucho más difícil que dibujar en un mismo cartel una mosca y un elefante en sus magnitudes naturales.

En la física, en casos semejantes, se recurre a la llamada escala logarítmica.

Si una magnitud aumenta en $10, 100, 1000, etc.$, veces, su logaritmo aumenta en $1, 2, 3, etc.$, veces. Por lo tanto, empleando el logaritmo de la intensidad de la onda sonora se pueden «colocar» en un cartel el ruido de un motor de aviación y el zumbido de un mosquito.

La escala de sonoridad se forma del modo siguiente. Convencionalmente se elige un nivel cero de sonoridad igual a $10^{-9}\ \dfrac{erg}{cm^2\ seg}$. El hombre no oye los sonidos de tal intensidad, incluso con el oído más afinado. Después se determina en cuántas veces es mayor la intensidad E del sonido que nos interesa, que la magnitud E_0 de este nivel inicial, o sea, se halla la razón $\dfrac{E}{E_0}$.

El logaritmo decimal de esta razón se toma como la medida de sonoridad del sonido. La unidad de sonoridad se denomina *bel*; sin embargo, lo más común es emplear la décima parte, llamada *decibel* (*db*). La sonoridad en *decibeles* es igual a $10 \log\left(\dfrac{E}{E_0}\right)$. Sobre lo que es el *decibel*, se puede juzgar por la tabla siguiente que indica la magnitud de sonoridad de diversos sonidos a la distancia de unos cuantos metros del foco sonoro:

Murmullo de las hojas	10 *decibeles*
Calle silenciosa	30 *decibeles*
Automóvil en marcha	50 *decibeles*
Conversación en voz alta	70 *decibeles*
Calle de mucho ruido	90 *decibeles*
Avión	100 *decibeles*

La tabla de los logaritmos nos dará la posibilidad de figurarnoslo que es el *decibel*. Así, el aumento de la sonoridad en 1 *db*, corresponde al aumento de la intensidad del sonido en $100.1 = 1.26$ veces, o sea, en el 26 %. El aumento de la intensidad del sonido en dos veces, corresponde a la alteración de la sonoridad en 3 *db*; el aumento de la intensidad en cinco veces, a la alteración de la sonoridad en 7 *db*; el aumento de la intensidad en diez veces, a la alteración de la sonoridad en 10 *db*.

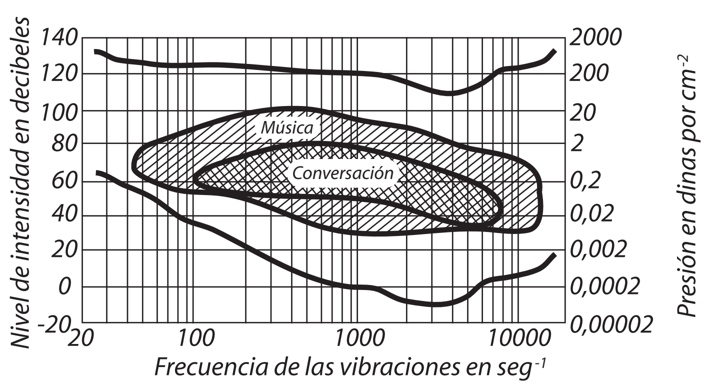


Fig. 121

Si la distancia hasta el foco sonoro aumenta en dos veces, la intensidad del sonido disminuye en cuatro veces y la sonoridad en 6 *db*. Supongamos que nos hallábamos a la distancia de un metro de la cuerda sonora y que nos hemos retirado a la distancia de 10 m. La intensidad de la onda que alcanza el oído disminuirá en 100 veces, y la sonoridad disminuirá en 20 *db*.

Anteriormente hablamos de lo limitado que era el diapasón de las frecuencias audibles. Completando estas nociones con nuestros conocimientos sobre la sensibilidad del oído a los sonidos altos y bajos, podemos representarlo por el diagrama de audición que es típico para una persona normal (Fig. 121). En el eje horizontal de este diagrama se ha marcado la frecuencia del sonido, en el eje vertical, su intensidad. En el dibujo se muestran los umbrales de audición y de sensación dolorosa. La región de sensibilidad auditiva está comprendida dentro de la región de audición.

Sonidos inaudibles

La frecuencia del sonido de 20 000 Hz es un límite, por encima del cual el oído humano no percibe las vibraciones mecánicas del medio. De diversos modos se pueden crear vibraciones de mayor frecuencia todavía; el hombre no las oirá, pero los aparatos las podrán registrar. Por de pronto, no sólo los aparatos precisan tales vibraciones. Muchos animales, como los murciélagos, las abejas, las ballenas y los delfines (como se ve, las dimensiones de los seres vivientes no tienen nada que ver), son capaces de percibir vibraciones mecánicas hasta de 100 000 Hz de frecuencia.

Ahora se consigue obtener vibraciones que tienen una frecuencia de hasta mil millones de hertz. Aunque estas vibraciones no se oyen, reciben el nombre de ultrasonidos por la afinidad que tienen con el sonido.

Los ultrasonidos de mayor frecuencia se obtienen mediante placas de cuarzo. Estas placas se recortan de los monocristales del cuarzo. Poseen la siguiente propiedad interesante: si a una de estas placas se le aplica una tensión eléctrica, se encoge o se dilata. Aplicando a la placa una tensión eléctrica variable, comenzará a comprimirse y a dilatarse alternativamente, o sea, empezará a vibrar.

De este modo se consigue crear corrientes potentes de ultrasonido con intensidades de unos cuantos miles de joules en 1 cm^2 por segundo. Es interesante comparar este número con la intensidad del sonido audible. En las proximidades inmediatas de un cañón que dispara, la intensidad del sonido alcanza solamente 0.005 joules en 1 cm^2 por segundo.

La energía del ultrasonido es tan grande que se puede percibir. Si colocamos la mano en un líquido que efectúa vibraciones de ultrasonido, sentiremos un dolor repentino.

El ultrasonido es capaz de efectuar transformaciones interesantes con las substancias, por eso encuentra amplia aplicación en diversas ramas. Una de tales transformaciones es la división de las substancias. Si se coloca en un líquido un trozo de plomo o de cobre y se le somete a la acción del ultrasonido, el metal se desmenuza y forma una suspensión finísima. El desmenuzamiento se efectúa cuando las dimensiones de las partículas son mayores que la longitud de la onda.

Si las partículas de la substancia son pequeñas, la influencia del ultrasonido será inversa. Actuando con ultrasonido en una habitación llena de humo, rápidamente se puede hacer una limpieza total del aire. Resulta que con la acción del ultrasonido, las partículas del humo se aglomeran (este fenómeno se denomina coagulación), se hacen decenas y cientos de veces más pesadas y se posan en el suelo.

Es particularmente interesante la acción del ultrasonido en los objetos biológicos. Muchas células, y fundamentalmente las fusiformes, se destruyen a causa de la acción del ultrasonido. Las bacterias se mueren o sufren cambios esenciales. Con el ultrasonido se puede esterilizar la leche.

Un campo interesante de aplicación del ultrasonido es el descubrimiento de grietas y otros defectos en las fundiciones de metal de gran espesor (de hasta decenas de metros). Si el rayo ultrasonoro se encuentra por el camino con una grieta o con alguna sopladura, no pasará por ella, sino que se reflejará en dirección contraria. Esta reflexión la capta un aparato y, por el tiempo que tarda el ultrasonido en el viaje de ida y vuelta hasta el defecto, se determina la profundidad en que se encuentra el defecto.

Los murciélagos emplean el ultrasonido de un modo curioso. Para que el murciélago pueda vivir en completa obscuridad, la naturaleza le ha provisto de un localizador del eco de una perfección extraordinaria. Éste trabaja con frecuencias ultrasonoras. Durante el vuelo, el murciélago emite unas señales que son inaudibles por el oído del hombre, de una frecuencia de 25 000−50 000 *ciclos* por *segundo*. Cada señal dura, aproximadamente, 10 − 15 milésimas partes de *segundo*. La señal ultrasonora que manda el murciélago en una dirección determinada con respecto a su cuerpo, choca sobre algún obstáculo, se refleja en él y vuelve. Los órganos de audición del murciélago también están desarrollados extraordinariamente; el murciélago es capaz de oír la señal reflejada, incluso si ésta es dos mil veces más débil que la señal primaria. Además, el murciélago es capaz de distinguir su señal reflejada entre todos los ruidos extraños, aunque estos ruidos sean mil veces más fuertes que el eco de su señal emitida. Por el tiempo que pasa desde el momento en que manda la señal hasta el momento en que vuelve, el murciélago determina (naturalmente, por el instinto) lo lejos que está el obstáculo.

Cómo bordea el sonido los obstáculos

Ustedes están conversando en el fondo de la habitación del segundo piso. La ventana está abierta. En la calle, bajo la ventana está su compañero. ¿Podrá oírles? Si, en caso de que hablen bastante alto; pero, de todos modos, oirá bastante peor que si se sube por una escalera y se coloca enfrente de la ventana. Las ondas sonoras, al salir de la ventana se comportan como si se derramasen hacia todos los lados, pero sin muchas ganas. Esto muestra que las ondas sonoras se propagan mejor hacia adelante, en línea recta, pero que, en cierto grado se desvían también hacia los lados. ¿Se comportan así todas las ondas sonoras? Resulta que no.

Juegan un gran papel la relación entre la longitud de la onda y las dimensiones del orificio. Si la longitud de la onda es grande en comparación con estas dimensiones, al salir del orificio, las ondas se «esparcen» hacia todos los lados, como si este orificio fuese un foco sonoro. Por el contrario, si la longitud de la onda es mucho menor que las dimensiones del orificio, el sonido se propaga en rayos, y allí donde la recta trazada desde el foco sonoro hacia el auditor se encuentra con un obstáculo (en nuestro caso, la pared), se forma una «sombra», es decir, casi no se oye el sonido.

En nuestro ejemplo, la frecuencia media de la voz humana de 1000 Hz corresponde a la longitud de onda de 30 cm. Por eso, tales ondas se propagan mejor cuando la abertura de la ventana es de un metro, pero también se desvían, notablemente hacia los lados.

Es muy difícil representar en el dibujo cómo bordean los obstáculos las ondas sonoras. Es mucho más fácil mostrar cómo se comportan en una situación parecida las ondas de la superficie del agua. Sobre estas ondas hablaremos un poco más adelante. Las propiedades de tales ondas son un poco originales. A pesar de esto, en lo que se refiere a las leyes sobre cómo contornean las ondas los obstáculos, no hay diferencia entre las ondas acuáticas y las acústicas del aire.

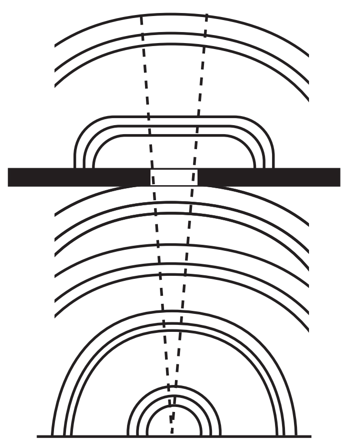


Fig. 122

Las figs. 122 y 123 representan el paso de las ondas acuáticas de diversa longitud por un mismo orificio. En la Fig. 122, la longitud de la onda es muchísimo mayor que las dimensiones del orificio. En este caso, la onda llena casi totalmente la región situada detrás de la pantalla. En la Fig. 123 está representada la onda de una longitud muy pequeña. Ahora, la propagación de la onda se efectúa en rayos. La onda casi no alcanza la región de la sombra geométrica.

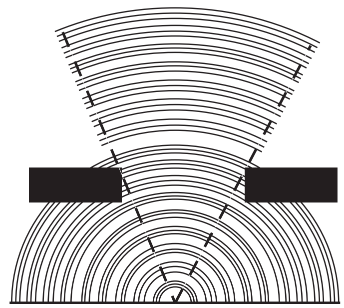


Fig. 123

Por consiguiente, resulta que, cuando la longitud de las ondas acústicas es mucho menor que las dimensiones de los objetos con que tropiezan, el sonido se comporta exactamente igual que si fuese una corriente de partículas que se mueve en el aire y no como vibraciones del aire. La diferencia con las partículas ordinarias consiste, fundamentalmente, en que éstas pueden moverse con velocidades arbitrarias, mientras que el sonido se propaga a una misma velocidad.

La naturaleza ondulatoria del sonido se hace sentir en que éste siempre se desvía, en cierto grado, de la propagación rectilínea. Ya habíamos dicho que esta desviación es tanto menor, cuanto menor sea la longitud de onda, pero siempre existe y, en principio, puede ser medida. Esta desviación se llama difracción del sonido. La existencia de la difracción podría servir de demostración de que el sonido representa un movimiento ondulatorio, si no lo supiésemos ya directamente (por el método de obtención del sonido). Estudiando la difracción se podría medir la longitud de las ondas sonoras, si, como antes, no la conociésemos por la frecuencia de las vibraciones del foco del sonido.

Reflexión del sonido

En este apartado se va a suponer que la longitud de la onda acústica es suficientemente pequeña y que, por consiguiente, el sonido se propaga en rayos. ¿Qué es lo que ocurre cuando tal rayo sonoro, propagándose por el aire, incide sobre una superficie sólida? Está claro que en este caso se efectúa la reflexión del sonido. Pero, ¿adónde se refleja?

La analogía de la propagación del sonido con el movimiento de las partículas materiales muestra que esta reflexión tiene que efectuarse del mismo modo que rebota una pelota sobre la pared, con la única diferencia de que, como resultado de un proceso de rozamiento en el choque, la velocidad de la pelota disminuye, mientras que la velocidad de propagación del sonido, que está ligada solamente a las propiedades del medio del aire, naturalmente, no se altera.

El rozamiento se nota aquí, no en la alteración de la velocidad del sonido, sino en que, en la reflexión, parte de la energía de las ondas sonoras se convierte en calor.

Como, por principio, la reflexión del sonido no se diferencia del choque elástico, la ley de reflexión del sonido se puede enunciar del modo siguiente: el ángulo de incidencia del rayo sonoro, o sea, el ángulo formado por el rayo y la normal (o sea, la perpendicular) al sector de la superficie en que incide, es igual al ángulo de reflexión y, además, el rayo reflejado se encuentra en el plano que pasa por el rayo incidente y por la normal a la superficie. Este plano se llama plano de incidencia del rayo.

Así pues, si queremos saber hacia dónde irá el rayo reflejado, tenemos que obrar del siguiente modo. Se traza una normal en el sitio de incidencia del rayo, se mide el ángulo de incidencia, se traza el plano de incidencia. Después, se marca en este plano, al otro lado de la normal, un ángulo igual al de incidencia; la recta obtenida representará el rayo reflejado (Fig. 124).

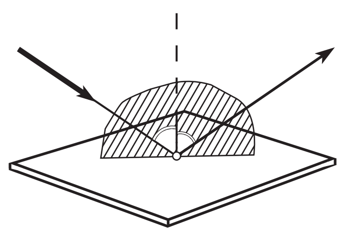


Fig. 124

Resolvamos ahora un problema curioso.

Como ya sabemos, el sonido se propaga hacia todos los lados del foco, y a los puntos alejados llega solamente una pequeña parte de la energía sonora. ¿Cómo tiene que ser la superficie reflejante para recoger de nuevo el sonido del foco en un sólo punto? La forma de esta superficie tiene que ser tal, que los rayos que sobre ella incidan desde un punto (foco sonoro) con diversos ángulos de inclinación se reflejen de nuevo en un punto. ¿Qué superficie es ésta?

Ya sabemos lo que es la elipse. En la pág. 132 se habló de esta curva admirable, que posee la propiedad de que la distancia desde uno de los focos hasta cualquier punto de la curva, más la distancia desde el otro foco hasta el mismo punto, es constante para todos los puntos de la elipse. Figúrense que la elipse gira alrededor del diámetro principal.

La línea que gira engendrará una superficie llamada elipsoide. La forma del elipsoide recuerda al huevo.

La elipse posee la siguiente propiedad geométrica (Fig. 125). La bisectriz de un ángulo inscrito en ella, cuyos lados pasen por los focos, es normal a la elipse (o sea, perpendicular a la tangente de la elipse en este punto). Por lo tanto, si el rayo sonoro sale de uno de los focos del elipsoide, reflejándose de su superficie, irá al otro foco. Así se comportan todos los rayos, y todo el flujo sonoro que salió de uno de los focos se concentrará en el otro.

Esta propiedad de las superficies de este tipo se conocía ya en la antigüedad. En la Edad Media, en los tiempos de la inquisición, cuando el control del pensamiento de cada persona era una de las partes fundamentales de la actuación gubernamental, para escuchar las conversaciones se utilizaban superficies abovedadas.

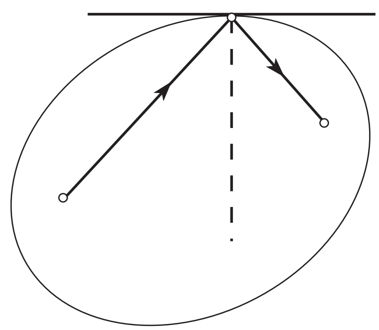


Fig. 125

Dos personas que en voz baja se contaban una a otra sus cuitas en una taberna, no recelaban que, gracias al techo abovedado, el cura que dormitaba en el otro extremo de la taberna, oía cada palabra de su conversación casi tan bien como ellos mismos.

Es difícil construir una superficie elipsoidal. Pero secciones pequeñas de una superficie esférica se diferencian muy poco por su forma de las secciones de un elipsoide.

Si se coloca un objeto sonoro ante tal «espejo» esférico, los rayos sonoros que parten de él, se reunirán de nuevo después de reflejados, aunque no en un solo punto, como en el elipsoide verdadero, sino en una pequeña región del espacio.

Se puede realizar este experimento incluso con un plato hondo ordinario. Si cerca del plato, se coloca un reloj, cuyo tictac prácticamente no se oiga a la distancia de cerca de un metro, a una distancia bastante lejana del plato se puede hallar un punto, en el cual el tictac del reloj se oirá con tanta fuerza, como si estuviese al lado del oído. Este fenómeno se emplea en la construcción de la concha del apuntador en el teatro. La posición del apuntador y la forma de la concha son las más convenientes para la reflexión del sonido hacia la parte del escenario.

La reflexión del sonido de las paredes de los locales interesa mucho a quienes construyen teatros, edificios para conciertos, salas de reuniones. Este campo de la técnica de la construcción, que se dedica al problema de una mejor audición en los locales cerrados, se llama acústica arquitectónica.

Ondas que van por la superficie

Los que sirven en los submarinos no conocen las tempestades del mar. Durante las tempestades más fuertes, en las profundidades de unos cuantos metros bajo el nivel del mar reina la calma. Las ondas marítimas es uno de los ejemplos de un movimiento ondulatorio que abarca solamente a la superficie del cuerpo.

A veces puede parecer que las ondas marítimas son corrientes de masas de agua. Pero esto no es así, y no es difícil de convencerse de que el movimiento de las partículas de agua es oscilatorio; para esto no hay más que observar el balanceo en las olas de una lancha con los remos en reposo. El movimiento es hacia arriba, hacia abajo, un poco hacia adelante y un poco hacia atrás, pero casi sin ningún avance. Observaciones más minuciosas mostrarán que las partículas del agua efectúan un movimiento circular. Cada partícula de agua describe una trayectoria muy próxima a la circunferencia. El plano de los círculos está situado en la dirección de propagación de las ondas, es decir, transversalmente al frente de la onda.

El cuadro de las perturbaciones marítimas suele ser muy diverso: rizos finos, oleadas, olas que frecuente o paulatinamente se suceden unas a otras. Hablando en el idioma de los físicos, las ondas pueden ser de diferente amplitud y de diversa longitud.

Como ya se dijo anteriormente, la perturbación se amortigua rápidamente al aumentar la profundidad. Las partículas de agua situadas bajo la superficie acuática efectúan oscilaciones de menor y menor amplitud, a medida que se sumerge. A la profundidad de la mitad de la longitud de onda, la amplitud de oscilación disminuye ya en 20 veces, y a la profundidad de la longitud de onda, casi no queda ningún movimiento.

Hasta ahora hemos hablado de las ondas, cuya velocidad de propagación dependía solamente de las propiedades del medio. Otra cosa es cuando se trata de ondas superficiales; en este caso, las oscilaciones de diferente frecuencia se propagan con diferentes velocidades. La velocidad de propagación y el período de oscilación están ligadas por una dependencia simple: $c = \frac{gT}{2\pi}$ donde g es la aceleración de la gravedad.

Es completamente natural la aparición en esta fórmula de la aceleración g de la gravedad, pues precisamente la fuerza de gravedad es la que hace que la superficie del agua sea plana. Según esta fórmula, si la frecuencia es de 1 Hz, las ondas corren con la velocidad de 1.5 $\frac{m}{seg}$. Esta fórmula es válida para las olas en alta mar; cerca de la costa y, en general, a pequeñas profundidades esta simple dependencia se complica.

Como $\lambda = cT$, se tiene que $c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$. Por consiguiente, al crearse fuertes perturbaciones en alguna zona del mar, hasta los lugares alejados llegan primero las ondas más largas, las que tienen mayor velocidad de propagación.

Cómo transmiten el sonido los cuerpos sólidos

Hay una diferencia bastante grande entre la transmisión del sonido por los cuerpos líquidos y gaseosos, de una parte, y por los cuerpos sólidos, de otra. La diferencia consiste en que en los cuerpos sólidos, junto con las ondas longitudinales pueden crearse ondas transversales.

Como el mismo término dice, la onda transversal posee la particularidad de que las partículas que participan en el proceso ondulatorio efectúan oscilaciones, pero no en la dirección de propagación de la onda, sino en la dirección transversal, o sea, en la dirección perpendicular a la de propagación de la onda.

La onda sonora en los gases y en los líquidos representa una onda de sobrepresiones y depresiones alternadas. Tal onda sólo puede ser longitudinal; las oscilaciones transversales de las partículas no pueden originar alteraciones locales de volúmenes, o sea, no pueden dar lugar a sobrepresiones y depresiones. La onda transversal en un líquido o en un gas no puede existir, puesto que estos medios se resisten a la compresión y a la expansión, pero no al desplazamiento. El cuerpo sólido no sólo se resiste a la alteración de su volumen, sino también a la alteración de su forma, por eso, además de las ondas longitudinales se pueden crear en él ondas transversales.

Al propagarse la onda transversal, en el medio sólido se forma una onda de desplazamiento; ésta desplaza a las partículas del cuerpo hacia diversos lados de la línea de su propagación alternativamente. En lo que se refiere a las ondas longitudinales en un medio sólido, éstas van acompañadas de sobrepresiones y depresiones como las ondas en los líquidos y gases.

Las ondas longitudinales y transversales transmiten igualmente bien el sonido, pero con diferente rapidez. Las ondas longitudinales se propagan siempre más rápidamente que las transversales.

He aquí unos datos característicos. En el acero, la velocidad de las ondas transversales es de cerca de $3000\dfrac{m}{seg}$ y la de las longitudinales, de $6000\ \dfrac{m}{seg}$. Menor velocidad de propagación tiene el sonido en el plomo blando, que es de $700\dfrac{m}{seg}$ para las ondas transversales y de $2200\ \dfrac{m}{seg}$ para las ondas longitudinales.

Particularmente grande es la relación entre las velocidades de las ondas longitudinales y transversales en la goma. Ésta débilmente se resiste a la variación de la forma, pero no con facilidad cambia su volumen. Las ondas transversales se propagan en la goma con una velocidad de $30\ \dfrac{m}{seg}$ solamente, que es 10 veces menor que la velocidad del sonido en el aire.

Además de estos dos tipos de ondas, por el cuerpo sólido se propagan también las ondas superficiales. Sin embargo, éstas no se parecen en nada a las olas del mar, en las que la fuerza que hace volver a las partículas desviadas es la de gravedad. Las ondas en la superficie del cuerpo sólido se mantienen por fuerzas elásticas que ligan a las partículas del cuerpo sólido. Es natural, por eso, que la velocidad de las ondas superficiales dependa de las propiedades elásticas. Aproximadamente, la velocidad de las ondas superficiales es de 0.9 de la velocidad de propagación de las ondas transversales. Igual que en los líquidos, las trayectorias de las partículas oscilantes están situadas en un plano perpendicular al frente de la onda. Los puntos se mueven por curvas cerradas, parecidas a elipses. A medida que se aleja de la superficie, cambia la forma de la elipse, se hace menor la amplitud de la oscilación y se amortigua la onda.

Precursores de los terremotos

La tierra transmite bien el sonido. Casi en cada novela de los tiempos de la edad media, se presenta una escena de persecución del héroe que se escapa a caballo. «De pronto, el jinete para su caballo, se apea y acerca el oído a la tierra: ¡Nos persiguen, hay que apresurarse!». Y, en efecto, los golpes de los cascos del caballo sobre la tierra se transmiten a la distancia de más de un kilómetro. La tierra, como cualquier cuerpo elástico, sirve de conductor de las ondas acústicas.

Las ondas acústicas que se propagan por la tierra nos proporcionan datos sobre los terremotos y nos ayudan a conocer los procesos que tienen lugar en la corteza terrestre. Las ondas acústicas que surgen en los terremotos se llaman sísmicas. La existencia de la onda sísmica, su amplitud, velocidad, longitud, frecuencia de oscilación, todo esto se puede determinar con unos aparatos especiales muy sensibles, llamados sismógrafos.

Los sismógrafos son unos aparatos muy complicados. Pero es fácil comprender cómo trabajan. La parte principal del sismógrafo es una pesa suspendida de un resorte. Al moverse verticalmente la tierra, el punto de suspensión del resorte con la pesa se desplaza del modo representado en la Fig. 126. A causa de su gran inercia, al principio, la pesa se mantiene en el sitio. A la pesa va sujeta una pluma, y al soporte está rígidamente sujeto un papel. Cuando se desplaza el soporte, la pluma describe en el papel una línea vertical. Para dibujar la onda sísmica hay que tirar del papel.

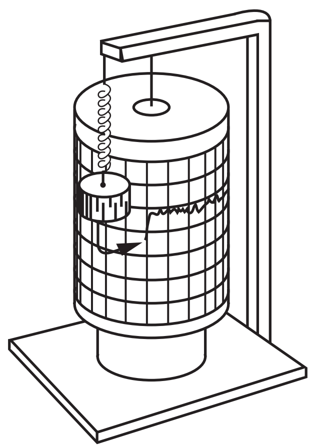


Fig. 126

Además de estos sismógrafos que describen los desplazamientos verticales del suelo, se utilizan los sismógrafos horizontales. En la Fig. 127 se muestra el principio de acción del sismógrafo horizontal. La parte principal de este aparato consiste en una varilla casi vertical. Una carga excéntrica convierte a esta varilla en péndulo, que es capaz de girar alrededor del eje de la varilla. Si el suelo está tranquilo, el grave del péndulo reposa en la posición más baja. Los golpes en la dirección horizontal producen desplazamientos del eje del péndulo, mientras que la pesa, a causa de la inercia, se mantiene al principio en el mismo sitio. El giro del péndulo se registra por un aparato autorregistrador.

Si se establecen un sismógrafo vertical y dos sismógrafos horizontales que oscilan en planos perpendiculares entre sí, se puede escribir la magnitud y dirección de cualquier desplazamiento.

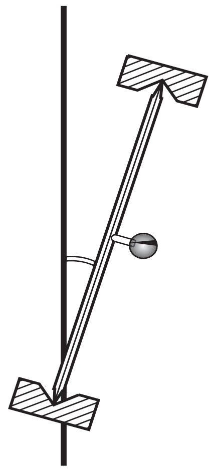


Fig. 127

Con la palabra «terremoto» se liga generalmente el concepto de casas destruidas, de árboles que se hunden en las grietas que se han abierto, de gente aplastada. Estos grandes terremotos suelen ocurrir raramente; el término «terremoto» lo emplean los investigadores sismólogos para todos los acontecimientos que tienen lugar debajo de la tierra y que son capaces de poner en movimiento la pluma del sismógrafo que registra las oscilaciones de la corteza terrestre. Tales terremotos no los nota nadie, a no ser el sismógrafo. En el globo terrestre, durante un año, se observan alrededor de cien mil. Resulta, que «el reino subterráneo» lleva una vida muy activa.

La onda sísmica se propaga desde el foco del terremoto en todas las direcciones y se percibe por muchos sismógrafos instalados en diversas ciudades y países. Sobre cada temblor de la tierra se van a tener avisos tres veces, puesto que los tres tipos de ondas de que se hablaba se pondrán en marcha desde el lugar del terremoto. Primero, llegará al observador la onda longitudinal, tras ella, la transversal y, por último, llegará la superficial.

Al mismo tiempo, las ondas superficiales son las principales para el sismólogo, puesto que (por causas muy claras) éstas son las más intensas.

En la pág. 268 decíamos, que la intensidad de la onda acústica decrece inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del foco sonoro. Pero esto no se refiere a las ondas superficiales. Tracemos alrededor del foco sonoro dos circunferencias y no dos esferas. La energía de la onda que pasa a través de la circunferencia es proporcional a $I \cdot 2\pi r$, donde I es la intensidad. Por consiguiente, no habiendo pérdida de energía, la intensidad de la onda superficial disminuye igual que disminuye $\dfrac{1}{r}$ y no igual que $\dfrac{1}{r^2}$. Por esto, estas ondas llegan hasta el observador menos debilitadas que las longitudinales y que las transversales del espacio.

Las investigaciones de las ondas sísmicas, no sólo dan la posibilidad de establecer el foco de los terremotos, sino que permiten llevar a cabo un interesante trabajo de estudio de la constitución de la Tierra. Las señales que provienen de lo profundo de la Tierra dan la posibilidad de juzgar sobre su composición. Son, pues, diferentes las velocidades de las ondas sísmicas a diversas profundidades. Cerca de la superficie terrestre, las ondas longitudinales tienen una velocidad de unos 5.5 $\dfrac{km}{seg}$, las transversales, de unos 3.3 $\dfrac{km}{seg}$. Al mismo tiempo, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el centro de la Tierra alcanza unos 11−12 $\dfrac{km}{seg}$.

Sabiendo qué particularidades de la constitución pueden influir en la velocidad de propagación de las ondas, los investigadores hacen conclusiones sobre la estructura del núcleo de la Tierra. Está establecido, por ejemplo, que las ondas transversales no penetran dentro del núcleo terrestre.

De esto se deduce que el núcleo de la Tierra es líquido, puesto que por los cuerpos líquidos no pasan las ondas transversales.

La onda de choque

En la vida cotidiana, la palabra «onda» está ligada a la idea de un proceso periódico, un ejemplo claro de lo cual es la agitación del mar. La distracción más preferida de los nadadores es balancearse en las «olas».

En la física se utiliza la palabra «onda» en un sentido más amplio. Se habla también de propagación de la onda en el caso en que el aumento o la disminución local de la presión se debe a un choque, a una explosión o a una aspiración del aire.

La onda de aire creada por una explosión tiene un aspecto muy original. (Ya hemos dicho que se puede fotografiar la onda de aire, por eso, la palabra «aspecto» es adecuada para la onda de presión.)

En la Fig. 128 está representado el perfil de tal onda explosiva: la curva representa la distribución de la presión a lo largo de una dirección de propagación de la onda. El perfil de la onda se compone de un lento ascenso que termina con un descenso vertical. La dirección del movimiento de la onda que se muestra en el esquema es de izquierda a derecha. Los espacios de aire situados a la derecha del frente están en reposo en el instante considerado: no ha llegado todavía la onda hasta ellos.

La particularidad principal de la onda explosiva, que acabamos de describir, o como la suelen llamar, de choque, consiste en un salto brusco de la presión en el «frente»; los puntos que están en reposo son arrastrados por el máximo de la presión, prácticamente, en un instante. La partícula de aire que estaba a la presión atmosférica adquiere en el siguiente instante, en este mismo sitio, la presión máxima. Después, a medida que avanza la onda de choque, la presión en el punto que estamos observando, va disminuyendo paulatinamente en correspondencia con el perfil del declive suave de la pendiente de la izquierda.

En la Fig. 128 se representa la distribución de la presión a lo largo de una línea de propagación de la onda. La onda se propaga en el espacio y el frente de ella es una superficie.

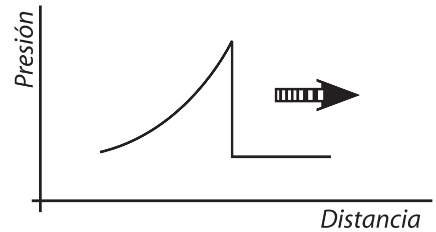


Fig. 128

El frente de la onda de choque lleva consigo, no sólo un salto de presión, sino también un salto de densidad y de temperatura.

La onda de choque, además de cambio de presión y de temperatura, lleva consigo movimiento. En la onda acústica, el aire se pone en movimiento a lo largo de la línea de propagación de la onda, pero este fenómeno es poco perceptible. En la onda de choque, el aire es arrastrado con tanta fuerza, que la palabra «arrastrar» resulta ser una palabra muy suave. La onda de choque crea un viento fortísimo, un huracán... Quizás no se pueda encontrar una palabra adecuada para el movimiento en las potentes ondas de choque.

El salto de las propiedades de que hablamos es exclusivamente brusco; el paso del reposo absoluto a la velocidad máxima del movimiento se efectúa en un intervalo de trayectoria, unas cuantas veces mayor que la longitud del recorrido libre de la molécula de gas. Para el aire, esto es una magnitud submicroscópica de unas cienmilésimas de centímetro. El tiempo del salto se mide con diez mil millonésimas (10^{-10}) de segundo. Tal alteración, verdaderamente instantánea, del estado de la presión, de la densidad, de la temperatura, de la velocidad del movimiento, es precisamente un rasgo de la onda de choque.

El salto de presión que lleva consigo la onda de choque, o con otras palabras, la altura del frente, puede ser muy diverso, según la fuerza de la explosión; en el momento en que llega la onda de choque, la presión puede aumentar en algunos tantos por ciento, hasta decenas de veces.

Los valores de los saltos de todas las magnitudes en el frente de la onda de choque están ligados entre sí. Sabiendo la magnitud del salto de la presión, se puede calcular la magnitud del salto de la densidad, de la temperatura y de la velocidad del movimiento. La altura del frente determina también la velocidad de propagación de la onda de choque, La velocidad de las ondas débiles de choque no se diferencian de la velocidad de propagación de la onda acústica ordinaria. A medida que aumenta la altura del frente, crece también la velocidad de propagación de la onda de choque.

Veamos algunos datos numéricos para una onda de choque «simple» que aumenta la presión en vez y media. Resulta que este aumento de presión trae consigo un aumento de la densidad del aire en un 30 % y un aumento de la temperatura en 35 ^{o}C. La velocidad del frente de tal onda de choque es de cerca de 400 $\dfrac{m}{seg}$. Ya con este salto, relativamente pequeño, de presión en 1.5 veces, la onda de choque va a arrastrar consigo al aire con una velocidad de 100 $\dfrac{m}{seg}$ o sea, de 360 $\dfrac{km}{hora}$. Esta velocidad del viento no la tiene ni siquiera un huracán.

Sin embargo, puede haber explosiones capaces de crear unas ondas de choque incomparablemente más fuertes. Si la onda lleva consigo un aumento de la presión en diez veces, en el frente de ella se produce un aumento, a saltos, de la densidad en cuatro veces y de la temperatura a 500 ^{o}C. La velocidad del viento alcanza en este caso 725 $\dfrac{m}{seg}$. La velocidad de propagación de tal onda de choque es ya igual a 1 $\dfrac{km}{seg}$.

Las ondas de choque producidas por explosiones fuertes se propagan a decenas de kilómetros. El salto de las propiedades, que lleva consigo la onda de choque, actúa como un golpe brusco sobre los obstáculos que encuentra en su camino. Las ondas débiles de choque rompen los cristales de las ventanas, destruyen las paredes de las casas, arrancan de raíz a los árboles. La acción destructiva de los morteros se basa en mucho en la acción de la onda de choque.

La acción destructiva de las ondas de choque depende de muchas circunstancias y, particularmente, de la duración de la acción de la onda. Para tener cierta idea de la relación entre la acción destructiva de la onda y su parámetro principal, el aumento de la presión, señalemos que la onda de choque, cuyo frente tiene una altura solamente de un 2 %, es capaz de romper los cristales, mientras que la onda que lleva consigo un aumento de la presión en dos veces quiebra las paredes gruesas.

Movimiento con velocidad supersónica

Las ondas de choque de que acabamos de hablar, se propagan con velocidades supersónicas. Resulta que el movimiento de los cuerpos sólidos en el aire con velocidades supersónicas también da lugar a la formación de ondas de choque. Por esto, las ondas de choque tienen mucha importancia para la aviación moderna.

Desde hace poco tiempo, en la aviación se ha convertido en realidad el movimiento con velocidades que sobrepasan los 330 $\dfrac{m}{seg}$, o sea, 1200 $\dfrac{km}{hora}$. El movimiento de los aviones y de los aviones−proyectiles que cruzan el espacio aéreo con velocidades que sobrepasan la barrera del sonido (así se llama la velocidad de 1200 $\dfrac{km}{hora}$), se diferencia muy bruscamente de los movimientos que están situados de este lado de la barrera del sonido. Esta diferencia consiste en que, ante el cuerpo que vuela a la velocidad supersónica, se forma una onda de choque.

En la Fig. 129 se muestra el esquema de la onda de choque formada por un proyectil de forma redondeada. El frente de la onda es una superficie alabeada que pasa un poco por delante del cuerpo móvil. A medida que se aleja de la línea del movimiento, el frente se retrasa del proyectil.

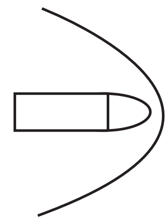


Fig. 129

Un poco diferente es el cuadro de la onda de choque para un cuerpo ojival que tiene la forma bien conocida de un proyectil. La Fig.130 muestra que la onda de choque «se ha sentado en la nariz» del proyectil; el frente de la onda ha adquirido una forma cónica.

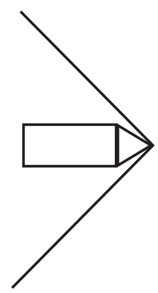


Fig. 130

Es posible fotografiar un proyectil que vuela con una velocidad supersónica. La diferencia brusca de las densidades del aire alrededor del proyectil diseña claramente el frente de la onda de choque originada por él. Cuanto más rápido se mueva el proyectil, tanto más puntiagudo será el cono.

La onda de choque es la causa fundamental de la resistencia que sufre el cuerpo que se mueve con una velocidad supersónica. Como ya se dijo, a velocidades menores que la del sonido, la resistencia que se crea es debida, fundamentalmente, a la aparición del movimiento turbulento. Por esto, para los movimientos de estos dos tipos, son diferentes las formas más convenientes del cuerpo. Lo que es conveniente para los movimientos rápidos es inconveniente para los movimientos lentos, y viceversa.

Un cuerpo de forma ojival por delante, facilita la turbulencia y, por consiguiente, aumenta la resistencia al movimiento con velocidades menores del sonido. Por el contrario, la forma ojival del proyectil disminuye la resistencia de la onda de choque.

Un cuerpo, achatado por delante, disminuye la turbulencia y, por eso, es más conveniente para velocidades menores del sonido que el de forma ojival. Al pasar por la barrera del sonido, esta forma achatada se hace menos conveniente, puesto que el origen fundamental de la resistencia es ahora la onda de choque. Por esta razón, los proyectiles de los cañones son ojivales por delante, pues éstos se mueven con velocidades supersónicas.

Por desgracia no se puede liquidar la onda de choque y, junto con ella, el origen principal de la resistencia del cuerpo. El problema de los constructores de proyectiles y de aviones consiste en debilitar la resistencia creada por la onda de choque.

Para los proyectiles y para los cuerpos de los aviones, se consigue disminuir la resistencia dándoles formas ojivales. Pero, ¿qué forma se puede proponer para las alas? En los últimos diez años, los aviones de grandes velocidades han obtenido nuevas configuraciones: las alas se han replegado hacia el cuerpo, el avión ha tomado la forma de una flecha. Esto se ha hecho precisamente para vencer la resistencia de las ondas de choque (Fig. 131).

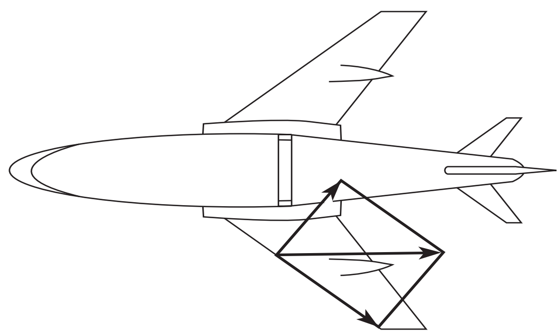


Fig. 131

En lugar de hablar del movimiento del avión que corta al aire, se puede hablar de la corriente de aire que tropieza contra el avión, considerando a éste inmóvil. Esto es, pues, lo mismo.

En la Fig. 131 está representado un avión, cuya ala está situada oblicuamente con respecto al flujo. El vector velocidad del aire en el ala se puede descomponer en dos vectores, dirigiendo uno de ellos a lo largo del ala y el otro, transversalmente. El aire se desliza libremente a lo largo de la longitud del ala, y este movimiento de deslizamiento longitudinal no puede ser el origen fundamental de la resistencia. El ala va a experimentar la resistencia principal a causa del movimiento del aire que es transversal al ala. Pero la componente transversal de la velocidad, con la que el aire se mueve al encuentro del ala, puede ser también considerablemente menor que la velocidad frontal. Puede ocurrir incluso, que, en el movimiento del avión con velocidad supersónica, la velocidad transversal del aire con respecto a sus alas sea menor que la barrera del sonido. Esta disminución de la velocidad transversal conducirá a la debilitación de las ondas de choque y a la disminución de la resistencia. He aquí por qué a los aviones de velocidades superiores les dan la forma de una flecha.

Por lo pronto, ante los constructores de aviones se presenta un problema difícil: hallar un compromiso entre las formas que son cómodas para las velocidades ordinarias y para las supersónicas. Tal compromiso es necesario por la simple causa de que el avión despega y aterriza a velocidades relativamente pequeñas.

Actualmente, hay aviones de reacción que vuelan con velocidades de muchos miles de kilómetros por hora y los constructores continúan su trabajo para alcanzar velocidades todavía mayores. Sin embargo, en este camino aparecieron nuevas dificultades. Habiendo superado la barrera del sonido, los ingenieros se han encontrado con la barrera térmica.

Un proyectil o un avión en rápido movimiento comprime el aire que se encuentra ante él. La compresión da lugar al aumento de la temperatura. El aire cortado por el cuerpo en movimiento se calienta y, por lo tanto, se calientan también las paredes del avión.

El aumento de la temperatura resulta ser proporcional al cuadrado de la velocidad del aire. Cuanto mayor sea la velocidad, tanto más se calentará el aire. En el momento en que se alcanza la barrera del sonido, la temperatura del aire delante del avión se eleva solamente en 60 ^oC. Esto no tiene todavía gran importancia práctica. Pero, cuando la velocidad del movimiento del avión es dos veces mayor que la del sonido, la temperatura del aire se eleva ya en 240 ^oC, y cuando alcanza una velocidad tres veces mayor que la del sonido, el aire eleva su temperatura en unos 820 ^oC, etc. Es comprensible que este calentamiento de lugar a complicaciones tecnológicas considerables.

De los datos expuestos se ve cuán rápidamente se eleva la temperatura al aumentar la velocidad. Al moverse con velocidades de unos 10 $\dfrac{km}{seg}$ las temperaturas se hacen tan grandes, que cualquier cuerpo se funde y se convierte en gas. Del cosmos a la atmósfera de la Tierra caen continuamente meteoritos, que son piedras y piedrecitas de diversas dimensiones. Éstas se mueven con velocidades de unas cuantas decenas de kilómetros por segundo. A la altura de $150-200$ km sobre la superficie de la Tierra, donde la atmósfera está ya menos enrarecida, estos forasteros comienzan a calentarse notablemente, y a las alturas de unos $130-160$ km sus temperaturas se elevan tanto, que se evaporan. A simple vista, observamos el meteorito candente en el cielo de la noche. En el momento en que lo vemos, nos parece como si hubiese caído una estrella del cielo. La «caída de la estrella» dura poco tiempo; ésta se evapora en fracciones de segundo.

La combustión y la explosión

Como ya se sabe, para que comience la combustión hay que acercar una cerilla ardiendo al objeto que se desea quemar. Pero la cerilla no se inflama por sí sola, hay que encenderla en el fósforo de la caja. De este modo, para que comience la reacción química es necesario un calentamiento previo.

La causa de esto es clara. Esta reacción química representa una reagrupación de la molécula. Para que se pueda efectuar esta reagrupación, es necesario un movimiento térmico muy enérgico de los átomos. Por eso, las velocidades de las reacciones químicas dependen mucho de la temperatura. Por regla general, el aumento de la temperatura en 10 ^oC, origina un aumento de la velocidad de la reacción de combustión en $2-4$ veces.

Si la velocidad de la reacción aumenta, por ejemplo, en 3 veces, al elevar la temperatura en 10 ^oC, el aumento de la temperatura en 100 ^oC proporcionará un aumento de la velocidad en $3^{10} \approx 60000$ veces; el aumento de la temperatura en 200 ^oC proporcionará ya un aumento de la velocidad en $3^{20} \approx 4 \cdot 10^9$ veces y el aumento de la temperatura en 500 ^oC, proporcionará un aumento de la velocidad en 350 veces, es decir, aproximadamente, en 1024 veces.

No tiene nada de extraño, que la reacción que se efectúa con una velocidad normal a la temperatura de 500 ^oC, no tenga lugar a la temperatura de la habitación. La inflamación crea en el momento inicial la temperatura necesaria para la reacción. A continuación, el calor que se desprende de la reacción mantiene alta la temperatura.

El recalentamiento local inicial tiene que ser suficiente para que el calor desprendido en la reacción supere al calor cedido al medio frío de alrededor. Por eso, cada reacción de combustión tiene, como suele decirse, su temperatura de inflamación. La combustión empieza solamente cuando la temperatura inicial es más alta que la temperatura de inflamación. Por ejemplo, la temperatura de inflamación de la madera es de 610 ^oC, la de la gasolina es de cerca de 200 ^oC, la del fósforo de 50 ^oC.

La combustión de la leña, del carbón o del petróleo, es una reacción química de unión de estas substancias con el oxígeno del aire. Por eso, tal reacción se efectúa en la superficie; hasta que no se queme la capa exterior, la siguiente no puede tomar parte en la combustión. Ésta es la explicación de la lentitud relativa de la combustión.

De que lo dicho es cierto, es fácil convencerse en la práctica. Desmenuzando el combustible, se puede aumentar considerablemente la velocidad de la combustión. Con este fin, en muchas instalaciones de hornos se efectúa la pulverización del carbón en los fogones.

Otra cosa ocurre cuando no hay necesidad de la atmósfera del aire por contener la substancia todo lo necesario para la reacción. Un ejemplo de tal substancia es la mezcla del hidrógeno con el oxígeno (ésta se llama gas detonante). La reacción no se efectúa en la superficie, sino dentro de la substancia. A diferencia del caso de la combustión, toda la energía que se forma en la reacción se cede casi instantáneamente, debido a lo cual, aumenta bruscamente la presión y se efectúa la explosión. El gas detonante no se quema, sino que explota.

Así, pues, la substancia explosiva tiene que contener dentro de sí los átomos y las moléculas que hacen falta para la reacción. Está claro que se pueden preparar mezclas gaseosas explosivas. Existen también substancias sólidas explosivas. Éstas son explosivas, precisamente, porque en su composición figuran todos los átomos que son necesarios para la reacción química que da calor y luz.

La reacción química que se efectúa en la explosión es una reacción de descomposición, de desintegración de las moléculas en partes. En la Fig. 132 se muestra, como ejemplo, una reacción explosiva, la desintegración en partes de la molécula de la nitroglicerina. Como se ve en la parte del esquema de la derecha, de la molécula inicial se forman moléculas de gas carbónico, de agua, de nitrógeno. Entre los productos de la reacción hallamos los productos ordinarios de la combustión, pero ésta se ha efectuado sin la participación de las moléculas de oxígeno del aire; todos los átomos necesarios para la combustión se encuentran dentro de la molécula de la nitroglicerina.

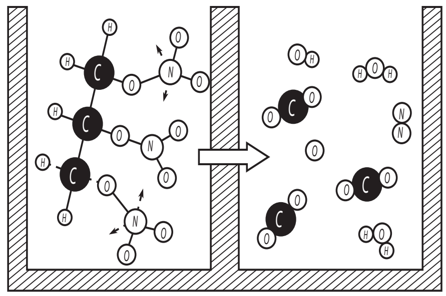


Fig. 132

¿Cómo se propaga la explosión por la substancia explosiva, por ejemplo, en el gas detonante? Cuando se quema una substancia explosiva se produce un calentamiento local. La reacción tiene lugar en un volumen calentado. Pero, con la reacción, se desprende calor, que, mediante una transmisión térmica, pasa a las capas próximas de la mezcla. Este calor es suficiente para que en la capa vecina se efectúe la reacción. Las nuevas cantidades de calor desprendido llegan a las siguientes capas del gas detonante, y así, con una velocidad ligada a la transmisión del calor, la reacción se propaga por toda la substancia. La velocidad de esta transmisión es de unos $20-30\ \dfrac{m}{seg}$. Naturalmente, ésta es muy rápida. Un tubo de gas de un metro explota durante una veinteava parte de segundo, es decir, casi instantáneamente, mientras que la velocidad de combustión de la leña o de trozos de carbón, que se produce en la superficie y no en el volumen, se mide en centímetros por segundo, es decir, es unos cuantos miles de veces menor.

A pesar de esto, a esta explosión, se la puede llamar lenta, puesto que es posible otra explosión centenares de veces más rápida que la descrita.

La explosión rápida es debida a la onda de choque. Si en alguna capa de la substancia se eleva bruscamente la presión, desde este lugar empezará a propagarse la onda de choque. Como ya sabemos, la onda de choque da lugar a un salto considerable de la temperatura. Llegando a la capa vecina, la onda de choque eleva su temperatura. El aumento de la temperatura origina la reacción explosiva, y la explosión conduce a un aumento de la presión y mantiene a la onda de choque, cuya intensidad, en caso contrario, disminuiría a medida que ella se propagase. De este modo, la onda de choque produce una explosión y ésta, a su vez, mantiene a la onda de choque.

La explosión que acabamos de describir se llama detonación. Como la detonación se propaga por la substancia con la velocidad de la onda de choque (de cerca de $1\ \dfrac{km}{seg}$), ésta es, verdaderamente, centenares de veces más rápida que la explosión «lenta».

No se puede plantear la cuestión de qué substancias explotan «lentamente» y cuáles «rápidamente», pues una misma substancia, situada en diferentes condiciones, puede explotar «lentamente» y puede detonar y, en algunos casos, la explosión «lenta» pasa a detonación.

Algunas substancias, como por ejemplo, el yoduro de nitrógeno, explotan al tocarlas con una pajita, con un pequeño calentamiento o con una chispa de luz. Una substancia explosiva como la trilita, no explota al caerse, incluso al ser disparada con un fusil. Para su explosión se necesita una onda de choque muy fuerte.

Existen substancias que son todavía menos sensibles a las acciones exteriores. La mezcla de abono del nitrato amónico con el sulfato amónico no se creía que fuera explosiva, hasta que no ocurrió un trágico caso en una fábrica química alemana de Oppau en el año 1921. Para desmenuzar una mezcla prensada se empleó allí el método de explosión. El resultado fue que volaron el almacén y la fábrica entera. No se podía culpar a los ingenieros de la fábrica de la desgracia: unas veinte mil explosiones, aproximadamente, se efectuaron normalmente y solamente una vez se crearon las condiciones favorables para la detonación.

Las substancias que explotan solamente por la acción de la onda de choque y que, en condiciones ordinarias, se mantienen estables, no siendo vulnerables por el fuego, son muy útiles para la técnica de las explosiones. Tales substancias se pueden producir y depositar en grandes cantidades. Sin embargo, para poner en acción a estas substancias explosivas inertes, se necesitan detonantes, o como se suele decir, iniciadores de la explosión. Estas substancias explosivas iniciadoras son completamente necesarias como originadoras de las ondas de choque.

Pueden servir de ejemplos de substancias iniciadoras la azida de plomo o el fulminato de mercurio. Si un granito de esta substancia se coloca en una hoja de lata y se quema, se produce una explosión que hace un agujero en la lata. La explosión de estas substancias es detonadora en cualesquiera condiciones.

Si se coloca un poco de azida de plomo en la carga de una substancia explosiva secundaria y se quema, la explosión del iniciador originará una onda de choque que será suficiente para la detonación de la substancia explosiva secundaria. En la práctica, la explosión se efectúa mediante una cápsula detonante ($1-2$ g de substancia iniciadora). La cápsula se puede quemar a distancia, por ejemplo, mediante un cordón largo (mecha); la onda de choque que parte de la cápsula hará explotar a la substancia explosiva secundaria.

En una serie de casos, la técnica tiene que luchar contra los fenómenos de detonación. En el motor del automóvil, se produce ordinariamente una «explosión lenta» de la mezcla de la gasolina con el aire. Sin embargo, a veces surge la detonación. No se puede admitir que en el motor las ondas de choque sean un fenómeno sistemático, puesto que su acción sobre las paredes de los cilindros del motor da lugar a que se estropeen rápidamente.

Para la lucha contra la detonación en los motores hay que emplear una gasolina especial (la gasolina llamada de alto octano) o bien mezclar la gasolina con substancias especiales, con antidetonantes, que no dan a la onda de choque la posibilidad de desarrollarse. Uno de los antidetonantes más difundidos es el tetraetilo de plomo. Esta substancia es muy venenosa y las instrucciones advierten a los chóferes la necesidad de manejar con cuidado esta gasolina.

Hay que evitar la detonación en la construcción del cañón de artillería. Durante el disparo, no tienen que formarse dentro del cañón ondas de choque, pues, en caso contrario, éste se estropearía.

XVI. La energía a nuestro alrededor

Cómo convertir la energía en trabajo

Al hombre le hacen falta máquinas; para esto hay que saber crear movimiento: mover émbolos, girar ruedas, arrastrar los vagones de los trenes. El movimiento de las máquinas requiere trabajo. ¿Cómo obtenerlo?

A primera vista parece que ya hemos estudiado este problema, llegando a la conclusión de que el trabajo se efectúa a cuenta de la energía. Hay que robar energía al cuerpo o al sistema de cuerpos, y, entonces, se obtendrá trabajo.

La receta es justa, mas todavía no hemos tocado la cuestión sobre el modo de efectuar tal transformación. ¿Siempre se puede robar energía a un cuerpo? ¿Qué condiciones se necesitan para esto? Ahora veremos que casi toda la energía que hay a nuestro alrededor es inútil por completo: no se puede convertir en trabajo. Esta energía no se puede incluir de ningún modo en nuestras reservas energéticas. Aclaremos esto.

Desviado de la posición de equilibrio, el péndulo, tarde o temprano, se para; la rueda de una bicicleta invertida, al ser empujada con la mano, dará muchas vueltas, pero, al fin y al cabo, también terminará su movimiento. No hay excepciones en esta importante ley: todos los cuerpos que nos rodean y que se mueven espontáneamente, al fin y al cabo, se paran[15].

Si se tienen dos cuerpos, uno de los cuales está caliente y el otro frío, el calor se irá transmitiendo del primero de ellos al segundo hasta que sus temperaturas se equilibren. En este caso terminará la transmisión de calor y pararán de alterarse los estados de los cuerpos. Se establecerá un equilibrio térmico.

No existe un solo fenómeno en el que los cuerpos salgan por su cuenta del estado de equilibrio. No puede darse el caso de que la rueda situada en el eje empiece a girar por sí sola. Tampoco puede ocurrir que se caliente por sí mismo el tintero situado sobre la mesa.

La tendencia al equilibrio significa que para los sucesos solamente hay un paso natural: el calor pasa del cuerpo caliente al frío, pero no puede pasar por sí solo del cuerpo frío al caliente.

[15] Naturalmente, aquí no se tiene en cuenta el movimiento uniforme de traslación y la rotación uniforme de un sistema de cuerpos como un todo.

La energía mecánica del péndulo en oscilación se transforma en calor gracias a la resistencia del aire y al rozamiento en el centro de suspensión. Sin embargo, de ninguna manera comenzará a balancearse el péndulo a cuenta del calor que hay en el medio que le rodea. Los cuerpos se ponen en estado de equilibrio, pero no pueden por sí solos salir de él.

Esta ley de la naturaleza muestra, directamente, qué parte de la energía que está a nuestro alrededor es inútil por completo. Ésta es la energía del movimiento térmico de las moléculas de aquellos cuerpos que se encuentran en estado de equilibrio. Tales cuerpos no son capaces de convertir su energía en movimiento mecánico.

Esta parte de energía es enorme. Calculemos la magnitud de esta energía «muerta». Al disminuir la temperatura en 1 ^{o}C, un kilogramo de tierra, que tiene una capacidad calorífica de 0.2 $\dfrac{Kcal}{kg}$, pierde 0.2 $Kcal$. Éste es un número relativamente pequeño. Sin embargo, calculemos cuánta energía obtendríamos si se consiguiese enfriar en un solo grado esta substancia tomada en toda la masa terrestre, que es igual a $6 \cdot 10^{24}$ kg. Multiplicando, obtenemos un número grandísimo: $1.2 \cdot 10^{24}$ $Kcal$. Para que podamos figurarnos esta magnitud, señalemos inmediatamente, que actualmente, la energía anual producida por todas las centrales eléctricas de todo el mundo es igual a $10^{15} - 10^{16}$ $Kcal$, o sea, es mil millones de veces menor.

No hay que asombrarse de que cálculos semejantes sean hipnotizadores para los inventores poco expertos. Antes hablamos de las pruebas de construcción de un motor eterno («perpetuum mobile») que crease trabajo de la nada. Operando con las conclusiones de la física, que se deducen de la ley de conservación de la energía, es imposible rechazar esta ley con la creación de un motor eterno (ahora lo llamaremos motor eterno de primera especie). Este mismo error cometen también los inventores un poco más sutiles que hacen construcciones de motores que producen movimiento mecánico a cuenta solamente del enfriamiento del medio. Este motor irrealizable se llama motor eterno de segunda especie. Aquí también se comete un error de lógica, puesto que el inventor se basa en las leyes de la física, que se deducen de la ley sobre la tendencia de todos los cuerpos a mantener el estado de equilibrio, y, mediante estas leyes, procura desmentir las bases en las que ellas se apoyan.

Así, pues, no se puede efectuar trabajo substrayendo solamente calor del medio ambiente. Dicho sea de otro modo, un sistema de cuerpos que están entre sí en equilibrio es improductivo.

Por consiguiente, para obtener trabajo es necesario, ante todo, hallar cuerpos que no estén en equilibrio con sus vecinos. Solamente entonces se conseguirá realizar el proceso de transmisión del calor de un cuerpo a otro o de transformar el calor en energía mecánica.

La creación de un flujo de energía es la condición necesaria para la obtención de trabajo. En el «camino» de este flujo se puede transformar en trabajo la energía de los cuerpos.

Por eso, solamente la energía de los cuerpos que no están en equilibrio con el medio que les rodea, se puede considerar como reservas energéticas útiles para el hombre.

Tendencia al desorden

Una vez abandonados, los cuerpos tienden al equilibrio. El estado natural de los cuerpos es el equilibrio mecánico y térmico. Ya estudiamos con bastante detalle las consecuencias prácticas de esta importante ley de la naturaleza.

Pero, ¿cuál es el significado interno de esta ley? ¿Por qué todo el universo es un camino hacia el estado de equilibrio? ¿Por qué los cuerpos, una vez abandonados, irreversiblemente se aproximan a un estado, en que el movimiento mecánico se para y la temperatura de los cuerpos se equilibra?

Esta pregunta es muy importante e interesante. Para contestarla habrá que comenzar desde muy lejos.

Los casos cotidianos, frecuentes, los consideramos probables. Por el contrario, se suponen improbables, los sucesos que han tenido lugar gracias a la concurrencia de una serie de circunstancias raras.

El caso improbable no requiere la manifestación de ninguna fuerza sobrenatural. En él no hay nada imposible, no hay nada que contradiga a las leyes de la naturaleza. A pesar de esto, en muchos casos estamos completamente convencidos de que lo improbable es, prácticamente, idéntico a lo imposible.

Vean la tabla de premios de la lotería. Calculen cuántos billetes hay cuyos números acaben con la cifra 4, o con 5, o con 6. No nos causará asombro cuando hallemos que a cada cifra corresponde aproximadamente la décima parte de los billetes premiados.

Y, ¿puede ocurrir que haya una quinta parte y no una décima de billetes con números que terminen con la cifra 5? Ustedes dirán que es poco probable. ¿Y si la mitad de los billetes premiados tuvieran este número? ¡No! Esto es completamente improbable..., y, por consiguiente, imposible.

Reflexionando sobre las condiciones que se necesitan para que el suceso sea probable, llegamos a la conclusión siguiente: la probabilidad de un suceso depende del número de modos que se puede realizar. Cuanto mayor sea el número de estos modos, con mayor frecuencia se producirá este suceso.

Más exactamente, probabilidad es la razón del número de modos de realización del suceso dado al número de modos de realización de todos los sucesos posibles.

Escriban las cifras desde 0 hasta 9 en diez redondeles de cartón y colóquenlos en un saquito. Saquen ahora un redondel, observen su número y pónganlo otra vez en el saquito. Esto es muy parecido a la rifa de la lotería. Se puede afirmar con seguridad que no sacarán una misma cifra, por ejemplo, 7 veces seguidas, incluso si dedican toda la tarde a esta obra aburrida. ¿Por qué? La extracción de siete cifras iguales es un suceso que se realiza solamente de diez modos (7 ceros, 7 unidades, 7 doses, etc.). En total hay 10^7 posibilidades de extraer siete redondeles. Por eso, la probabilidad de extraer, uno tras otro, siete redondeles con la misma cifra, es igual a $\dfrac{10}{10^7} = 10^{-6}$ es decir, es solamente igual a una millonésima.

Si se echan en un cajón granitos negros y blancos y se mezclan con una pala, se distribuirán muy pronto y uniformemente por todo el cajón. Cogiendo al azar un puñado de granitos, hallaremos en él, aproximadamente, el mismo número de granitos blancos y negros. Por mucho que los mezclemos, el resultado será siempre el mismo: la uniformidad se conserva. Pero, ¿por qué no se efectúa una división de los granos? ¿Por qué no se consigue, después de mezclados mucho, que queden arriba los granos negros y abajo los blancos? Todo consiste aquí también en la probabilidad. Este estado, en el que los granos se distribuyen desordenadamente, o sea, que los granos blancos y negros están mezclados uniformemente, se puede realizar por una inmensa cantidad de métodos y, por consiguiente, posee la mayor probabilidad. Por el contrario, un estado tal, en que todos los granos blancos estén por encima y todos los negros por debajo, es único. Por eso, la probabilidad de su realización es insignificante.

De los granitos en el cajón, fácilmente pasaremos a las moléculas de que se componen los cuerpos. El comportamiento de las moléculas se debe al azar. Esto, particularmente se ve claro en el ejemplo de los gases. Como ya sabemos, las moléculas de gas chocan desordenadamente, se mueven en todas las direcciones posibles, con una u otra velocidad. Este eterno movimiento térmico baraja las moléculas, las mezcla como lo hace la pala con los granitos en el cajón.

La habitación en que nos encontramos está llena de aire. ¿Por qué no puede ocurrir, en un momento dado, que las moléculas de la mitad inferior de la habitación pasen a la mitad superior, bajo el techo? Este proceso no es imposible, pero es muy improbable. Pero, ¿qué quiere decir muy improbable? Si este fenómeno fuese incluso mil millones de veces menos probable que la distribución desordenada de las moléculas, a pesar de todo, algo se podría esperar. ¿Puede ser que consigamos topar con este fenómeno?

El cálculo muestra que, para un recipiente de 1 cm^3 de volumen, este fenómeno se encuentra una vez cada $10^{30\,000\,000\,000\,000\,000\,000}$ veces. No merece la pena hacer distinción entre las palabras «extremadamente improbable» e «imposible». Es que el número que hemos escrito es inconcebiblemente grande; dividiéndolo por el número de átomos que hay, no sólo en el globo terrestre, sino en todo el sistema solar, resultará, a pesar de todo, un número grandísimo.

¿Cuál será el estado de las moléculas de gas? El más probable. Y el más probable es el estado que se realiza por el máximo número de modos, o sea, la distribución desordenada de las moléculas en la que hay, aproximadamente, un número igual de moléculas que se mueven hacia la derecha y hacia la izquierda, hacia arriba y hacia abajo; en la que en cada volumen se encuentra igual número de moléculas, igual proporción de moléculas rápidas y lentas en las partes superior e inferior del recipiente. Cualquier alteración de este desorden, o sea, de la mezcolanza uniforme y desordenada de las moléculas respecto a los lugares y según las velocidades, está ligada con una disminución de la probabilidad, o bien, abreviando, representa un suceso improbable.

Por el contrario, los fenómenos ligados con la mezcolanza, con la creación de desorden del orden, aumentan la probabilidad del estado.

Esto significa que estos fenómenos son los que van a determinar el curso natural de los sucesos. La ley sobre la imposibilidad de un motor eterno de segunda especie, la ley sobre la tendencia de todos los cuerpos a mantenerse en estado de equilibrio, tienen ahora su explicación. ¿Por qué se transforma el movimiento mecánico en calor?

Pues, porque el movimiento mecánico es ordenado y el térmico es desordenado. El paso del orden al desorden eleva la probabilidad de existencia de un estado determinado.

Los físicos emplean frecuentemente una magnitud auxiliar, llamada entropía. La entropía caracteriza el grado de orden y está ligada por una fórmula simple con el número de modos de creación de un estado. Aquí no vamos a exponer esta fórmula, solamente apuntaremos que, cuanto mayor sea la probabilidad, tanto mayor será la entropía.

La ley de la naturaleza que examinamos ahora, dice: todos los procesos naturales se producen de modo que aumenta la probabilidad de existencia de un estado. Dicho de otro modo, esta misma ley de la naturaleza se formula como la ley del aumento de la entropía.

La ley del aumento de la entropía es una ley muy importante de la naturaleza. De ella se deduce, en particular, la imposibilidad de la construcción de un motor eterno de segunda especie o, lo que es lo mismo, la afirmación de que los cuerpos, una vez abandonados, tienden al equilibrio.

La ley del aumento de la entropía se llama, a veces, segundo principio de la termodinámica (la termodinámica es la ciencia del calor). Y, ¿cuál es el primer principio? Éste es la ley de conservación de la energía.

La denominación que se da a estas leyes de «principio de la termodinámica», se formó históricamente. No se puede decir que fuese acertada esta unión «bajo un mismo techo». Pues, la ley de la conservación de la energía es una ley de la mecánica a la que se someten rigurosamente, tanto los cuerpos grandes, como los átomos y las moléculas por separado. En cuanto a la ley del aumento de la entropía, como se deduce de lo dicho anteriormente, es válida solamente para una reunión suficientemente grande de partículas, mientras que para las moléculas separadas es, simplemente, imposible de formular.

El carácter estadístico (esto significa que se refiere a una reunión grande de partículas) del segundo principio de la termodinámica, no disminuye de ningún modo su importancia. La ley del aumento de la entropía predestina la dirección de los procesos. En este sentido se puede llamar a la entropía director—distribuidor de las riquezas naturales, mientras que la energía desempeña el papel del contador.

¿De quién es el mérito de haber descubierto esta ley importante de la naturaleza? En este caso, no podemos limitarnos con citar un nombre. El segundo principio de la termodinámica tiene su historia.

Aquí, al igual que en la historia del primer principio de la termodinámica, se tiene que recordar el nombre del francés Sadi Carnot. En el año 1824, Carnot publicó con sus medios una obra llamada «Reflexiones sobre la fuerza motriz del fuego». En este trabajo se indicó por primera vez que el calor no podía pasar de un cuerpo frío a uno caliente sin gastar trabajo. Carnot mostró también, que el rendimiento máximo de una máquina térmica (véase más abajo) se determina solamente por la diferencia de temperaturas del calentador o fuente de calor y del medio refrigerante.

Solamente después de la muerte de Carnot, en el año 1832, los físicos fijaron su atención a este trabajo. Sin embargo, tuvo poca influencia en el desarrollo ulterior de las ciencias, puesto que toda la obra de Carnot se basaba en el reconocimiento de una «substancia» indestructible e increable, el fluido calórico.

Solamente después de los trabajos de Mayer, Joule y Helmholtz, que establecieron la ley de equivalencia del calor y del trabajo, el gran físico alemán Rudolf Clausius (1822 − 1888) descubrió el segundo principio de la termodinámica y lo formuló matemáticamente. Clausius introdujo la entropía y mostró que la esencia del segundo principio de la termodinámica se reduce a un aumento inevitable de la entropía en todos los procesos reales.

El segundo principio de la termodinámica permite enunciar una serie de leyes generales a las que tienen que someterse todos los cuerpos, cualquiera que sea su constitución. Sin embargo, todavía queda una pregunta: ¿cómo hallar una relación entre la constitución del cuerpo y sus propiedades? A esta pregunta responde una rama de la física llamada física estadística.

Está claro que se necesita un método completamente nuevo para calcular las magnitudes físicas que caracterizan los sistemas compuestos de millones y millones de partículas. Sería, pues, absurdo, por no decir absolutamente imposible observar los movimientos de todas las partículas y describir este movimiento sirviéndose de las fórmulas de la mecánica. Sin embargo, precisamente esta inmensa cantidad de partículas es la que ofrece la posibilidad de aplicar los nuevos métodos de la «estadística» para el estudio de los cuerpos. Estos métodos emplean ampliamente el concepto de probabilidad de los sucesos. Las bases de la física estadística fueron establecidas por el célebre físico austriaco L. Boltzmann (1844 − 1906). En una serie de trabajos, Boltzmann mostró cómo se podría aplicar los métodos indicados para los gases.

La culminación lógica de estas investigaciones fue la interpretación estadística del segundo principio de la termodinámica dada por Boltzmann en el año 1877. La fórmula que liga la entropía con la probabilidad del estado del sistema está grabada en el monumento a Boltzmann.

Es difícil sobreestimar la proeza científica de Boltzmann, que halló en la física teórica caminos completamente nuevos. Las investigaciones de Boltzmann, durante su vida, fueron causa de burlas por parte del profesorado conservador alemán: en aquel tiempo, las representaciones atómicas y moleculares se tomaban como inocentes y no científicas. Boltzmann acabó suicidándose.

El edificio de la física estadística fue terminado, en grado considerable, con las obras del célebre físico americano J. W. Gibbs (1839 − 1903). Éste generalizó los métodos de Boltzmann y señaló el modo de aplicación del método de la estadística para todos los cuerpos.

El último trabajo de Gibbs salió a la luz ya a comienzos del siglo XX. Este modesto sabio publicaba sus trabajos en el noticiero de una pequeña universidad provincial. Muchos años pasaron antes de que conociesen los físicos sus investigaciones admirables.

La física estadística señala el camino a seguir para poder calcular las propiedades de los cuerpos que constan de una cantidad dada de partículas. Claro que no hay que creer que estos métodos de cálculo son omnipotentes. Si el carácter del movimiento de los átomos en el cuerpo es muy complicado, tal como sucede en los líquidos, el cálculo se hace, prácticamente, irrealizable.

Potencia

Para juzgar sobre la posibilidad que tiene una máquina de efectuar trabajo, y también de la utilización de éste, se emplea el concepto de potencia. La potencia es el trabajo realizado en una unidad de tiempo.

Existen muchas unidades para medir la potencia. En el sistema CGS, la unidad de potencia corresponde a un $\dfrac{erg}{seg}$. Pero 1 $\dfrac{erg}{seg}$ es una potencia demasiado pequeña, y por esto, esta unidad es, prácticamente, incómoda. Mucho más difundida está la unidad de potencia que se obtiene al dividir un joule por un segundo. Esta unidad se llama Watt (W). $1\ W = 1\dfrac{joule}{seg} = 10^7\dfrac{erg}{seg}$.

Cuando esta unidad resulta pequeña, se multiplica por mil y se utiliza el kilowatt.

De los viejos tiempos nos ha quedado de herencia la unidad de potencia llamada caballo de vapor. En los albores del desarrollo de la técnica esta denominación tenía un sentido profundo. Una máquina de 10 caballos de vapor sustituye a 10 caballos: así pensaba el comprador, incluso si no tenía idea sobre las unidades de potencia.

Pero caballos hay diferentes. Probablemente, el autor de la primera unidad de potencia suponía que el caballo «medio» era capaz de realizar, en un segundo, 75 kgf de trabajo. Ésta es la unidad que se ha acordado: $1\ HP = 75\ \frac{kgf}{seg}$.

Los caballos de carga son capaces de efectuar gran trabajo y, especialmente, en el momento de arranque. Sin embargo, la potencia del caballo medio es, aproximadamente, $\dfrac{1}{2}$ caballo de vapor.

Comparando los caballos de vapor con los kilowatts, obtenemos: $1\ HP = 0.735\ kW$.

En la vida cotidiana y en la técnica nos encontramos con motores de las más diversas potencias. La potencia de un motorcito de un gramófono es de 10 W; la potencia del motor del automóvil «Volga» es de $75\ HP = 55\ kW$; la potencia de los motores del avión de pasajeros $(N\Pi)$ $IL - 18$ es de 16 000 HP. Una pequeña central eléctrica de un koljós tiene una potencia de $100\,kW$. El récord, en este sentido, lo bate la central hidroeléctrica de Krasnoyarsk, que va a tener la potencia de 5 millones de kW.

Las unidades de potencia que acabamos de conocer nos indican otra unidad más de energía, que es bien conocida en todos los sitios donde están instalados los contadores de la energía eléctrica, el kilowatt—hora. Un kilowatt—hora es el trabajo realizado en una hora por una potencia de un kilowatt. Es fácil comparar esta nueva unidad con las ya conocidas: $1\ kW - hora = 3.6 \cdot 10^6\ joules = 861\,kcal = 367\ 000\ kgf$. El lector puede hacerse la pregunta: ¿es que hacía falta una unidad más de energía? ¡ Pues, no hay ya pocas! Pero el concepto de energía penetra en diferentes ramas de la física y, preocupándose de las comodidades de la rama dada, los físicos introdujeron nuevas y nuevas unidades de energía. Esto condujo por fin, a la necesidad de introducir una unidad de energía que fuese única para todas las ramas de la física, lo cual se hizo en el nuevo sistema de unidades SI (véase la pág. 6). Sin embargo, pasará todavía mucho tiempo hasta que las unidades «viejas» cedan su lugar a la feliz unidad elegida y, por eso, mientras tanto, el kilowatt—hora no es todavía la última unidad de energía que tendremos que conocer en el proceso del estudio de la física.

Rendimiento

Con ayuda de diversas máquinas se puede obligar a los manantiales de energía a realizar diferentes trabajos: levantar pesos, mover tornos, transportar cargas y gente.

Se puede calcular la cantidad de energía invertida en la máquina y el valor del trabajo obtenido por ella. En todos estos casos, el número que sale, siempre resulta menor que el que se ha introducido; parte de la energía se pierde en la máquina.

La parte de la energía que se aprovecha completamente para los fines necesarios, se llama rendimiento de la máquina. Los valores del rendimiento se indican generalmente en tantos por ciento.

Si el rendimiento es igual a 90 %, esto significa que la máquina pierde solamente el 10 % de la energía. El rendimiento 10 %, indica que la máquina solamente aprovecha el 10 % de la energía que ingresa en ella.

Si la máquina convierte la energía mecánica en trabajo, en principio, su rendimiento se puede hacer muy grande. En este caso, se alcanza un aumento del rendimiento, llevando una lucha contra el inevitable rozamiento. Mejorar el lubricante, introducir cojinetes más perfectos, disminuir la resistencia del medio en el que se efectúa el movimiento, he aquí los métodos para aproximar el rendimiento a la unidad (al 100 %).

Generalmente, al transformar la energía mecánica en trabajo, se emplea la transmisión eléctrica como etapa intermediaria (así sucede en las centrales hidroeléctricas).

Naturalmente, esto está ligado también con unas pérdidas complementarias. Sin embargo, éstas no son muy grandes, y en el caso del empleo de la transmisión eléctrica, las pérdidas en la transformación de la energía mecánica en trabajo también pueden reducirse a algunos tantos por ciento.

Otra cosa ocurre en los casos en que la máquina aprovecha la energía química de la substancia.

Todavía no existen máquinas que trabajen en gran escala y que conviertan directamente la energía del combustible en energía mecánica o eléctrica. Por eso, es inevitable una etapa intermediaria de transformación de la energía química en energía térmica. Para obtener trabajo de la substancia combustible, hay que quemar ésta y crear alta temperatura en el horno.

La máquina térmica trabaja a causa de la diferencia de temperaturas entre el horno y el medio de alrededor. Ella recoge una parte del flujo de la energía térmica y la convierte en trabajo. Pero solamente una parte, y de ningún modo todo el flujo.

Si la diferencia de temperaturas no es muy grande, se consigue conducir hacia un lado una corriente pequeña de energía; sin embargo, con el manantial de energía a la temperatura del medio ambiente, substraerle calor es absolutamente imposible. Si la diferencia de temperaturas es muy grande, se puede convertir en trabajo una parte considerablemente mayor del flujo térmico.

Cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre el manantial del flujo de calor y el medio que le rodea, mayor será el éxito con que se irá realizando el aprovechamiento útil de la energía térmica.

Esta diferencia de temperaturas limita las posibilidades de perfeccionamiento de la máquina térmica. Incluso liquidando todas las pérdidas en la máquina, creando cojinetes ideales, utilizando materiales aislantes y conductores térmicos ideales, no existentes en la naturaleza. El rendimiento, a pesar de todo, no será igual a la unidad, sino que alcanzará solamente cierto valor máximo. Este valor límite del rendimiento, obtenido al transformar en trabajo el flujo del calor que va de un cuerpo caliente de temperatura T_1 hacia un medio de temperatura T_0, es igual a

$$1 - \frac{T_0}{T_1}.$$

Así, pues, si el manantial del flujo calorífico tiene la temperatura de 100 °C y el medio tiene 20 °C, el rendimiento máximo será igual a $1 - \frac{293}{373}$, es decir, cerca del 20 %. Para la temperatura del manantial de 1000 °C, obtenemos ya el 76 %. Claro, hay que procurar quemar el combustible de modo que se alcance la temperatura más alta posible.

De lo dicho se desprende lo desventajoso que es utilizar el flujo calorífico para la producción de trabajo mecánico. En las mejores turbinas modernas de gas (véase la pág. 303) se consigue alcanzar solamente un rendimiento de cerca del 45 %. Sería mejor aprender a transformar directamente la energía química en trabajo mecánico, sin recurrir a la energía térmica. Ya sabemos que, en principio, en tal transformación directa se podrían evitar pérdidas de energía. Sin embargo, como ya se advirtió, la técnica todavía no ha resuelto este problema.

Manantiales de energía en la Tierra

No todos los manantiales de energía son equivalentes. Solamente algunos de ellos tienen interés práctico, mientras que otros están ligados a la existencia de la civilización. Unos manantiales son prácticamente inagotables, a otros les llegará su fin en los siglos próximos o, puede ser, en los decenios próximos.

Ya hace unos cuantos miles de millones de años que manda a la Tierra sus rayos vitales el tutor principal de nuestro sistema planetario, el Sol. Se puede decir, sin miedo, que este manantial de energía es inagotable. Cada metro cuadrado de la superficie terrestre recibe del Sol una energía de una potencia media de 1.5 kW; esto supone al año, cerca de 10 millones de kilocalorías de energía; esta cantidad de calor la dan cientos de kilogramos de carbón. ¿Cuánto calor recibe del Sol todo el globo terrestre? Calculando la superficie de la Tierra y teniendo en cuenta que no es uniforme la iluminación de la superficie terrestre por los rayos solares, obtenemos cerca de 10^{14} kW. Esto es 100 mil veces más que toda la energía que se obtiene de todos los manantiales de energía de la Tierra: fábricas, centrales eléctricas, motores de automóviles y de aviación; o más abreviadamente, es 100 mil veces más que la potencia de la energía que consume toda la población del globo terrestre (que es alrededor de mil millones de kilowatts).

Sin embargo, a pesar de los numerosos proyectos, el aprovechamiento de la energía solar es insignificante. En efecto, el cálculo nos ha proporcionado un número enorme; pero esto es la cantidad de energía que cae sobre todos los lugares de la superficie terrestre: sobre las pendientes de las montañas inaccesibles, sobre la superficie de los océanos, que ocupa la mayor parte de la superficie terrestre, sobre las arenas de los desiertos despoblados.

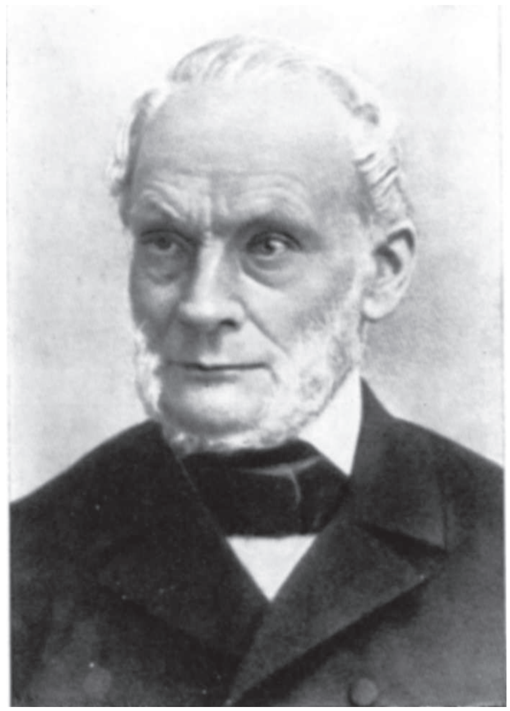
Además, no es tan grande la cantidad de energía que corresponde a una pequeña área. Por otra parte, no tiene sentido crear receptores de energía que se extiendan a unos cuantos kilómetros cuadrados. Por fin, es evidente la conveniencia de dedicarse a la transformación en calor de la energía solar en aquellos lugares donde hay muchos días de sol.

En los últimos tiempos ha crecido un poco el interés por el aprovechamiento directo de la energía del Sol, en vista de las posibilidades que se han creado para transformar directamente la energía solar en electricidad. Esta posibilidad, naturalmente, es muy atractiva. Sin embargo, hasta ahora se ha realizado en un grado muy insignificante.

Hace poco, relativamente, se ha descubierto un acumulador de energía solar que se halla encima de nuestras cabezas, en las capas superiores de la atmósfera. Resulta que, a causa de la acción de la radiación solar, a la altura de $150 - 200\ km$ sobre la superficie terrestre, el oxígeno se encuentra en estado de disociación, es decir, sus moléculas están divididas en átomos. Al unirse estos átomos en moléculas de oxígeno, se podrían desprender $118\ \frac{kcal}{mol}$ de energía. ¿Cuáles son las reservas generales de esta energía? En una capa de $50\ km$ de espesor, a la altura indicada, hay reservadas $10^{13}\ kcal$; esto es tanto, cuanto se libra en la combustión total de unos cuantos millones de toneladas de carbón. En la URSS, tal cantidad de carbón se extrae durante unos cuantos días. Aunque la energía del oxígeno disociado a grandes alturas se renueva continuamente, aquí nos encontramos también con el problema de pequeña concentración: no es tan fácil inventar un artificio para el aprovechamiento práctico de esta energía.

Volvamos al estudio de los manantiales de energía. Las masas de aire de la atmósfera terrestre se encuentran en movimiento continuo. Los ciclones, las tempestades, los vientos alisios que soplan constantemente, las brisas ligeras, todo esto son manifestaciones diversas de la energía de las corrientes de aire. La energía del viento se utilizaba para el movimiento de los barcos de vela y, ya en los tiempos antiguos, para los molinos de viento. La potencia total media anual de las corrientes de aire de toda la Tierra es igual, ni más ni menos, que a 100 mil millones de kW.

Sin embargo, no se pueden tener muchas esperanzas en el viento como manantial de energía. Este manantial, no sólo no es seguro — ¡cuántas desgracias y desilusiones dieron lugar las calmas del viento en la época de los barcos de vela!— sino que posee también el mismo defecto que la energía solar: la cantidad de energía que se desprende en cada unidad de superficie es relativamente pequeña. Si para la producción de energía en escala fabril se construyese una turbina de viento, sus aspas tendrían que alcanzar unas dimensiones, prácticamente, irrealizables. La inconstancia de la fuerza del viento es un defecto no menos esencial. Por eso, la energía del viento o, como poéticamente la suelen llamar, el carbón azul, se emplea solamente en los motores pequeños, en los «molinillos». Cuando hay viento, éstos producen energía eléctrica para las máquinas agrícolas, iluminan las casas. Si se forma un exceso de energía, éste se reserva en los acumuladores (así se llaman los depósitos de la energía eléctrica). Estos excesos se pueden utilizar cuando hay calma. Claro, no hay que confiarse en el «molinillo», pues éste solamente puede jugar el papel de un motor auxiliar.



RUDOLF CLAUSIUS (1822–1888)*: célebre físico teórico alemán. Clausius enunció por primera vez con claridad el segundo principio de la termodinámica: en el año* 1850*, en forma del principio de la imposibilidad de transmisión espontánea del calor de un cuerpo más frío a uno más caliente, y en el año 1865, mediante el concepto de entropía que él mismo introdujo. Fue uno de los primeros que se dedicó a las cuestiones sobre la capacidad térmica de los gases poliatómicos y la conductividad térmica de los gases. Sus trabajos sobre la teoría cinética de los gases facilitaron el desarrollo de las ideas estadísticas sobre los procesos físicos. A él le pertenece una serie de interesantes trabajos sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos.*

El agua en movimiento también representa un manantial gratuito de energía, como la marea de los océanos que avanza continuamente hacia la tierra y las corrientes de las aguas fluviales que se vierten en los mares y océanos.

La potencia de todos los ríos del globo terrestre se mide en miles de millones de kilowatts; sin embargo, solamente se aprovechan 40 millones de kilowatts aproximadamente, o sea, por ahora, el 1 %. La potencia de los ríos de la URSS alcanza 400 millones de kilowatts, y de ellos se aprovechan, por ahora, cerca de 20 millones de kilowatts.

Si nos privásemos del carbón, del petróleo y de otros manantiales de energía y aprovecháramos solamente el carbón blanco, o sea, la energía de los ríos, incluso aprovechando totalmente esta energía (suponiendo que se hubiesen construido todas las centrales hidroeléctricas posibles en todos los ríos del globo terrestre), tendríamos que disminuir el consumo de energía en la Tierra. Actualmente, el gasto de energía en el globo terrestre es mayor de mil millones de kilowatts; consumiendo solamente energía hidráulica, casi no se abastecería ahora ya a toda la humanidad.

¿Y la marea? Su energía es considerable, a pesar de que es, aproximadamente, diez veces menor que la energía de los ríos. Pero, por ahora, solamente se aprovecha esta energía en un grado muy insignificante, puesto que las pulsaciones de las mareas dificultan su aplicación. A pesar de esto, los ingenieros soviéticos y franceses hallaron unos métodos prácticos que permitieron vencer esta dificultad. Actualmente, la central eléctrica de marea, en las horas de mayor consumo, asegura el abastecimiento de una potencia garantizada. En Francia está ya construida y se encuentra trabajando, una central eléctrica experimental que utiliza la marea en Saint Malo, y en la URSS se está construyendo una central en Kíslaya Gubá, en el distrito de Múrmansk. Esta última servirá de experimento para la construcción de otras más potentes, proyectadas en los golfos Lumbovski y Mezen, en el Mar Blanco.

El agua de los océanos, a grandes profundidades, tiene una temperatura que se diferencia de la temperatura de las capas superficiales en $10 - 20\ ^{o}C$. Por consiguiente, se puede construir una máquina térmica, cuyo calentador, en las latitudes medias, sea la capa superior del agua y cuyo refrigerador sean las capas profundas. El rendimiento de tal máquina será de $1 - 2\,\%$. Pero, está claro, que esto también es un manantial de energía muy poco concentrado.

El Sol, el aire y el agua son manantiales gratuitos de energía[16].

Son gratuitos en el sentido de que el aprovechamiento de su energía no conduce a la disminución de ninguna de las riquezas terrestres. El trabajo de los molinillos de viento no disminuye la cantidad de aire en el globo terrestre, el trabajo de las centrales hidroeléctricas no disminuye el caudal de los ríos, el trabajo de las máquinas solares no utiliza las reservas de las substancias terrestres.

En este sentido, los manantiales de energía descritos hasta ahora tienen grandes ventajas en comparación con los de combustible. El combustible se quema. El aprovechamiento de la energía del carbón de piedra, del petróleo, de la madera, representa una destrucción irreversible de las riquezas terrestres. Sería muy atractivo realizar un motor fotoquímico, es decir, obtener energía mediante un mecanismo de fotosíntesis que garantizara la acumulación de la energía del combustible. La hoja verde de cualquier planta representa una fábrica que, gracias a la energía de los rayos solares, elabora substancias orgánicas de las moléculas de agua y de gas carbónico, con grandes reservas de energía en las moléculas. Este proceso en las plantas tiene un pequeño rendimiento ($\sim 1\,\%$), pero la energía anual acumulada por ellas es igual a $2 \cdot 10^{15}\ kW - hora$, es decir, supera en cientos de veces la elaboración anual de energía de todas las centrales eléctricas del mundo. El mecanismo de la fotosíntesis todavía no se ha descifrado del todo, pero no hay duda de que en el futuro, no sólo se conseguirá realizar la fotosíntesis en condiciones artificiales, sino aumentar su rendimiento. Sin embargo, por ahora, el hombre no puede competir con la naturaleza en este terreno y está obligado a aprovecharse de sus riquezas quemando la madera, el petróleo, el carbón.

¿Cuáles son las reservas de combustible en el globo terrestre? El carbón y el petróleo son combustibles ordinarios, o sea, que arden inmediatamente al prenderles fuego. Sus

[16] Claro que el Sol no se puede poner en un mismo plano con los otros manantiales de energía. Al fin y al cabo, toda la energía se toma del Sol.

reservas en el globo terrestre son extremadamente pequeñas. Consumiendo el petróleo al ritmo actual, las reservas descubiertas se acabarán a comienzos del siguiente milenio. Las reservas del carbón de piedra son un poco mayores. La cantidad de carbón que hay en la Tierra se calcula en diez billones de toneladas. Un kilogramo de carbón, al quemarse, da 7000 *kcal* de calor. De este modo, las reservas energéticas generales de carbón se calculan en unas 10^{20} *kcal*. Esto es mil veces más que el consumo anual de energía.

Hay que reconocer que las reservas de energía para mil años son muy pequeñas. Mil años representa mucho, solamente si este tiempo se compara con la duración de la vida humana; pero la vida humana es un instante insignificante en comparación con la vida del globo terrestre y con el tiempo de existencia del mundo civilizado. Además, el consumo de energía por persona crece continuamente. Por eso, si las reservas de combustible se redujesen al petróleo y al carbón, se podría considerar que, en lo que se refiere a las reservas de energía, el estado de las cosas en la Tierra es catastrófico.

A comienzos de los años cuarenta de nuestro siglo fue demostrada la posibilidad del empleo práctico de un combustible completamente nuevo, llamado nuclear. Nosotros disponemos de reservas considerables de combustible nuclear.

No es sitio apropiado éste para detenernos en el estudio de la estructura del átomo y de su corazón, el núcleo atómico, y en el modo de extraer la energía interna de los núcleos atómicos. La liberación de energía nuclear solamente se puede realizar en gran escala, en las llamadas centrales nucleó—eléctricas. La energía nuclear se libra en forma de calor y se aprovecha exactamente igual que en las centrales eléctricas que funcionan con carbón de piedra.

Actualmente se puede librar energía en cantidades industriales de dos elementos, del uranio y del torio. Una particularidad del combustible nuclear, que representa su cualidad principal, es su concentración extraordinaria de energía. Un kilogramo de combustible nuclear proporciona 2.5 millones de veces más energía que un kilogramo de carbón de piedra. Por eso, a pesar de que estos elementos están relativamente muy poco difundidos, sus reservas en el globo terrestre, expresadas en energía, son bastante considerables. Los cálculos aproximados muestran que las reservas de combustible nuclear son considerablemente mayores que las de carbón de piedra. Sin embargo, la incorporación del uranio y del torio al combustible no resuelve el problema de principio de liberación de la humanidad del hambre de energía, pues las reservas de estos minerales en la corteza terrestre son limitadas.

Pero ya ahora se puede indicar un manantial verdaderamente ilimitado de energía. Se trata de las llamadas reacciones termonucleares. Éstas son posibles solamente a temperaturas superaltas, del orden de unos veinte millones de grados. Esta temperatura solamente se alcanza actualmente en las explosiones atómicas.

Ahora, ente los sabios se presenta el problema de obtención de altas temperaturas con métodos no explosivos, y las primeras pruebas que se hicieron para alcanzar temperaturas de un millón de grados tuvieron éxito.

Si los físicos consiguen trabajar con temperaturas suficientemente altas, de decenas de millones de grados, obtenidas sin explosiones, la reacción dirigida de fusión de los núcleos atómicos de hidrógeno (ésta se llama termonuclear) será posible. En esta reacción se librará una energía inmensa de cada kilogramo de combustible. Para asegurar ahora de energía a la humanidad durante un año, es suficiente librar energía termonuclear, elaborando decenas de millones de toneladas de agua.

En el océano mundial hay tanta reserva de energía termonuclear, que es suficiente para cubrir todas las necesidades energéticas de la humanidad durante un intervalo de tiempo superior a la edad del sistema solar. He aquí, pues, un verdadero e ilimitado manantial de energía.

Motores

El hombre que vive en el siglo XX está acostumbrado a utilizar diversos motores que realizan un trabajo inmenso, que facilitan el trabajo, que decuplican sus fuerzas.

Hasta en nuestros tiempos, en muchos países se emplean los molinos de viento en la agricultura. Este sencillo motor, que emplea la energía del viento, sirve al hombre ya durante muchos siglos. Las aspas de este motor son planas. Están colocadas de tal modo, que forman cierto ángulo con la dirección del viento. La corriente de aire que llega, chocando con las aspas que están situadas radialmente en la llanta, hace girar a la rueda.

Está claro que el molino de viento se puede invertir: si algún motor le hace girar, sus aspas arrojarán un potente chorro de aire a lo largo del eje de rotación. Estableciendo tal sistema en una lancha motora «Glisser», en un avión o en un helicóptero, lo llamamos hélice aérea. La reacción del chorro arrojado por la hélice empuja a la lancha motora «Glisser» o al avión y crea una fuerza ascensional en el helicóptero.

Probablemente, el primer motor que empleó el hombre para sus necesidades, fue la turbina de agua (hidráulica) en su modificación más primitiva, en forma de una rueda hidráulica.

La Fig. 133 representa la llamada rueda hidráulica de paletas. El chorro de agua, chocando contra la paleta de la rueda sumergida en el agua, le cede a aquélla parte de su energía cinética. La paleta se pone en movimiento. Como la paleta está rígidamente ligada con la rueda, ésta se pone a girar. Pero, inmediatamente se ve que, en cada momento, perpendicularmente al flujo sólo puede haber colocada una paleta. Las demás formarán ángulos agudos con los chorros de agua, recogiendo de ellos menos energía que la paleta perpendicular. El rendimiento de esta rueda no es muy grande. El camino para conseguir su elevación es evidente.

Hay que hacer que todas las paletas se mantengan perpendiculares al flujo del agua. Esta idea se puede analizar con ayuda de un aparato director. De la Fig. 134 queda claro que, en este caso, para que la turbina trabaje con éxito es necesario la existencia de una diferencia de niveles de agua. Aquí nos encontramos con el esquema de una central hidroeléctrica moderna, cuya potente presa hace que las masas de agua se lancen con una fuerza inmensa contra las paletas de la turbina. Construidas con un alto nivel artístico de ingeniería moderna, las turbinas hidráulicas se proyectan para una potencia superior a 100 000 kW y tienen un rendimiento de 95 %.

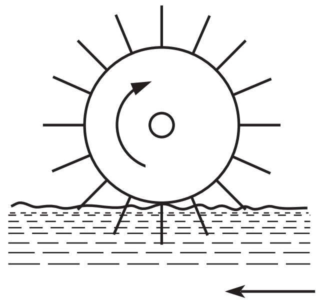


Fig. 133

Como estas potencias se crean con rotaciones bastante pequeñas (de unas 100 revoluciones por minuto), las turbinas hidráulicas que se construyen actualmente son asombrosas por sus dimensiones y su peso. Así, por ejemplo, la rueda motriz de la turbina de la central hidroeléctrica del Volga que lleva el nombre de Lenin, tiene cerca de 10 m de altura y pesa 420 Tm.

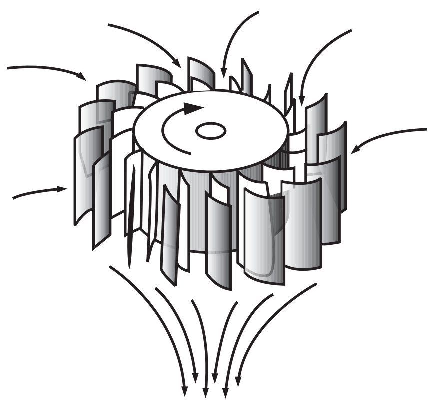


Fig. 134

Una ventaja importante de la turbina es la extraordinaria simpleza con que se transforma el movimiento de caída del agua en movimiento de rotación. Por eso, este principio se aplica ampliamente en los motores, cuyo aspecto exterior no se parece en nada a las ruedas hidráulicas. Cuando sobre las paletas presiona el vapor, tenemos una turbina de vapor. Ya sabemos, que para aumentar el rendimiento es necesario elevar la temperatura del cuerpo de trabajo. En las turbinas de las centrales termoeléctricas modernas el vapor tiene una temperatura de 580 ^oC y una presión de 240 atm. El límite teórico del rendimiento de tal turbina, si se supone que el refrigerador tiene una temperatura de 20 ^oC, es igual a 66 %. En la práctica se consigue un rendimiento de 42 %. Por lo tanto, las turbinas de vapor son buenos motores modernos. Tienen una potencia de 300 000 kW en cada planta. Tal turbina consume más de 900 Tm por hora de vapor de alta presión. Es evidente que la obtención de semejantes cantidades de vapor representa un problema técnico complicado. Las calderas de vapor de alta presión y el sistema de preparación y entrada del combustible ocupan la mayor parte del volumen de una central termo eléctrica moderna. Por eso, para el transporte, las turbinas de vapor se emplean solamente en los barcos grandes, llamados de turbina.

En los últimos años ha empezado a aparecer en la prensa la palabra «turboeléctrico». El sentido de esta denominación se aclara sencillamente: en tal barco, el vapor pone en movimiento a las turbinas, éstas, a su vez, ponen en movimiento a potentes generadores de corriente continua, y las hélices están colocadas en los árboles de los motores eléctricos. ¿No es superflua esta complicación? ¿Por qué no colocar la hélice directamente en el árbol de la turbina? Aquí nos encontramos con una nueva cuestión, con la característica de tracción del motor.

La cuestión es que la turbina de vapor desarrolla la potencia máxima solamente a unas vueltas rigurosamente determinadas. Así, las potentes turbinas de nuestras centrales eléctricas hacen 3000 vueltas por minuto. Retardando la rotación, disminuye la potencia. Claro que, si las hélices estuviesen directamente en el árbol de la turbina, el barco provisto de esta instalación motriz poseería una marcha moderada. En cuanto al motor eléctrico de corriente continua, éste posee una característica de tracción ideal: cuanto mayor sea la resistencia, tanto mayor será el esfuerzo de tracción que desarrolla y, además, este motor puede proporcionar mayor potencia, con pequeñas vueltas, en el momento de arranque.

Por lo tanto, el generador y el motor de corriente continua, situados entre la turbina y la hélice del barco turboeléctrico, juegan el papel de caja automática de velocidades de alta perfección sin escalones. Se puede creer que tal sistema es muy voluminoso, pero con las grandes potencias de los barcos turboeléctricos cualquier otro sería tan voluminoso, pero de menos seguridad.

Se puede de otro modo perfeccionar considerablemente la instalación de fuerza del barco turboeléctrico: es muy conveniente sustituir las enormes calderas de vapor por el reactor atómico. En este caso se consigue una economía enorme en el volumen del combustible que hay que llevar en el viaje.

Ha alcanzado fama mundial el primer rompehielos atómico soviético «Lenin». La potencia de sus motores es igual a 44 000 HP, su desplazamiento es igual a 16 000 Tm. La instalación motriz nuclear de este barco turboeléctrico garantiza una autonomía de navegación para más de un año.

Así pues, para la turbina de vapor se necesita un potente manantial de fluido de calor. Pero, ya sea el fogón de la caldera de vapor, ya el reactor de uranio, con el nivel actual de desarrollo de la técnica, éstos manantiales tienen unas dimensiones y un peso tan considerables, que resulta completamente irracional la instalación de una turbina de vapor en el automóvil o en el avión; sería demasiado grande el peso total del motor y del calentador por cada caballo de vapor. ¿No se podría prescindir del calentador extraño y trasladado al interior de la turbina?

Tal instalación ya está construida y tiene mucho uso. Ésta es la turbina de gas. En ella sirven directamente de cuerpo de trabajo los productos candentes de la combustión de un combustible de alto poder calorífico. Esto determina las ventajas importantes de la turbina de gas ante la de vapor y las grandes dificultades técnicas para garantizar que su trabajo sea seguro.

Las ventajas son evidentes: la cámara de combustión para quemar el combustible tiene pequeñas dimensiones y se puede colocar por debajo de la capota de la turbina, y los productos de la combustión de la mezcla carburante, compuesta, por ejemplo, de petróleo pulverizado y oxígeno, tienen una temperatura inaccesible para el vapor. El flujo calorífico que se forma en la cámara de combustión de la turbina de gas es muy intenso, lo que permite obtener un alto rendimiento.

Pero estas ventajas acarrean también inconvenientes. Las paletas de acero de la turbina trabajan en chorros de gas que tienen temperaturas hasta de 1200 $^{\circ}C$ y que están, inevitablemente, saturados de partículas microscópicas de ceniza. Es fácil figurarse las cualidades que deben tener los materiales con que se construyen las turbinas de gas. Al hacer la prueba de construir una turbina de gas de cerca de 200 HP para un automóvil de lujo, habría que enfrentarse ya con unas dificultades singulares: la turbina resultaría de unas dimensiones tan pequeñas, que no servirían para nada las soluciones de ingeniería ordinarias ni los materiales de costumbre. Sin embargo, las dificultades técnicas ya se están superando. Están en prueba los primeros automóviles experimentales con turbinas de gas.

Resultó ser más fácil emplear la turbina de gas en el transporte ferroviario. Las locomotoras con turbinas de gas, ya han obtenido derecho de ciudadanía.

Pero un camino más amplio para la turbina de gas lo marcaron otros motores diferentes, en los que aquélla, aunque necesaria, es subordinada. Se trata del motor turborreactor, que es actualmente el principal tipo de motor en la aviación de reacción.

El principio del motor de reacción es extremadamente simple. En una resistente cámara de combustión se quema la mezcla combustible; los productos de la combustión, que llevan una velocidad extraordinariamente grande (de 3000 $\frac{m}{seg}$ al quemar hidrógeno en oxígeno y un poco menor para otras especies de combustible), se expelen por una tobera que suavemente se amplifica hacia el lado opuesto al movimiento. Con tales velocidades, incluso cantidades relativamente pequeñas de productos de la combustión, dan un gran impulso desde el motor.

Con la creación de los motores de reacción, los hombres han obtenido la posibilidad real de efectuar vuelos interplanetarios.

Se han difundido mucho los motores–cohetes de combustible líquido. En la cámara de combustión de tal motor se inyecta unas porciones determinadas de combustible (por ejemplo, alcohol etílico) y de oxidante (generalmente oxígeno líquido). La mezcla se quema originando la propulsión. En los cohetes de gran altura, del tipo $V-2$, la propulsión es de unas 15 Tm. En el cohete se cargan 8.5 Tm de combustible y oxidante, que se queman en 1.5 minutos. Estos números son suficientemente significativos. Los motores–cohetes de combustible líquido son convenientes solamente para los vuelos a grandes alturas o fuera de los límites de la atmósfera terrestre. No tiene sentido cargar de grandes cantidades de oxidante especial un avión destinado para vuelos en las capas inferiores de la atmósfera a alturas menores de 20 km, donde hay suficiente cantidad de oxígeno. Pero, entonces, surge el problema de suministrar inmensas cantidades de aire en la cámara de combustión, que son necesarias para que la combustión sea intensiva. Este problema se resuelve de un modo natural: parte de la energía del chorro de gas creado en la cámara de combustión se destina para la rotación de un potente compresor que empuja al aire hacia la cámara.

Ya hemos dicho con qué motor se puede realizar trabajo utilizando la energía del chorro de los gases candentes: es, naturalmente, la turbina de gas. Todo este sistema se denomina motor turborreactor (Fig. 135). Éste no tiene competidor en los vuelos a velocidades de 800 hasta 1200 $\frac{km}{hora}$.

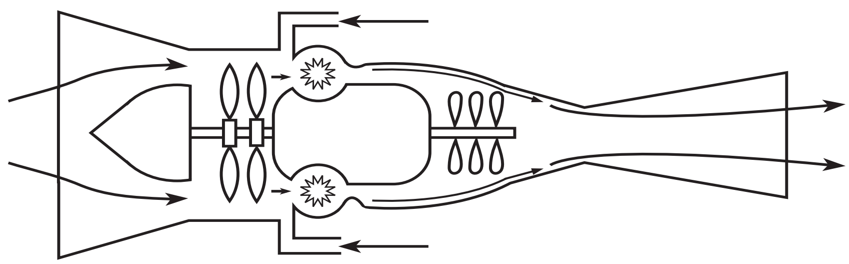


Fig. 135

Para realizar vuelos a grandes distancias con velocidades de 600−800 $\frac{km}{hora}$ en el árbol del motor turborreactor se establece complementariamente una hélice ordinaria de aviación. Éste es el motor de turbohélice.

Con velocidades de alrededor de 2000 $\frac{km}{hora}$ o mayores, el empuje del aire que corta el avión es tan potente, que ya no se necesita compresor. Entonces, naturalmente, no es ya tampoco necesaria la turbina de gas. El motor se convierte en un tubo de sección variable, en un lugar rigurosamente determinado del cual se efectúa la combustión del combustible. Éste es un motor pulsorreactor de efecto único. Está claro que este motor no puede levantar al avión de la tierra, solamente puede trabajar a velocidades muy grandes de vuelo.

Para volar a pequeñas velocidades, no son racionales los motores de reacción por su gran consumo de combustible.

Los motores de pistón de combustión interna, de gasolina o de Diesel, sirven bien al hombre para el movimiento por la tierra, por el agua o por el aire, a velocidades desde 0 hasta 500 $\frac{km}{hora}$. En correspondencia con su nombre, la parte principal de este motor es un cilindro, dentro del cual se desplaza un pistón. El movimiento alterno de este pistón se transforma en movimiento giratorio del eje mediante un sistema de biela–manivela (Fig. 136).

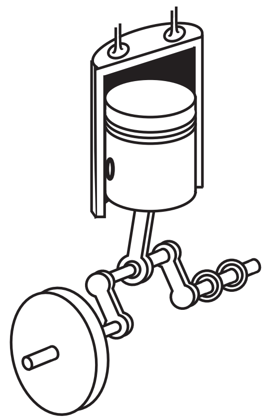


Fig. 136

El movimiento del pistón se transmite mediante la biela a la manivela, que es una parte del cigüeñal. El movimiento de la manivela es el que origina la rotación del cigüeñal. Por el contrario, si se hace girar al cigüeñal, éste obligará a que las bielas se balanceen y a que se desplacen los pistones dentro de los cilindros.

El cilindro del motor de gasolina está provisto de dos válvulas, una de las cuales está destinada para la admisión de la mezcla combustible y otra para el escape de los gases trabajados. Para que el motor comience a trabajar, hay que hacerlo girar, empleando para ello la energía de algún manantial ajeno. Supongamos que en un momento dado el pistón ha ido hacia abajo, y que la válvula de admisión está abierta. En el cilindro se introduce una mezcla de gasolina pulverizada y aire. La válvula de admisión está sincronizada con el árbol del motor, de modo que se cierra en el mismo momento en que el pistón alcanza la posición inferior extrema. Con el ulterior giro del árbol, el pistón va hacia arriba. Una transmisión automática de las válvulas las mantiene cerradas, por eso la mezcla combustible se comprime. Cuando el pistón está en la posición superior, la mezcla comprimida se inflama por una chispa eléctrica que salta entre los electrodos de la bujía. La mezcla se inflama; los productos de la combustión, que se expanden, trabajan, empujando con fuerza al pistón hacia abajo. El árbol del motor recibe un potente empuje; el volante, situado en el árbol acumula una energía cinética considerable. A cuenta de esta energía se efectúan los tres tiempos auxiliares siguientes: primero, el escape, cuando está abierta la válvula de escape y el pistón, va hacia arriba empujando a los gases trabajados del cilindro; después, las carreras ya conocidas por nosotros de admisión y compresión y, por fin, una nueva inflamación. El motor comienza a trabajar.

Los motores de gasolina tienen una potencia que varía desde unas fracciones de caballo de vapor hasta 4000 HP, su rendimiento es hasta de 40 %; el peso, por cada caballo de vapor, es hasta de 300 g. Estos exponentes tan buenos explican su amplio empleo en los automóviles y en los aviones.

¿De qué modo se podría elevar el rendimiento del motor de gasolina? El procedimiento principal es el aumento del grado de compresión, pues, para todos los motores térmicos de transporte, el aire del ambiente sirve de frigorífico. Por eso, solamente se puede aumentar el rendimiento elevando la temperatura de la mezcla de trabajo y, para esto, hay que comprimir más la mezcla antes de la inflamación. Pero, en este caso se crea una complicación seria: la mezcla, fuertemente comprimida, es detonante (véase la pág. 288). La carrera de trabajo adquiere el carácter de una fuerte explosión que puede estropear el motor. Hay que tomar, entonces, medidas especiales para disminuir las propiedades detonantes de la gasolina, lo que conduce a un mayor encarecimiento del combustible que no era ya, de por sí, barato (véase la pág. 288).

Los problemas del aumento de la temperatura en la carrera de trabajo, de eliminación de la detonación y del abaratamiento del combustible, se han resuelto con éxito en el motor Diesel.

La construcción del motor Diesel es parecida a la del de gasolina, pero utiliza productos más baratos de la destilación del petróleo y de calidad inferior a la gasolina. El ciclo comienza con la aspiración en el cilindro de aire limpio. Después, el pistón comprime el aire hasta 20 *atm*, aproximadamente. Sería muy difícil conseguir una compresión tan alta haciendo girar al motor con la mano. Por eso, el Diesel, se pone en marcha con un motor especial de arranque, que es, generalmente, de gasolina o de aire comprimido.

Con una compresión fuerte, la temperatura del aire en el cilindro se eleva tanto, que es suficiente para la inflamación de la mezcla combustible. Pero, ¿cómo introducida en el cilindro, donde se ha conseguido una alta presión? Aquí no vale la válvula de admisión. Ésta se sustituye por un pulverizador que empuja al combustible hacia el cilindro por un orificio muy fino. A medida que va entrando, éste se va inflamando, con lo que se evita el peligro de detonación, que es esencial para un motor de gasolina. La eliminación del peligro de detonación permite construir barcos Diesel de poca velocidad y de muchos miles de caballos de vapor. Éstos, naturalmente, adquieren unas dimensiones muy grandes, pero son más compactos que el agregado de la caldera de vapor y la turbina. Los barcos provistos de motores Diesel, sin ninguna lógica los siguen llamando en nuestras publicaciones «vapores».

El barco, en el cual entre el Diesel y la hélice están el generador y el motor de corriente continua, se llama «barco Diesel–eléctrico». Las locomotoras Diesel, que ampliamente se introducen ahora en las vías férreas, están construidas por el mismo esquema y, por eso, se las puede llamar locomotoras «Diesel–eléctricas».

Los motores de pistón, de combustión interna, que acabamos de estudiar, han tomado sus principales elementos de construcción –el cilindro, el pistón, la obtención del movimiento de rotación mediante un mecanismo de biela–manivela– de la máquina de vapor que lentamente desaparece ya de la escena. La máquina de vapor se podría llamar «máquina de pistón de combustión externa». Precisamente esta combinación de la enorme caldera de vapor con un sistema no menos desmesurado de transformación del movimiento rectilíneo en movimiento de rotación, priva a la máquina de vapor de la posibilidad de concurrir con los motores más modernos. Para convencerse de esto, veamos el trabajo de la máquina de vapor de doble efecto.

El vapor de la caldera es admitido en la caja de distribución, dentro de la cual se desplaza el distribuidor, que es una válvula de forma especial. Mediante un sistema de palancas, el distribuidor está bloqueado con el émbolo de tal modo, que se desplaza a golpes, abriendo el paso al vapor a una y otra parte del cilindro alternativamente. De este modo, en el cilindro, en cualquier momento hay vapor de alta presión. Podría parecer que la máquina de vapor fuese mejor que el motor de gasolina, pues ésta no tiene carreras auxiliares, todas ellas son de trabajo. Pero este razonamiento superficial es absolutamente injusto.

Es menester recordar que el rendimiento satisfactorio del motor de gasolina se determina por la alta temperatura de los gases que empujan al pistón. Ya sabemos que para elevar el rendimiento de la turbina de vapor se emplea vapor de alta presión, que tiene una temperatura tal, que se ponen al rojo los conductores del vapor y las paletas. Pero las paletas de la turbina giran libremente, sin rozamiento sobre la superficie metálica... Figúrense qué dificultades tendría que vencer quien imaginara «mejorar» la máquina de vapor obligando al émbolo, al rojo, a deslizarse por el interior de un cilindro que está igualmente candente, teniendo que estar el émbolo, además, bien ajustado al cilindro para mantener una diferencia de presión de unas 600 *atm*. Si, incluso haciendo un milagro, se construyese tal máquina, su rendimiento sería, de todos modos, menor que el de una turbina en la que el vapor tuviese los mismos parámetros, ya que en esta última la rotación se efectúa con mayor facilidad y las dimensiones y el peso son mayores que las de un motor análogo de combustión interna.

Las máquinas de vapor modernas tienen un rendimiento de un 10 %. A las locomotoras que ya se han retirado de la producción, se les iba por la chimenea, sin ninguna utilidad, hasta el 95 % del combustible quemado.

Este bajo rendimiento tiene su explicación en el empeoramiento inevitable de las propiedades de la caldera de vapor que está destinada a la instalación en la locomotora, en comparación con la caldera de vapor estacionaria.

¿Por qué las máquinas de vapor tuvieron entonces durante tanto tiempo, un empleo tan grande en el transporte? Es que, además de la devoción a las soluciones habituales, jugó también un gran papel el hecho de que la máquina de vapor tenga unas características de tracción muy buenas; pues, cuanto mayor sea la fuerza con que la carga se resista al desplazamiento del émbolo, tanto mayor será la fuerza con que sobre él presionará el vapor; es decir, que el momento de rotación que desarrolla la máquina de vapor aumenta en condiciones difíciles, cosa muy importante en el transporte. Pero, naturalmente, el hecho de que en la máquina de vapor no se necesite un sistema complicado de transmisiones variables hacia los ejes de mando, no la salva, de ningún modo, de su defecto radical, que es su bajo rendimiento.

Así se explica el desplazamiento de la máquina de vapor por otros motores.

Fluctuaciones

Volvamos de nuevo al segundo principio de la termodinámica, esta grandiosa ley de la naturaleza que dirige el curso de los fenómenos naturales. Ya hemos dicho que los procesos espontáneos dan lugar al estado más probable del sistema, al aumento de la entropía. Después de que la entropía del sistema haya alcanzado el máximo, cesa la evolución ulterior del sistema y se consigue el equilibrio.

Pero el estado de equilibrio no significa, de ningún modo, reposo interno. Dentro del sistema tiene lugar un movimiento térmico intenso. Por eso, hablando estrictamente, cualquier cuerpo físico, en cada instante, «deja de ser lo que es»; la posición relativa de las moléculas en cada instante sucesivo no es la misma que en el anterior. Por lo tanto, los valores de todas las cantidades físicas se conservan «por término medio», éstas no son exactamente iguales a sus valores más probables, sino que oscilan alrededor de ellos. La elongación de los valores más probables del equilibrio se llama fluctuación. Las magnitudes de diversas fluctuaciones son extremadamente pequeñas. Cuanto mayor sea la magnitud de la fluctuación, tanto menos probable será ésta.

El valor medio de la fluctuación relativa, es decir, la parte en que puede variar la magnitud física que nos interesa, gracias a los movimientos térmicos caóticos de las moléculas, puede representarse, aproximadamente, por la expresión $\dfrac{1}{\sqrt{N}}$, donde N es el número de moléculas del cuerpo que se examina o de un trozo de él. Por lo tanto, las fluctuaciones son notables para los sistemas que están compuestos de un número pequeño de moléculas, y no se perciben en los cuerpos grandes que se componen de millones y millones de moléculas.

La fórmula $\dfrac{1}{\sqrt{N}}$ muestra que en un centímetro cúbico de gas, la densidad, la presión, la temperatura y cualesquiera otras propiedades, pueden variar en $\dfrac{1}{\sqrt{3\cdot 10^{19}}}$, o sea, aproximadamente, en los límites de 10^{-8} %. Estas fluctuaciones son demasiado pequeñas para que se las pueda observar experimentalmente.

Sin embargo, otra cosa ocurre en el volumen de un micrón. Aquí $N = 3\cdot 10^{7}$ y las fluctuaciones alcanzan magnitudes mensurables, de unas centésimas de uno por ciento.

La fluctuación representa un fenómeno «anormal», en el sentido de que ésta conduce a evoluciones de un estado más probable a otro menos probable. Durante la fluctuación, el calor pasa del cuerpo frío al caliente, se infringe la distribución uniforme de las moléculas, se crea un movimiento ordenado.

¿Puede ser que en estos rompimientos se consiga construir el motor eterno de segunda especie?

Figurémonos, por ejemplo, una turbinilla diminuta, situada en un gas enrarecido. ¿Se podría hacer de modo que esta pequeña máquina reaccionase a todas las fluctuaciones de cualquier dirección? Por ejemplo, que girase, si el número de moléculas que van hacia la derecha se hiciese mayor que el número de moléculas que van hacia la izquierda. Estos pequeños golpes se podrían sumar y, al fin y al cabo, se crearía trabajo. El principio de la imposibilidad de un motor eterno de segunda especie sería desmentido.

Pero, a pesar de todo, de principio, es imposible una construcción semejante. El estudio detallado, teniendo en cuenta que la turbinilla tiene sus fluctuaciones propias, que son tanto mayores, cuanto menores sean sus dimensiones, muestra que las fluctuaciones no pueden conducir, en general, a ningún trabajo. Aunque continuamente aparecen a nuestro alrededor nuevas alteraciones de la tendencia al equilibrio, éstas no pueden alterar la evolución inevitable de los procesos físicos hacia el lado que aumenta la probabilidad del estado, o sea, la entropía.

Entropía y evolución del universo

Los ríos fluyen hacia abajo, las piedras se desprenden de las montañas; a causa del rozamiento se interrumpe el movimiento, se paralizan todos los movimientos relativos.

Los cuerpos calientes se enfrían y los fríos se calientan; se igualan las temperaturas de todos los cuerpos del mundo. Ésta es la evolución inevitable de los sucesos en el mundo que nos rodea, desde el punto de vista de la ley del aumento de la entropía. Al parecer, todo está claro. Más, si se pone uno a pensar, se halla en esto algo incomprensible. Si la naturaleza tiende al equilibrio, entonces, cabe la pregunta, ¿por qué no se ha establecido todavía el equilibrio?

En efecto, si incluso el sistema está en un desequilibrio límite, el tiempo de su paso al estado de equilibrio (los físicos lo llaman tiempo de relajación) no puede ser infinitamente grande. El paso de nuestro universo al estado de equilibrio podría durar mucho tiempo, supongamos que, incluso muchos miles de millones de años, pero, en todo caso, el paso de cualquier estado de desequilibrio al estado de equilibrio duraría un tiempo determinado y no continuaría sin fin.

¿Por qué no llegó este equilibrio mil millones de años, o incluso millones y millones de años atrás?

Esta contradicción es muy seria. Resulta que la misma existencia de nuestro mundo, como nosotros lo observamos, se encuentra en contradicción irreconciliable con las leyes que conocemos de la física.

¿Se podría salir del apuro, suponiendo que todo nuestro universo representa una fluctuación gigante? El mundo es infinito en el tiempo y en el espacio. A veces allí, a veces aquí, aparecen fluctuaciones: las moléculas se unen, su movimiento se ordena, se crea, por ejemplo, un sistema planetario semejante al nuestro. Después de esto, la fluctuación se disipa, desaparece, pero en su lugar se crea en otra parte del mundo otra fluctuación.

Sin embargo, por muy seductora que fuese una hipótesis semejante, ésta no resistiría la crítica más elemental. Ya vimos, que la condensación espontánea de las moléculas en una de las mitades de un recipiente, de un centímetro cúbico de dimensión, es uno de los casos entre un número colosal de ellos. ¿Qué se puede decir, entonces, de la fluctuación que ha creado al universo que vemos?

Está claro que esta explicación no es válida. Creer en su justeza sería mucho más inocente que creer en las afirmaciones del ladrón, que jura que no os ha sacado el monedero del bolsillo, sino que la fluctuación de las moléculas ha dado lugar al paso del monedero de vuestro bolsillo a su mano. Sin embargo, tal fluctuación es un número inconcebiblemente de veces más probable que la fluctuación en la escala del universo, sobre lo cual se trata aquí.

Se podría intentar hacer una objeción del modo siguiente. Supongamos que es extremadamente pequeña la probabilidad de una gigante fluctuación de las dimensiones del universo, pero esto no nos debe de asombrar. Yo, que soy una persona que está discutiendo esta cuestión, también soy una consecuencia de la fluctuación. Mi existencia representa un suceso completamente improbable, y sobre lo probable e improbable tengo que juzgar yo con relación a mi mismo.

Y no hay más remedio que rechazar esta objeción.

Para nuestra existencia es más que suficiente el sistema solar, y nosotros vemos un mundo desequilibrado en una escala en la cual nuestro sistema solar representa una partícula diminuta.

Ya ahora, sirviéndose de telescopios, los astrónomos han penetrado en la profundidad del universo a unas distancias que son $10^{12} - 10^{13}$ veces mayores que la dimensión del sistema solar. Si el universo es una fluctuación, esto significa que nosotros observamos unos estados de desequilibrio que superan a las dimensiones que se necesitan para nuestra vida, por lo menos en 10^{12} veces. Por eso, nuestra existencia, no justifica en grado alguno la inconcebiblemente pequeña probabilidad de la fluctuación que ha conducido a la formación del universo en la forma actual.

Por lo tanto, la contradicción se mantiene latente. Esto indica, que las ideas fundamentales sobre el espacio y el tiempo, y también las leyes principales, que hasta ahora suponíamos indudables, no son buenas del todo. Hay que hacer correcciones en algún sitio en los mismos fundamentos de la ciencia.

Por segunda vez nos encontramos con unos defectos de principio de nuestra mecánica. Sin embargo, ahora hemos hallado en ella un defecto nuevo, que no está ligado a la revisión de los conceptos que habíamos indicado cuando estudiábamos las propiedades extrañas del helio líquido. Allí se trataba de que las leyes de la mecánica vieja no eran aplicables a las partículas microscópicas. Ahora observamos defectos en el fundamento de nuestros conocimientos, queriendo aplicarlo a todo el universo.

Resulta que nuestra mecánica es inservible, tanto para lo que es muy pequeño, como para lo que es muy grande.

Tenemos esperanzas de encontrarnos con el lector en el futuro y tratar sobre las correcciones que es necesario hacer en los enunciados anteriores de las leyes de la naturaleza para que se puedan aplicar, en unos casos, al mundo microscópico y, en otros, a todo el universo.

Física Para Todos se terminó de imprimir en el
mes de noviembre de 2007, en los talleres de la
Universidad Autónoma de la Ciudad de México,
con un tiraje de 2000 ejemplares.

FÍSICA PARA TODOS

Lev Davidovich Landau, alguna vez llamado "el otro Einstein," fue sin duda el físico más destacado de la era soviética, y uno de los más importantes a nivel mundial de todo el siglo veinte. Realizó importantes aportes en diversos campos de la física: la teoría de la matriz de densidad, la física de neutrinos, la superconductividad, la teoría de transiciones de segundo orden y la explicación de las propiedades superfluidas del helio líquido entre otros; fue por esta última contribución que recibío el Premio Nobel de física en 1962.

En Física para Todos, escrito en colaboración con el también físico y divulgador de la ciencia A. Kitaigorodski, Landau consigue un texto accesible para estudiantes de nivel secundaria, pero que resulta de provecho para estudiantes de nivel superior y profesionistas de diversas áreas. Ni mera divulgación, ni libro de texto, Física para Todos conjuga profundidad con simplicidad, rigor con claridad de exposición, pasando de la explicación de fenómenos cotidianos a aplicaciones tecnológicas relevantes y temas que aún hoy son considerados de frontera. Por ello no dudamos en calificarlo de un clásico poco conocido, pero imprescindible en la biblioteca de todo estudiante universitario.

Biblioteca del Estudiante

ISBN 968572089-4