

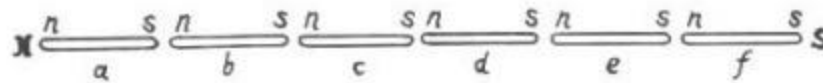
Capítulo Sexto VARIAS

197. Partición de un imán.

Una varilla imantada se divide en fragmentos pequeños. ¿Cuál de ellos estará más magnetizado, alguno de los que estaban más cerca de sus extremos u otro, de los cercanos a su punto medio?

Como la intensidad del imán disminuye notablemente al aproximarse a la línea neutra, se podría esperar que los fragmentos de su parte central estarán muy poco magnetizados. No obstante, esto no es así: los trozos más próximos al punto medio están más imantados que los demás.

La causa de ello se entiende fácilmente examinando el caso de un imán largo cortado transversalmente en varias partes.

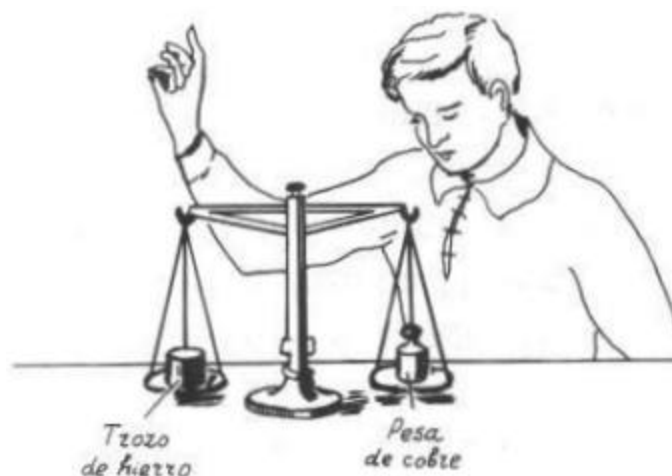


¿Cuál de los fragmentos de la varilla imantada atrae más?

Cada una de ellas será un imán pequeño con sendos pares de polos orientados como está indicado en la figura. Si el imán a fuera más intenso que el b (lo cual sería muy natural), el polo sur s del a equilibraría con creces la acción del polo norte n del b, y en general los polos sur de cada uno de los imanes pequeños de la parte norte del imán originario anularían la de los polos norte, por lo cual se observaría cierto exceso de acción del magnetismo sur. En suma, este extremo de nuestro imán correspondería al polo sur, y no al polo norte. Así que no habrá ninguna contradicción si suponemos que la intensidad de cada uno de los imanes pequeños se incrementa a medida que se aproxima a la línea neutra.

198. Un trozo de hierro en una balanza.

Una balanza está equilibrada con un trozo de hierro y una pesa de cobre (ver la figura). Si tenemos en cuenta la acción del magnetismo terrestre, ¿podemos dar por estrictamente iguales las masas de estos dos cuerpos?



Un trozo de hierro en una balanza

«El globo terráqueo es un imán gigantesco; por ello, el plato que sostiene el trozo de hierro será atraído más que el otro, que sostiene la pesa de cobre, y, por consiguiente, la masa de esta última no será igual a la del trozo de hierro.»

Los que razonan de esa manera hacen caso omiso de las enormes dimensiones del globo terráqueo comparado con las del trozo de hierro en cuestión, así como las consecuencias que se derivan de este hecho. El caso es que el imán atrae y repele el hierro al mismo tiempo: si acercamos al referido trozo el polo norte de un imán, entonces en su extremo más próximo a éste último surgirá el polo sur que será atraído por el norte del imán, mientras que en el otro extremo del trozo surgirá el polo norte, repelido por el norte del mismo imán. Entre las dos fuerzas, la atractora y la repulsora, predominará la primera, puesto que la distancia entre los polos de signos contrarios será menor que entre los del mismo signo. El polo sur del imán también atrae y repele al mismo tiempo al referido trozo de hierro, pero en este caso la atracción es más intensa que la repulsión.

Semejante fenómeno tiene lugar sí el imán es de dimensiones ordinarias. Si se trata de uno gigantesco como es el Globo, el caso es distinto. El trozo de hierro colocado en la balanza, encontrándose en el campo magnético terrestre, también tiene dos polos, pero en este caso es imposible afirmar que uno de ellos es atraído más intensamente por el polo magnético de la Tierra más próximo a él, que el otro: la diferencia de distancia es tan ínfima que, de hecho, no podrá influir de alguna manera en la intensidad de interacción de los polos. ¿Qué importancia tiene la distancia entre los polos del pedazo (que mide unos cuantos centímetros o decímetros) en comparación con la que hay entre ellos y el polo magnético de la Tierra (que es de varias miles de kilómetros)?

Conque, la masa del trozo de hierro equilibrado en la balanza es la misma que la de las dos pesas. El magnetismo terrestre es incapaz de afectar de modo alguno la exactitud de las mediciones.

Por esta misma razón una tira de hierro magnetizada pegada a un trozo de corcho que flota en el agua, no avanza en dirección del polo magnético de la Tierra más próximo, sino que sólo se pone "de cara" a él en el plano de un meridiano magnético: dos fuerzas paralelas iguales y de sentido contrario no pueden imprimir movimiento progresivo a un cuerpo, sino que sólo son capaces de hacerlo girar sobre su eje.

199. Atracción y repulsión eléctrica y magnética.

a) Una bola ligera es atraída por una varilla. ¿Significa esto que la varilla está electrizada? ¿Y si la bola es repelida? b) Una barra de hierro atrae a una aguja de acero. ¿Querrá decir esto que la barra está imantada? ¿Y si la aguja es repelida?

a) El hecho de que la bola es atraída por la varilla no comprueba inmediatamente que esta última está imantada. Una varilla no electrizada previamente también atraerá a una bola ligera electrizada. La atracción comprueba que uno de estos dos objetos está electrizado. Al contrario, si la varilla y la bola se repelen mutuamente, podemos concluir que ambos cuerpos están electrizados: sólo se repelen los cuerpos con carga eléctrica de un mismo signo.

b) Lo mismo sucede con los imanes. Si la varilla de hierro atrae la aguja, no podemos afirmar que la primera está imantada: el hierro no imantado también atraerá la aguja si esta última está magnetizada.

200. Capacidad eléctrica del cuerpo humano.

¿Cuál es la capacidad eléctrica del cuerpo humano?

Si la persona se encuentra alejada de un conductor puesto a tierra (por ejemplo, de las paredes de la habitación), la capacidad eléctrica de su cuerpo es igual a 30 «centímetros». Quiere decir que en tales condiciones la capacidad eléctrica del cuerpo humano equivale a la de un conductor esférico de 30 cm de radio.

201. Resistencia del filamento.

La resistencia eléctrica del filamento en estado caliente difiere de la del filamento frío. ¿Cuál es la diferencia en una bombilla de vacío de 50 vatios?

La resistencia del filamento de carbón disminuye al aumentar la temperatura, mientras que la del metálico aumenta notablemente. Cuando el filamento de la bombilla de vacío de 50 vatios está caliente, su resistencia supera 12 ó 16 veces la que tiene en estado frío.

202. Electro-conductibilidad del vidrio.

¿Conduce la corriente eléctrica el vidrio?

El vidrio no siempre presenta propiedades aislantes: cuando está muy caliente, conduce la corriente eléctrica. Si conectamos una varilla o un tubo de vidrio de 1 a 1,5 cm de longitud a la red de alumbrado eléctrico y lo calentamos mediante un mechero, algún tiempo después, cuando el vidrio se caliente suficientemente, dejará pasar la corriente eléctrica. Una bombilla eléctrica conectada a este circuito se encenderá.

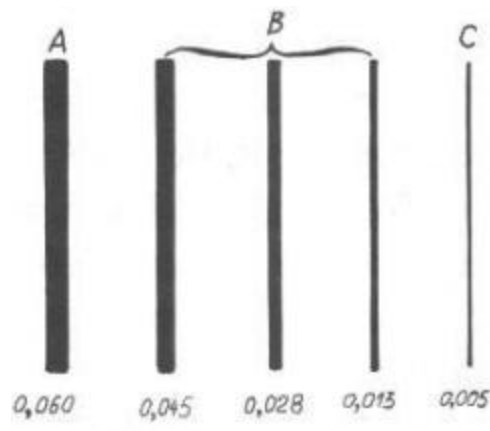
203. El daño que causa el encendido frecuente de las bombillas eléctricas.

Algunos tipos de bombillas eléctricas se funden si se encienden muy frecuentemente. ¿Por qué?

Si las bombillas de filamento de tungsteno se encienden y apagan con mucha frecuencia, se deterioran fácilmente. En estado frío, el filamento metálico absorbe restos de gas que quedan en el interior de la bombilla después de evacuarlo. En estado caliente, el mismo vuelve a desprender el gas absorbido, lo cual deteriora poco a poco al filamento de este elemento.

204. El filamento.

Cuando las bombillas eléctricas no están encendidas, tienen filamentos tan finos que casi no se ven a simple vista. ¿Por qué los filamentos se engruesan cuando conducen la corriente eléctrica?



El grosor de varios filamentos B en comparación con el del cabello humano A y el hilo de la telaraña C

Es cierto que el filamento de la bombilla eléctrica encendida parece tener mayores dimensiones. No obstante, no se puede atribuir este hecho a la dilatación térmica. El coeficiente de dilatación de los metales equivale a unas cuantas cienmilésimas, por lo cual, cuando su temperatura se eleva hasta 2000°C, el diámetro de las piezas metálicas sólo puede aumentar en algún tanto por ciento, es decir, mucho menos de lo que aparenta. En realidad, el filamento no se ensancha más que en cierto tanto por ciento. Su engrosamiento aparente se debe a la ilusión óptica: a consecuencia de la llamada irradiación las zonas blancas parecen tener dimensiones mayores que las reales. Cuanto más luminoso es un objeto, tanto mayores dimensiones aparenta tener. Como la luminosidad del filamento calentado es bastante elevada, su aumento virtual es considerable: un filamento de diámetro real de cerca de 0,03 mm parece medir no menos de un milímetro, es decir, «aumenta» 30 veces.

207. Longitud de un segmento.

La longitud de un segmento ha sido medida dos veces. La primera vez el resultado ha sido 42,27 mm y la segunda, 42,29 mm. ¿Cuál es la longitud real del segmento?

Muchas personas consideran que al medir una magnitud, su longitud real equivale a la media aritmética de los resultados de cada una de las mediciones. Por ello, a la pregunta planteada se acostumbra responder de la manera siguiente: la longitud real del segmento es de

$$(42,27 + 42,29) / 2 = 42,28 \text{ mm.}$$

El resultado no es exacto, ya que en este caso la magnitud obtenida no es sino el valor más probable de la longitud del segmento, y puede no ser el valor real. Los datos disponibles no permiten determinar exactamente la verdadera longitud; esta última podrá equivaler a la longitud más probable o puede diferir de ella.

208. La gota de agua horada la piedra.

¿Cómo explica usted el hecho de que «la gota de agua horada la piedra»?

Es sabido que para dejar una huella, aunque sea muy pequeña, en la superficie de una piedra, hay que utilizar un cuerpo más duro que la piedra. Como el agua no es más dura que la piedra, ¿cómo puede «horadarla»?

El agua pura que cae sobre la piedra no deja ni la menor huella en su superficie, por más que vuelva a hacerlo. El valor de un conjunto de ceros no supera al cero, por lo tanto, la repetición infinita de golpes de gotas de agua sobre la piedra no produce ningún efecto. Si el agua en este caso fuera absolutamente pura, no «horadaría» la piedra. Pero el agua natural siempre contiene partículas sólidas (por ejemplo, de arena, cuarzo, sal) capaces de dejar huellas en la piedra. Por muy pequeñas que sean dichas huellas, sobreponiéndose unas a otras durante largo tiempo causan un perjuicio notable.

Por consiguiente, no es el agua lo que horada la piedra, sino las diminutas partículas sólidas invisibles presentes en ella.

209. Dos ciudades.

He aquí uno de los problemas presentados por Edison en su certamen:

«Dos ciudades situadas en diferentes orillas de un río a una milla (1,6 km) de distancia quedaron incomunicadas entre sí a consecuencia de un siniestro. ¿Cómo restablecería usted la comunicación entre ellas sin valerse de la electricidad? El río es infranqueable.»

Se podría proponer varios métodos para resolver este problema que Edison formuló de una manera bastante imprecisa. Si se pide asegurar la comunicación «verbal» entre las dos ciudades, el telégrafo óptico, o sea, el intercambio de señales luminosas de día o de noche, permitiría salir del apuro. Pero si se trata de asegurar el envío de cargas o correo de una orilla a otra, se podría construir un teleférico lanzando a la orilla opuesta un extremo de un cordel ligero mediante un cohete de calibre suficiente.

210. Una botella en el fondo del océano.

Una botella destapada se encuentra en el fondo del mar a una profundidad de 1 km. ¿Cómo varía su capacidad por la acción de la presión del agua, aumenta o disminuye?

Puede parecer absolutamente incuestionable el hecho de que la capacidad de la botella seguirá invariable, ya que la presión del líquido se transmite de igual forma tanto a su superficie exterior como interior. No obstante, esta conclusión es errónea: de hecho, la botella se comprimirá, por lo cual su capacidad disminuirá correspondientemente. El lector encontrará con qué argumentar semejante afirmación leyendo el siguiente razonamiento del famoso físico holandés H. Lorentz expuesto en su Curso de física. Examinando el efecto de la presión que un gas ejerce sobre una esfera hueca Lorentz dice:

«No importa de qué manera se presione sobre la superficie interior de la esfera. Por lo tanto, supongamos que para ejercer presión introducimos en su interior un núcleo compuesto de la misma sustancia que las paredes del cuerpo, que se adhiere tan bien a ellas que ambas forman un todo único. Si ahora aplicamos cierta presión p a la superficie exterior, se aplicará la misma fuerza a todos los puntos dentro de la esfera: sus paredes sufrirán igual presión ejercida por ambos lados. En este caso disminuirán todas las medidas del cuerpo con arreglo a la razón que se puede calcular en base al coeficiente de compresibilidad. De modo que podemos sacar la conclusión siguiente:

Si una esfera hueca o un recipiente de forma arbitraria experimentan, por dentro y por fuera, la acción de una presión p , su capacidad disminuirá en la misma magnitud en que se reduciría el volumen de un núcleo de igual materia colocado dentro de ellos, llenándolos completamente, si lo expusiéramos a semejante presión.»

Hagamos un cálculo aproximado. Cuando un cuerpo sufre la compresión omnilateral bajo la acción de la presión p , su volumen disminuye en

$$\Delta V = V^3 \frac{1-2k}{E} p$$

donde k es el coeficiente de extensión y E , el módulo de elasticidad.

Para el vidrio $k = 0,3$ y $E = 6 \cdot 10^{10}$ (en unidades del SI). Por eso, bajo la presión de la columna de agua de 1000 m (107 N/m^2) la capacidad de la botella de vidrio de 1 litro ó 10^{-3} m^3 , de capacidad, disminuirá en

$$10^{-3} \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot \frac{(1-0.6)}{6 \cdot 10^{10}} = 0.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 0.2 \text{ cm}^3$$

El hecho paradójico de disminución de la capacidad del recipiente a consecuencia de la presión aplicada igualmente a su superficie interna y externa, parece tan increíble que muchas personas no acaban de entenderlo aun cuando se les expone toda la argumentación.

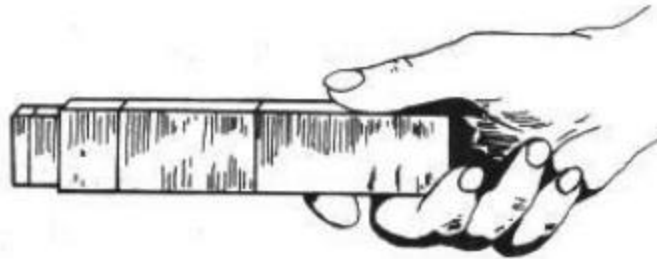
Por lo visto, no estará de más valernos del razonamiento expuesto por E. Edser en su excelente Física general. Se trata, pues, de la misma idea de Lorentz, sólo que expresada de un modo distinto:

«La variación de la capacidad de un recipiente debida a la acción de una fuerza f (referida a la unidad de área) que lo presiona uniformemente y está aplicada a su superficie interior y exterior (denominémosla tensión), se determina comparando el recipiente vacío con uno totalmente hecho del mismo material y de las mismas dimensiones, comprimido uniformemente por la tensión externa f . Podemos convertir mentalmente un recipiente vacío en uno macizo, suponiendo que contiene un núcleo de la misma sustancia que las paredes. Como la tensión compresora es uniforme en todo el espesor de este sólido, la magnitud de compresión de cada partícula será proporcional a la referida tensión f . El núcleo llena todo el recipiente y, además, sufre la misma fuerza que las paredes. Luego la deformación de estas últimas se debe únicamente a la acción de la tensión f (dirigida desde el exterior y el interior del recipiente, por el lado del núcleo). Así pues, la deformación de las paredes no depende del «origen» de la presión que afecta su superficie interior, sea creada por el núcleo o por el líquido contenido en el recipiente, por lo cual la disminución de su capacidad equivale exactamente a la del volumen del núcleo.»

Tenemos que considerar el hecho recién analizado cuando efectuamos mediciones exactas, por ejemplo, cuando determinamos el módulo de elasticidad volumétrica de un fluido utilizando el instrumento de Regnault.

211. Calas, o bloques de calibrado.

En la técnica, para efectuar mediciones exactas, se utilizan bloques de acero llamados «calas» o «bloques de calibrado». Si se aplican uno a otro, se mantienen fuertemente adheridos, aunque no están imantados ni unidos de ninguna manera. ¿Por qué?



¿Por qué los bloques se adhieren fuertemente unos a otros?

En un principio, la propiedad de las calas de mantenerse fuertemente adheridas unas a otras se atribuyó a la presión de la atmósfera. Se suponía, pues, que entre sus superficies muy lisas aplicadas unas a otras no hay aire. No obstante, se tuvo que desechar este criterio cuando fue medida la fuerza necesaria para desprenderlas; resultó que ésta es de 3 ó 6 kgf/cm^2 e incluso más. La presión atmosférica no puede contrarrestar semejante fuerza. La causa verdadera de tan fuerte adhesión de los bloques de calibrado es que sus superficies se pegan entre sí porque hay humedad en cada una de ellas. Las caras de los bloques están pulimentadas con tanto esmero que entre dos superficies aplicadas una a otra no hay espacio mayor de $0,2 \times 10^{-6} \text{ m}$ ($0,0002 \text{ mm}$). A propósito, las superficies absolutamente secas no se pegan entre sí; basta que haya restos de humedad (contenida en el aire) para que dichos elementos se adhieran fuertemente: para separar bloques de una sección de $1 \times 0,35 \text{ cm}$ se requiere aplicar un esfuerzo de 30 o más kg; además no se desprenden ni a golpes.

212. Una vela dentro de un tarro tapado.

Ofrecemos la descripción de un experimento para comprobar la influencia de la presión atmosférica, que fue publicada en su tiempo en una revista para escolares:

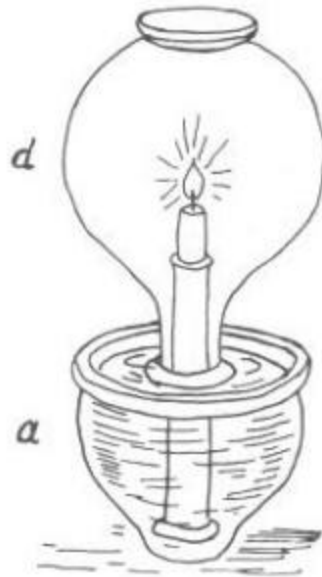
«Un cabo de vela encendido se fija al fondo de un tarro de vidrio; después de que permanezca encendido algún tiempo, la vasija se tapa poniendo un aro de goma húmedo entre sus bordes y la tapa. Al poco rato la llama empieza a extinguirse y se apaga. Si usted trata de destapar el tarro, podrá lograrlo aplicando un esfuerzo bastante considerable. Es fácil comprender la causa de este fenómeno. La llama consume oxígeno, cuya reserva está limitada en este tarro herméticamente tapado. Cuando el oxígeno se agota, la llama se apaga. El resto de aire que ocupa un volumen mayor, se rarifica y ejerce una presión menor. La tapa queda apretada fuertemente a los bordes del recipiente por el exceso de presión exterior.»

¿Es correcta esta explicación?



Un cabo de vela colocado en un tarro de cristal

La explicación del experimento es incorrecta. En lugar del oxígeno consumido mientras la vela estaba ardiendo se ha formado bióxido de carbono: en la proporción de una molécula de éste por cada dos moléculas de aquel. Un número igual de moléculas siempre ocupa un mismo volumen si la presión no varía (ley de Avogadro). Por consiguiente, el consumo de oxígeno de por sí no puede alterar la presión del gas contenido en el tarro.



El experimento con una vela encendida descrito por Filón

La causa real del fenómeno en cuestión es distinta, no es de carácter químico, sino físico. Naturalmente, dentro del recipiente el aire se enrarece durante la combustión, pero no a consecuencia del consumo de oxígeno, sino debido al calentamiento. Parte del gas dilatado sale del tarro hasta que se igualen la presión del aire exterior frío y del caliente contenido en el recipiente. Cuando la vela se apaga por falta de oxígeno, el aire dentro del recipiente se enfría, su presión disminuye, y el exceso de presión atmosférica aprieta la tapa a los bordes de la vasija.

Es harto conocida una modificación de este experimento: un vaso en el cual previamente se coloca un trozo de papel ardiendo, se pone boca abajo en un plato con agua y esta última entra en el vaso. Muchas veces este fenómeno se atribuye al consumo del aire: incluso se llega a afirmar a veces que el agua «siempre sube hasta 1/5 parte de la altura del vaso, con arreglo a la proporción del oxígeno presente en el aire», aunque nunca se ha observado semejante constancia.

Este equívoco se ha generalizado mucho. Por ejemplo, en su obra *Ciencias naturales vistas en su desarrollo e interrelación*, aparecida a principios del siglo XX, F. Dannemann decía lo siguiente:

«En la figura aparece la vela de Filón que succiona líquido. El recipiente a contiene agua. El recipiente d está invertido de modo que su boca se hallaba bajo el agua y dentro de él se encuentra una vela encendida. "El agua, dice Filón, enseguida empieza a subir. Esto sucede porque el fuego desplaza aire del recipiente d. El volumen del agua que entra en el segundo recipiente equivale al del aire desplazado."»

El sabio no se dio cuenta de que cada vez se desplaza una misma cantidad de aire. En este caso se trata de una de las experiencias realizadas por Scheele y otros experimentadores para demostrar el hecho de que el aire consta de dos gases diferentes.»

Según vemos, la explicación sugerida por el físico de la Antigüedad, en principio, muy correcta, se da por incorrecta en el fragmento que acabamos de citar; más aún, lo que se afirma es del todo incorrecto desde el punto teórico y práctico.

213. Cronología de las escalas termométricas.

¿Cuál de los termómetros apareció primero, el de Celsius, de Fahrenheit o de Reaumur?

El primero de los tres termómetros tele Celsius, Reaumur y Fahrenheit, fue el de Fahrenheit, inventado a comienzos del siglo XVIII. Los de Reaumur y de Celsius datan de 1730 y 1740, respectivamente

214. Los inventores de termómetros.

¿De qué nacionalidad eran Celsius, Reaumur y Fahrenheit?

Como el termómetro de Fahrenheit está propagado en Inglaterra y Estados Unidos, mientras que el de Celsius tiene extensa aplicación en Francia, muchas personas consideran que Fahrenheit era inglés y Celsius, francés. Pero de hecho Fahrenheit era alemán y vivía en la ciudad de Dantzig; Celsius era un astrónomo sueco y Reaumur, un naturalista francés.

215. La masa del globo terráqueo.

Ofrecemos un pasaje tomado de un libro de divulgación científica.

«Partiendo de los datos de las mediciones, los científicos han establecido que la densidad del globo terráqueo es de $5,5 \text{ gr/cm}^3$; su volumen se conoce, puesto que se ha logrado determinar su diámetro. Multiplicando este volumen por 5,5 han calculado la masa de la Tierra».

¿Es idóneo este procedimiento para determinar la masa del Globo?

Algunos libros de divulgación científica proponen el siguiente procedimiento para determinar la masa del globo terráqueo: multiplicando su densidad media por el volumen del planeta. ¿De qué manera fue determinada la densidad media de la Tierra?, ya que es imposible medir directamente la densidad de las capas profundas del Globo. No obstante, de hecho se procedió a la inversa: primero fue determinada la masa de la Tierra y luego en base a ésta y a su volumen fue calculada la densidad media. La masa de la Tierra fue definida experimentalmente, a saber, averiguando la magnitud de la fuerza con la cual dos cuerpos de masa de 1 g cada uno se atraen recíprocamente encontrándose a una distancia de 1 cm entre ellos. Si se sabe que la Tierra, cuyo centro dista de la superficie 6.400.000 km, atrae 1 kg de masa con una fuerza de 9,8 N, y que la fuerza de atracción es directamente proporcional al producto de las masas que se atraen una a otra, y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas, es posible calcular la masa del planeta sin valerse de su densidad media.

El cálculo es bastante fácil. Un cuerpo de 1 kg de masa es atraído por otro, de la misma masa, desde una distancia de 1 m con una fuerza de $6,7 \times 10^{-11} \text{ N}$. Por consiguiente, si el centro del Globo se emplazara a la distancia de 1 m de dicho cuerpo de 1 kg de masa, su masa M atraería este kilogramo con una fuerza $M(6,7 \times 10^{-11}) \text{ N}$.

Pero a la distancia equivalente al radio terrestre (el globo es atraído como si toda su masa estuviera concentrada en su centro), es decir, a la distancia de 6.400.000 km, la fuerza de atracción disminuye 6.400.000² veces y es

$$\frac{6,7M}{6,4^2} * 10^{-28} \text{ N}$$

Pero se sabe que la fuerza con la cual la Tierra atrae un cuerpo de 1 kg de masa, situado en su superficie, es igual a 9,8 N ~ 10 N. Por eso podemos escribir la igualdad

$$\frac{6,7M}{6,4^2} * 10^{-28} \text{ N} = 10 \text{ N}$$

$$M = \frac{6.4^2}{6.7} * 10^{24} \text{ kg}$$

Tras realizar el cálculo, determinamos que la masa del globo terráqueo es de cerca de $6 * 10^{24}$ kg.

217. Acerca del vuelo a la Luna.

Un día, después de escuchar mi conferencia dedicada a la cosmonáutica, un joven astrónomo me objetó de la siguiente manera:

«Usted ha omitido una circunstancia importante, por la cual será imposible alcanzar la Luna tripulando naves propulsadas por cohetes. El caso es que en comparación con la masa de los cuerpos celestes, la de un cohete viene a ser de una magnitud despreciable; a su vez, las masas infinitésimas son aceleradas enormemente por la acción de fuerzas relativamente pequeñas que se podrían despreciar si las condiciones fueran distintas. Me refiero a la atracción que ejercen Venus, Marte y Júpiter. Su influencia no es considerable, pero la masa del cohete es prácticamente nula, por lo cual la acción de dichos planetas será muy notable. Estas fuerzas le imprimirán una aceleración enorme, de modo que el móvil estará errando en el espacio siendo atraído ora por un cuerpo de masa más o menos considerable ora por otro, y nunca alcanzará la Luna.»

¿Qué opinión tiene usted sobre esta objeción, amigo lector?

Esta objeción es totalmente gratuita, aunque parece tener fundamento. Es cierto que desde el punto de vista de la astronomía, la masa del cohete puede considerarse nula. Pero precisamente por eso la acción perturbadora que los planetas ejercen sobre él también es igual a cero, puesto que la atracción recíproca de dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas; si una de estas magnitudes es nula, la atracción también lo será, por más grande que sea la masa del otro cuerpo. Si no hay masa, no hay atracción. Es posible sacar la misma conclusión de otra manera. Supongamos que tenemos dos cuerpos de masas M y m . La fuerza de su atracción mutua es

$$F = G \frac{M * m}{r^2}$$

donde G es la constante gravitacional y r , la distancia entre los cuerpos. La aceleración a que la masa m tiene bajo la influencia de la fuerza F , es igual a

$$a = \frac{F}{m} = G \frac{M}{r^2}$$

Es obvio que la aceleración del cuerpo atraído no depende de su masa (m), sino de la del cuerpo que lo atrae. Por consiguiente, la atracción de los planetas comunicaría cierta aceleración al cohete (y éste se desplazaría bajo la influencia de esta fuerza), lo mismo que a cualquier cuerpo de masa gigantesca, por ejemplo, al globo terráqueo. Es sabido que la acción perturbadora de la atracción planetaria sobre el Globo es ínfima.

De modo que el piloto de la nave puede dirigirla hacia la Luna sin temor a que la atraigan Venus, Marte o Júpiter.

218. El hombre se pone a salvo de la gravedad.

En su tiempo, cuando se libraban debates en torno a la posibilidad de realizar vuelos interplanetarios, un astrónomo, refiriéndose a las condiciones, a las cuales tendría que adaptarse el hombre en un medio sin gravedad, presentó el siguiente argumento que pareció muy convincente a muchas personas.

«Nuestro organismo es muy sensible a todo cambio relacionado con la gravedad. A ver, traten de permanecer cabeza abajo algún rato. La circulación sanguínea podrá alterarse gravemente. Si el cambio de sentido de la gravedad influye de esa manera, ¿de qué manera influiría su ausencia?»

¿Qué diría usted sobre la lógica de semejante conclusión?

El lector sabrá valorar la validez lógica del argumento expuesto en la pregunta si trata de aplicar semejantes conclusiones en algún otro terreno. ¿Qué diría usted sobre el razonamiento que sigue?

«Acerca del consumo de alcohol. Nuestro organismo es muy sensible a este producto. Trate de tomar un litro de alcohol puro o de una mezcla de alcohol y coñac. Esto podrá afectar gravemente la actividad nerviosa de su organismo. Si es tan notable el efecto causado por los cambios en la dosis o la composición de las bebidas alcohólicas ingeridas, ¿cómo deberá influir la abstinencia absoluta?»

La falta de lógica en esta conclusión salta a la vista, pero, extrañamente, no todo el mundo la echa de ver enseguida cuando se presenta con la forma que tiene en esta pregunta. Durante las conferencias sobre la astronáutica que he dictado, los oyentes se han valido muchas veces de este argumento, pues ponían en duda la posibilidad de que la persona exista en un medio sin pesantez; no se sabe por qué, pero a muchos les parece convincente la conclusión de que si el ser humano muere después de estar largo tiempo cabeza abajo, deberá morir inminentemente en un medio sin gravitación. Será porque razonan de la siguiente manera: como en algunas ocasiones la gravedad causa alteraciones, la ingravidez también puede causarlas.

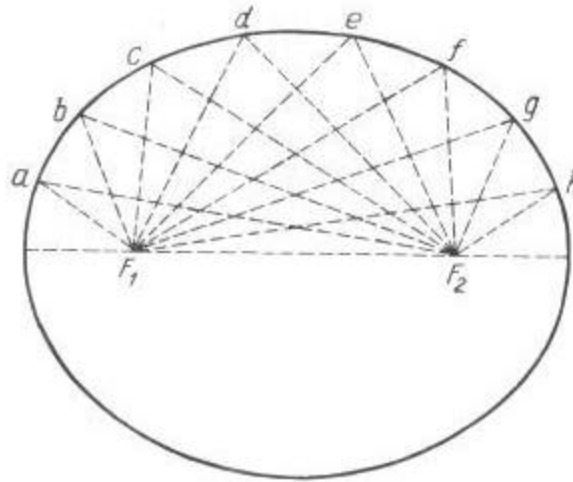
Pero, en realidad, según sabemos, esta última no causa daño alguno al organismo humano.

219. La tercera ley de Kepler.

La tercera ley de Kepler se formula de diferentes maneras en diversos libros. Unas veces se afirma que los cuadrados de los períodos de revolución de los planetas y cometas se relacionan entre sí como los cubos de las respectivas distancias medias al Sol. Otras veces se sostiene que lo hacen como los cubos de los semi-ejes mayores de sus órbitas.

¿Cuál de estas dos formulaciones es correcta?

Las dos formulaciones son idénticas: el semi-eje mayor de la órbita equivale a la distancia media del planeta al Sol. Esta magnitud constituye la media aritmética de las distancias máxima y mínima del planeta al Sol, así como de todas las distancias entre ellos durante todo el período de orbitación. Si el Sol está emplazado en el foco F_1 (ver figura), mientras que el planeta recorre sucesivamente los puntos a, b, c, d , etc., la distancia media del planeta al astro se obtiene sumando todas las distancias $F_1-a, F_1-b, F_1-c, F_1-d$, etc., del foco F_1 , a cada uno de los puntos de la órbita y dividiendo esta suma por el número de distancias. Será fácil demostrar que el cociente vale la mitad del eje mayor.



¿Cómo se determina la distancia media de un planeta al Sol?

He aquí la demostración. Supongamos que en la órbita de un planeta están señaladas n posiciones de este cuerpo; tenemos, pues, n distancias. Unamos cada punto correspondiente a la posición del planeta con el foco F_2 . La suma de distancias de cada punto a los focos equivale al eje mayor $2a$ de la elipse (esta curva posee semejante propiedad). Por consiguiente,

$$\begin{aligned} aF_1 + aF_2 &= 2a \\ bF_1 + bF_2 &= 2a \\ cF_1 + cF_2 &= 2a \\ dF_1 + dF_2 &= 2a \\ &\text{etc} \end{aligned}$$

Sumando los primeros y segundos miembros de estas igualdades, obtenemos la expresión siguiente:

$$(aF_1 + bF_1 + cF_1 + \dots) + (aF_2 + bF_2 + cF_2 + \dots) = 2n \cdot a$$

Si n es infinito, en virtud de la simetría de la elipse ambas expresiones entre paréntesis son iguales, y cada una de ellas es la suma de las distancias del planeta al foco (es decir, al Sol); designemos esta suma por S . Obtendremos la igualdad siguiente:

$$2S = 2n \cdot a$$

Por lo cual

$$S / n = a$$

Mas, S/n es la distancia media del planeta al Sol, en tanto que a designa el semi-eje mayor de la órbita. Por consiguiente, la distancia media del planeta al astro es igual al semi-eje mayor de su órbita.

220. El movimiento perpetuo.

Si los planetas siguieran órbitas estrictamente circulares dando vueltas al Sol, evidentemente no realizarían ningún trabajo mecánico, puesto que no se alejarían del cuerpo que los atrae. Esta situación no cambia cuando la órbita es elíptica, como la de la Tierra. En efecto, pasando de puntos de la elipse cercanos al Sol a puntos más alejados de éste, la Tierra invierte cierta energía para vencer la atracción solar; pero estas inversiones de energía se compensan plenamente cuando el planeta vuelve a la posición de partida. En suma, orbitando al Sol, la Tierra no gasta energía, de modo que semejante movimiento se prolongará indefinidamente.

Consecuencia de este razonamiento sería la conclusión de que la revolución de los planetas es un ejemplo de movimiento perpetuo. Como se trata de un hecho cierto, ¿por qué la física afirma que el movimiento perpetuo es imposible?

La física no afirma, ni mucho menos, que el movimiento perpetuo es imposible; sólo descarta el «perpetuum mobile», es decir, el móvil perpetuo, y no el movimiento perpetuo o continuo. El «perpetuum mobile» es un mecanismo que puede estar en movimiento indefinidamente, realizando trabajo. La existencia de semejante artefacto iría en contra de la ley de conservación de la energía, puesto que sería capaz de realizar cierta cantidad infinita de trabajo, a consecuencia de lo cual dejaría de ser constante la cantidad total de energía en la naturaleza. Un planeta que orbita al Sol no puede servir de semejante mecanismo; no es un «perpetuum mobile», pues no realiza ningún trabajo durante su movimiento; éste es un movimiento continuo cuya existencia no contraviene las leyes de física.

En opinión de algunas personas, el hecho de que exista corriente eléctrica sin solución de continuidad en los superconductores (a temperaturas muy bajas) obviamente infringe la ley de conservación de la energía. Aunque el fenómeno de superconductividad no tiene relación directa con nuestro problema, tenemos que acotar que el mismo no viola la ley de conservación de la energía: la corriente circulará indefinidamente en el superconductor a condición de que no realice ningún trabajo. La corriente cesará si se le hace realizar algún trabajo.

Por tanto, es irrealizable el siguiente proyecto, descrito en una obra publicada en su tiempo y dedicada a la astronáutica:

«Durante los vuelos espaciales que se realizarán en el futuro será posible utilizar un generador eléctrico extravehicular que funcionará a la temperatura del cero absoluto (¿?). Una vez puesto en marcha, proporcionará corriente eléctrica ininterrumpidamente... Como la Tierra y la Luna, así como otros planetas ya realizan semejante (¿?) movimiento... ¿Por qué el hombre no puede crear su perpetuum mobile?»

Entre otras nociones equivocadas, en este proyecto se confunden los conceptos de «movimiento perpetuo» y «móvil perpetuo».

221. El organismo humano y la máquina térmica.

Cite argumentos que permitan considerar el organismo humano vivo como una máquina térmica.

No existen fundamentos físicos que permitan comparar el organismo animal con la máquina de vapor. Hay quien supone equivocadamente que el organismo animal y el motor térmico son plenamente análogos. Este error se deriva de la similitud puramente superficial entre ellos: ambos consumen combustible (alimentos) que produce calor cuando se combina con el oxígeno. En base a estos argumentos se concluye precipitadamente que el calor «animal» se convierte en la energía mecánica del organismo, lo mismo que el calor producido por la caldera sirve para impulsar la máquina.

Sin embargo, este criterio relativo al origen de la energía mecánica del hombre y el animal contradice a la física, además, a su rama más irrefutable, a la termodinámica. Examinando

más detenidamente este asunto, nos daremos cuenta de que entre el organismo animal y el motor térmico no hay semejanza de principio: el organismo vivo no es una máquina térmica. Vamos a demostrar, por qué es totalmente errónea la suposición de que la energía mecánica del organismo vivo surge como resultado de la transformación del calor de «combustión» de los alimentos en trabajo mecánico. O sea, vamos a aclarar, por qué es erróneo considerar que en el organismo primero se obtiene calor a expensas de los alimentos, y sólo después éste se transforma en trabajo. La termodinámica ha establecido que el calor puede convertirse en trabajo siempre que se transmita de una fuente con temperatura alta (por ejemplo, del «calentador», es decir, del hogar de la caldera) a otra con temperatura baja (al «refrigerador»). En este caso la razón de la cantidad de calor convertido en trabajo mecánico a la cantidad de calor recibido del calentador (el rendimiento de la máquina) equivale a la de la diferencia de temperaturas del calentador y el refrigerador con respecto a la del calentador:

$$k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

donde k es el rendimiento, T_1 , la temperatura del cuerpo caliente y T_2 , la del cuerpo frío (T_1 y T_2 se expresan en grados Kelvin).

Vamos a utilizar esta fórmula para tratar de examinar el organismo humano como una máquina térmica. Sabido es que su temperatura normal es de 37°C aproximadamente. Por lo visto, este dato corresponde a uno de los dos niveles de temperatura cuya existencia viene a ser una condición necesaria de funcionamiento de toda máquina térmica. De modo que los 37°C serán el nivel superior (la temperatura del calentador) o el inferior (la del refrigerador).

Examinemos ambos casos partiendo de la fórmula expuesta más arriba y conociendo que el rendimiento del cuerpo humano es de 0,3 aproximadamente, es decir, de un 30%.

Caso I.

37°C ($= 310\text{ K}$) es la temperatura T_1 del «calentador». La temperatura T_2 del «refrigerador» se determina haciendo uso de la ecuación siguiente:

$$0.3 = \frac{310 - T_2}{310}$$

de donde $T_2 = 217\text{ K}$, o -56°C . Quiere decir que ¡en nuestro cuerpo debe haber una zona con una temperatura de 56°C bajo cero! (Suponiendo que el rendimiento es de un 50%, según afirman algunos autores, tendremos que reconocer otra absurdidad, aún mayor, o sea, que en nuestro cuerpo hay una zona con una temperatura de 118°C bajo cero.)

Por consiguiente, la temperatura de 37°C no puede ser el valor máximo de la temperatura de la «máquina térmica viva». ¿Será el mínimo? Vamos a ver.

Caso II.

La temperatura del «refrigerador» es de 37°C :

$$T_2 = 273 + 37 = 310\text{ K}.$$

En este caso (si $k = 30\%$)

$$0.3 = \frac{T_1 - 310}{T_1}$$

de donde $T_1 = 443 \text{ K}$, o 170°C . ¡En nuestro cuerpo debe haber una zona con una temperatura de 170°C sobre cero! (Si adoptamos $k = 50 \%$, para T_1 obtendremos un valor de 620 K , ó $+ 347^\circ\text{C}$.)

Como ningún anatomista ha descubierto en el cuerpo humano una zona que esté congelada hasta 56°C bajo cero, ni calentada hasta $+170^\circ\text{C}$, nos vemos obligados a renunciar a la hipótesis de que nuestro organismo semeja una máquina térmica.

«El músculo no es una máquina térmica en el sentido de la termodinámica, dice el Prof. E. Lecher en su obra Física para los médicos y biólogos. No obstante, la energía potencial de las reacciones químicas (de asimilación de los alimentos) puede ser convertida en trabajo directamente o mediante la energía eléctrica. El calor que hay en el músculo, es un residuo de trabajo mecánico o eléctrico.»

222. Meteoritos.

¿Por qué los meteoritos despiden luz?

Recordemos que antes de entrar en la atmósfera terrestre el meteorito tiene una temperatura muy baja y no se ilumina, y sólo en la atmósfera se calienta y se vuelve luminoso. Por cierto, este cuerpo no arde, ya que en aquella altitud (de 100 o más kilómetros sobre la superficie terrestre) existe un gran vacío y, por lo visto, no hay oxígeno. Entonces, ¿por qué el meteorito se calienta tanto? Comúnmente, a esta pregunta se suele responder de la siguiente manera: porque roza con el aire. Pero, de hecho, este cuerpo no roza con el medio ambiente, sino que arrastra las capas de aire inmediatas a él.

Podría parecer científicamente verosímil la explicación que sigue: el meteorito se calienta hasta tal grado porque la energía de su movimiento, que pierde a consecuencia de la resistencia del aire, se convierte en calor. Pero semejante explicación discrepa con los hechos y la teoría. Si la energía cinética que el meteorito pierde se convirtiera directamente en calor, o sea, si se acelerase el movimiento caótico de sus moléculas, se calentaría toda su masa. Mas, sólo se calienta la capa superficial de este fragmento, en tanto que su interior sigue helado.

Este criterio tampoco es consistente desde el punto de vista teórico. No es preciso que el cuerpo se caliente cuando se decelere: su energía cinética puede convertirse en otras formas de energía. Un cuerpo lanzado hacia arriba se decelera, pero no se calienta: la energía cinética se transforma en energía potencial del cuerpo elevado a cierta altura. En el caso del meteorito, parte de la energía de movimiento que éste pierde, se invierte en poner en movimiento vorticial las capas de aire inmediatas a él. El resto de esta energía, de hecho, se transforma en calor, pero, ¿de qué modo? ¿Cómo la deceleración de las moléculas puede engendrar su movimiento caótico acelerado, es decir, lo que suele llamarse calor? La explicación que acabamos de exponer no responde a esta pregunta.

En realidad, el meteorito se calienta de la siguiente manera. Inicialmente no se calienta el meteorito propiamente dicho, sino el aire que este cuerpo comprime de frente irrumpiendo impetuosamente en la atmósfera: este aire entrega su calor a la capa superficial del fragmento. El aire se calienta al ser comprimido por la misma causa que cuando se utiliza un eslabón, es decir, a consecuencia de la compresión adiabática; durante su movimiento el meteorito presiona el aire con tanta rapidez que el calor generado no tiene tiempo para disiparse en el ambiente.

Vamos a calcular, aunque sea aproximadamente, la temperatura que tendrá el aire comprimido por el advenedizo del cosmos. La física ha establecido la dependencia siguiente entre los factores que intervienen en el proceso:

$$T_f - T_i = T_i \left[\left(\frac{p_f}{p_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

ésta es una modificación de la fórmula que utilizamos para contestar a la pregunta 130, relativa al caso de la expansión adiabática. Vamos a explicar el sentido de las designaciones: T_i es la temperatura inicial del gas (en grados Kelvin); T_f , la temperatura final del mismo (idem); p_f / p_i la razón del valor final al inicial de la presión del gas; k , la razón de dos capacidades caloríficas del gas; para el aire, $k = 1,4$ y $(k - 1)/k = 0,29$. Realizando el cálculo, adoptemos T_i (la temperatura de las capas de aire superiores) igual a 200 K. En lo que se refiere a la razón p_f / p_i vamos a considerar que la presión del aire aumenta de 0,000001 at a 100 at, es decir, la razón indicada es de 108. Sustituyendo estos valores en la fórmula, obtenemos el siguiente resultado:

$$T_f - 200 = 200(10^8)^{0,29} = 40.000K$$

Este cálculo, basado en datos hipotéticos, no puede ser menos que aproximado, más bien es una estimación del orden de la incógnita.

Así pues, hemos sacado la conclusión de que el aire comprimido frontalmente por semejante móvil debe de calentarse hasta varias decenas de miles de grados. Estimaciones basadas en la medición del brillo de los meteoritos proporciona un resultado similar: de 10.000 a 30.000 grados. Estrictamente hablando, cuando observamos uno de ellos, no lo vemos (pues suele tener tamaño de nuez o guisante), sino que notamos el aire incandescente cuyo volumen es varias miles de veces mayor.

Lo que acabamos de exponer, también se refiere, en lo esencial, al calentamiento de los proyectiles de artillería que al comprimir el aire delante de sí, lo calientan y se calientan ellos mismos. La única diferencia consiste en que la velocidad del meteorito es 50 veces mayor que la de los proyectiles. Por lo que atañe a la diferencia de las densidades del aire a gran altitud y junto a la superficie terrestre, hay que tener en cuenta que el grado de calentamiento sólo depende de la razón de las densidades final e inicial, y no de sus magnitudes absolutas.

Para terminar, sólo nos queda explicar una cosa: ¿por qué, pues, se calienta el aire cuando es comprimido? Vamos a examinar un ejemplo concreto cuando lo comprime un meteorito. Las moléculas de aire que chocan con la piedra que les viene al encuentro, rebotan a mayor velocidad que la inicial. Recuérdese, qué hace el tenista para que la pelota rebote con la mayor celeridad posible: no espera pasivamente a que choque con la raqueta, sino que la intercepta golpeando con fuerza con tal de «transmitirle su peso propio», por decirlo así. Cada molécula rebota del móvil como la pelota de la raqueta, recibiendo parte de su energía. Precisamente la energía cinética creciente de las moléculas es lo que entendemos por «aumento de la temperatura».

223. La niebla en zonas industriales.

*En zonas industriales, las nieblas son más frecuentes que en zonas boscosas o agrícolas. (Las nieblas de Londres se han hecho proverbiales.)
¿Cómo explicaría usted este fenómeno?*

Las leyes de la física molecular explican por qué en las zonas industriales, cuya atmósfera está contaminada con partículas de humo, son frecuentes las nieblas. Según hemos establecido al resolver el problema 150, la presión del vapor saturador cerca de la superficie de líquido cóncava debe ser menor que junto a la plana si la temperatura es igual en ambos

casos. Análogamente, la presión del vapor saturador junto a la superficie de líquido convexa debe ser más alta que cerca de la plana. La causa de este fenómeno consiste en que las moléculas abandonan con mayor facilidad una superficie convexa que otra plana (siendo iguales las temperaturas de los líquidos). ¿Qué deberá pasar, pues, con una gota de agua de superficie muy convexa (es decir, de forma de bola diminuta) que se encuentra en un espacio saturado de vapor de agua? La gota empezará a evaporarse en semejante atmósfera, y si es suficientemente pequeña, lo hará totalmente, a pesar de que el espacio ya está saturado de vapor; en tal caso dicho espacio se volverá «sobresaturado» de vapor. Es fácil comprender la consecuencia que se deriva de semejante «suceso»: el vapor empezará a condensarse y a formar gotas sólo a condición de que esté sobresaturado. En un espacio normalmente saturado de vapor de agua, sus moléculas no formarían gotitas, puesto que las primeras de ellas, muy diminutas, por supuesto, deberían evaporarse enseguida.

El caso es distinto si el ambiente saturado de vapor contiene partículas de polvo o humo. Por muy pequeñas que sean, su tamaño es considerable en comparación con el de las moléculas de agua, las que al precipitarse sobre ellas de inmediato forman gotas bastante grandes. Estas últimas, de radio considerable, no tienen una superficie curva como para que el agua pueda evaporarse enseguida. Por ello, queda claro por qué la presencia de partículas de humo en el ambiente debe favorecer la condensación de vapor y la formación de gotas, es decir, de niebla.

224. El humo, el polvo y la niebla.

¿Qué diferencia hay entre la niebla, el humo y el polvo?

El humo, el polvo y la niebla difieren en cuanto al estado y el tamaño de partículas suspendidas en el aire (o en el seno de otro gas). Si las partículas son sólidas, hay polvo o humo; si son líquidas, hay niebla.

El polvo y el humo difieren en tamaño de sus partículas. Las de polvo son más gruesas, su diámetro es de 0,01 a 0,001 cm. Las partículas de humo, en cambio, tienen un diámetro de 0,0000001 cm; así de pequeñas son, por ejemplo, las del humo de tabaco cuyo diámetro sólo es 10 veces mayor que el del átomo de hidrógeno (y cuyo volumen supera 1000 veces el de este último).

Otra diferencia entre el humo y el polvo, condicionada por el tamaño desigual de sus partículas, consiste en que las de polvo se precipitan con una velocidad creciente, en tanto que las de humo lo hacen con una velocidad constante (si miden no menos de 0,00001 cm de diámetro) o no se precipitan en absoluto (si su diámetro es menor de 0,00001 cm). En este último caso la velocidad del llamado movimiento browniano de dichas partículas supera a la de su precipitación.

225. Velocidad de las moléculas de agua.

¿En qué caso las moléculas de agua tienen mayor velocidad a 0°C, en el vapor de agua, en el agua líquida o en el hielo?

La velocidad de movimiento térmico de las moléculas de una sustancia dada depende de su temperatura y no tiene nada que ver con el estado, sólido, líquido o gaseoso, de la misma. Por consiguiente, a una misma temperatura las moléculas de vapor de agua, agua líquida y hielo se mueven a igual velocidad (mejor dicho, poseen energía cinética igual: las de hielo no son idénticas a las de agua y de vapor).

227. El cero absoluto.

¿Será posible alcanzar la temperatura del cero absoluto?

En Leyden (Holanda), tras muchos años de búsqueda y experimentos se logró generar en condiciones de laboratorio una temperatura de $-272,9^{\circ}\text{C}$, es decir, tan sólo faltó un cuarto de grado centígrado para obtener el cero absoluto.

Por ello, generalmente se suele creer que no costará mucho trabajo alcanzar el cero absoluto, sólo habrá que avanzar un espacio de un cuarto de grado centígrado. O sea, se razona de la misma manera que en su tiempo se razonaba sobre cómo alcanzar el Polo ártico: como queda menos de un cuarto de grado, pues, la meta está muy cerca.

Sin embargo, existen argumentos que obligan a concluir que es imposible alcanzar el cero absoluto. Lo afirma uno de los corolarios del tercer principio de la termodinámica. El examen de esta tesis no compete a la física elemental. Sólo nos limitaremos a señalar que algunos autores dan el nombre de «principio de inaccesibilidad del cero absoluto» al referido principio de la termodinámica.

Es interesante comparar las tres conclusiones negativas («tres imposibilidades», por decirlo así) derivadas de los tres principios de la termodinámica:

- a) del primer principio (ley de conservación de la energía) se deduce la imposibilidad del móvil perpetuo de primera especie;
- b) del segundo principio, la imposibilidad del móvil perpetuo de segunda especie;
- c) del tercer principio, la imposibilidad de alcanzar el cero absoluto.

228. El vacío.*¿Qué es el vacío?*

No se piense que por vacío se entiende cierto grado elevado de enrarecimiento del gas contenido en un recipiente cerrado. Cualquier gas puede estar muy enrarecido, no obstante, ningún físico dirá que se trata del vacío. Estrictamente hablando, uno de los rasgos del vacío consiste en que el recorrido libre medio de las moléculas es mayor que las dimensiones del recipiente.

Expliquémoslo. Las moléculas de gas, sujetas al movimiento térmico, chocan una con otra miles de millones de veces por segundo. No obstante, en el intervalo de tiempo entre dos colisiones seguidas, una molécula recorre cierto espacio, llamado recorrido libre (sin colisionar con sus gemelas). La longitud media l de este recorrido se determina dividiendo la velocidad media v de las moléculas, es decir, el recorrido medio de una molécula en un segundo, por el número N de sus colisiones por segundo:

$$l = \frac{v}{N}$$

Por ejemplo, a 0°C la velocidad media v de las moléculas de aire es de unos 500 m/s, o 500.000 mm/s; el número N de colisiones por segundo a presión normal equivale a 5.000.000.000. Por consiguiente, el recorrido medio l de las moléculas de aire a 0°C y presión de 760 mm de mercurio es igual a

$$l = \frac{v}{N} = \frac{500.000}{5.000.000.000} = 0.0001$$

(En realidad, se procede a la inversa: se determinan experimentalmente v y l , mientras que N se halla mediante el cálculo. Haciéndolo de otra manera sólo hemos querido establecer la dependencia entre las variables l , v y N .)

Si la presión del gas es n veces menor que la normal, es decir, si éste está enrarecido n veces, el número de moléculas de gas contenidas en un centímetro cúbico será n veces menor; por consiguiente, tantas veces menor será el número N de colisiones. Como $N = v/l$, siendo invariable la velocidad v (ésta no depende de la presión), la longitud l será mayor la misma cantidad de veces.

Si el aire se ha enrarecido un millón de veces, a 0°C el recorrido libre medio de sus moléculas será igual a

$$0,0001 * 1.000.000 = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm}.$$

En el espacio interior de una bombilla eléctrica de menos de 10 cm de longitud, con aire enrarecido hasta tal grado, el recorrido libre medio de las moléculas supera las dimensiones de la ampolla; quiere decir que, por regla general, se mueven dentro de ella sin chocar una con otra. El gas que se encuentra en semejante estado posee una serie de propiedades distintas de las que suelen tener los gases cuyas moléculas chocan entre sí. Por ello, en física este estado del gas tiene un nombre especial, a saber, «vacío».

El estado del aire contenido en un recipiente de dimensiones considerables (por ejemplo, en un tubo de 1 m de longitud) y enrarecido hasta ese mismo grado y a esa misma temperatura ya no se podrá llamar vacío, puesto que sus moléculas chocarán entre sí.

229. La temperatura media de toda la materia.

¿Qué temperatura media tiene la materia del Universo, según los cálculos aproximados?

El problema de qué temperatura media tendrá la materia del Universo suscita gran interés, y cuando sepamos responderlo definitivamente, averiguaremos en qué estado estudiamos la materia en nuestros laboratorios, en el típico o excepcional. La temperatura media de toda la materia del Universo ¡es de un orden de varios millones de grados!

Esta estimación sorprendente dejará de ser paradójica si recordamos que la masa de los planetas del Sistema Solar constituye $1/700$ (0,0013) parte de la del Sol, y que una relación del mismo orden tendrá lugar en el caso de otras estrellas (si tienen sus respectivos sistemas planetarios). Por consiguiente, cerca de 0,999 partes de toda la materia del Universo está concentrada en el Sol y las estrellas, cuya temperatura media es de decenas de millones de grados. Nuestro Sol es una estrella típica; su superficie tiene una temperatura de 6000°C , mientras que en su interior mantienen no menos de $40.000.000^\circ\text{C}$. Por esta razón, hemos de considerar que la materia del Universo tiene una temperatura de 20.000.000 de grados por término medio.

La situación cambiaría poco si compartiéramos el punto de vista (muy defendido en su tiempo por A. Eddington) de que el espacio interestelar no está totalmente libre de una materia ponderable, sino que está ocupado por una sustancia extremadamente enrarecida, hasta una decena de moléculas por 1 cm^3 (20.000.000 de veces menos que en la bombilla más enrarecida). Si esta suposición es cierta, la cantidad total de materia que hay en el espacio interestelar será unas tres veces mayor que la que compone las estrellas. Como la temperatura de la materia interestelar es de unos 200°C bajo cero, o mucho menor, los $3/4$ de toda la materia del Universo tendrán una temperatura de -200°C , y el resto, una de 20.000.000 de grados. De modo que la temperatura media de la materia del Universo será de unos 5.000.000 de grados.

Sea como sea, nos veremos obligados a sacar la conclusión de que la temperatura media de la materia del Universo no es menor de varios millones de grados, y que una parte de ella tiene una de $20.000.000^\circ\text{C}$ o más, y la otra, 200°C bajo cero o menos. Y sólo una parte de la materia que cuantitativamente se expresaría por una magnitud despreciable tendrá una temperatura moderada que generalmente se registra en el medio ambiente que habitamos.



Experimento que ha permitido generar la temperatura de 20.000 grados. El experimentador está protegido convenientemente contra la acción de la onda explosiva

Así pues, las temperaturas típicas de la materia serán extremadamente bajas, muy próximas al cero absoluto (si se comprueba la hipótesis de Eddington), o extremadamente altas, de decenas de millones de grados. La física, según vemos, trata de la materia sujeta a condiciones excepcionales, mientras que los estados de la materia que solemos considerar excepcionales, de hecho, son estados típicos. Conocemos muy superficialmente las características físicas del grueso de la materia que compone el Universo; habrá que estudiarlas más detenidamente en el futuro. Poseemos datos muy exiguos acerca de las propiedades de la materia a temperaturas próximas al cero absoluto, y no tenemos ni la menor idea acerca de qué es la materia a la temperatura de decenas de millones de grados. En los EE.UU., en un laboratorio fue generada una temperatura de 20.000°C mediante la descarga instantánea de un condensador eléctrico efectuada con un alambre fino y corto, de 0,0005 g de peso. Durante aquel experimento, en una cienmilésima de segundo el alambre recibía 30 calorías. Según los cálculos efectuados por los experimentadores, éste se calentaba hasta 20.000°C en unos casos (fig. 130) y hasta 27.000°C en otros, batiendo todas las marcas de temperatura establecidas en los laboratorios hasta aquel entonces. El alambre calentado hasta esa temperatura emitía una luz 200 veces más brillante que la solar.

Cuando el recipiente, donde se encontraba el alambre, se llenaba de agua, explotaba y se volvía polvo al producirse la descarga, de modo que era imposible identificar el vidrio entre lo que quedaba de él.

20.000 °C	Ottenida en el laboratorio
 18.000°	Temperatura de la superficie de las estrellas más calientes
 6.000°	Temperatura de la superficie del Sol
 4.000°	Temperatura del arco voltaico
 3.000° 1.800° 1.675°	Fundición del tungsteno Id. del platino Id. del níquel
 800°	Se pierden las propiedades magnéticas
 525°	Hierro al rojo
 100°	Ebullición del agua
 0°	Fusión del hielo
-273 °C	Cero absoluto

Hitos en el camino hacia la temperatura de 20.000°C

Si los experimentadores se encontraban a una distancia de medio metro del equipo y no estaban protegidos adecuadamente, sentían una sacudida muy fuerte producida por la onda explosiva. Esta última se propagaba con una rapidez diez veces mayor que el sonido. A tanta temperatura el movimiento molecular se acelera enormemente: por ejemplo, las moléculas de hidrógeno tienen una velocidad de 16 km/s.

La temperatura de 20.000 a 27.000 grados supera la de la superficie de las estrellas más calientes, pero está muy por debajo de la que reina en su interior, donde asciende a decenas de millones de grados. Ni la imaginación más audaz podría «crear» semejante calor. Jeans en su libro *El Universo a nuestro alrededor*, dice lo siguiente:

«Las temperaturas de treinta a sesenta millones de grados que suponemos que existen en el núcleo de las estrellas, están tan fuera del alcance de nuestra experiencia que ni siquiera podemos figurarnos de alguna manera más o menos precisa, qué deben significar.

Supongamos que un milímetro cúbico de materia común se caldea hasta 50.000.000 de grados, o sea, aproximadamente hasta la temperatura del centro del Sol. Por más fantástica que parezca semejante suposición, para compensar la energía que emiten sus seis caras, se requeriría la energía total de una máquina de 3.000.000.000.000.000 CV. Esta «cabeza de alfiler» emitiría una cantidad de calor suficiente para incinerar al que intente acercarse hacia ella a 1500 kilómetros. »

Las 999 milésimas (o no menos de un cuarto, como mínimo) de toda la materia de la naturaleza permanecerán en este estado, inconcebible para nosotros. Según vemos, la física

tiene por delante un extensísimo campo que investigar, antes de que llegue a dominar las leyes de la materia.

230. Una diezmillonésima de gramo.

¿Es posible ver a simple vista una diezmillonésima de gramo de materia?

Hemos visto tantas veces una diezmillonésima de gramo de sustancia. Usted acaba de deslizar su vista por una de semejantes partículas.

La tinta de un punto impreso pesa cerca de una diezmillonésima de gramo. Su peso ha sido determinado de la manera siguiente: mediante una balanza muy sensible ha sido pesado un trozo de papel en blanco, después en él se ha puesto con tinta un punto y se ha vuelto a pesar. La diferencia de las dos medidas correspondió al peso del punto. Esta magnitud es de 0,00000013 g, o sea, es poco más de una diezmillonésima de gramo.

231. El número de Avogadro

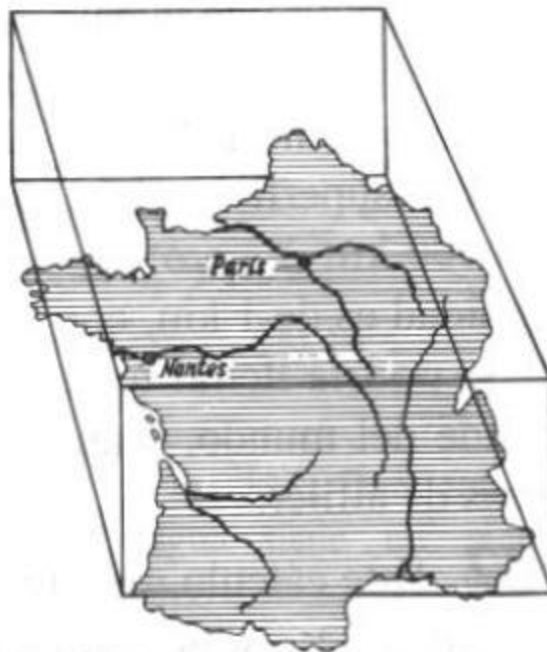
Un mol de toda sustancia, es decir, tantos gramos de ésta como vale su masa molecular (por ejemplo, 2 g de hidrógeno ó 32 g de oxígeno), siempre contiene un mismo número de moléculas, a saber, $6.6 \cdot 10^{23}$. En física este número se llama constante de Avogadro, o número de Avogadro.

Imagínese que ese número no es de moléculas, sino de cabezas de alfiler; usted desea encargar una caja para ellas y decide que la altura de ésta debe medir 1 km.

¿Qué dimensiones tendría, aproximadamente, la base de la caja?

¿Cabría semejante caja dentro de los límites de San Petersburgo?

Es inútil tratar de ubicar dentro de los límites de una ciudad, por muy extensa que sea, una caja llena de cabezas de alfiler cuyo número equivale al de Avogadro, aunque las paredes de ésta midan 1 km de altura. Tamaña «caja» no cabría en el territorio de Francia, el país más extenso de Europa occidental.



El fondo de una caja con paredes de 1 km de altura, llena de cabezas de alfiler, cuyo número equivale al de Avogadro, no cabría en el territorio de Francia

Como esta afirmación parece muy inverosímil, vamos a efectuar el cálculo para comprobarla. El volumen de una cabeza de alfiler es igual a 1 mm^3 . Expresemos la magnitud $66 \times 10^{22} \text{ mm}^3$ en kilómetros cúbicos:

$$66 \times 10^{22} : 10^{18} = 66 \times 10^4 = 660.000 \text{ km}^3.$$

Como la altura de la caja es de 1 km, su base debería tener un área igual a 660.000 km^2 , mientras que la superficie de Francia sólo mide 550.000 km^2 .

La superficie del Mar Caspio es menor aún (de 440.000 km^2), pero como sólo en algunos lugares su profundidad es de 1 km, con tanta cantidad de cabezas de alfiler se podría llenar toda la depresión de este lago, el más grande del mundo, y aun sobraría bastante número de cabezas de alfiler.

232. Un litro de alcohol vertido en el Océano Mundial.

Si se vierte un litro de alcohol en el Océano Mundial, sus moléculas se distribuirán en todo el volumen del agua.

¿Qué cantidad de agua habría que extraer del Océano para recuperar una molécula de alcohol?

Este cálculo muestra evidentemente cuán enorme es la cantidad de moléculas contenidas en un volumen bastante reducido. Para responder correctamente a la pregunta planteada, es preciso comparar el número de moléculas que hay en un litro de alcohol con el de litros de agua del Océano Mundial. Ambas cantidades son impresionantes, y sin hacer un cálculo es imposible decir cuál de ellos es más grande. Vamos a realizarlo de la manera siguiente. Un mol de alcohol etílico, lo mismo que uno de cualquier otra sustancia, contiene 66×10^{22} moléculas (constante de Avogadro). La masa de un mol de alcohol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) es igual a

$$2 \times 12 + 6 \times 1 + 1 \times 16 = 46 \text{ g}.$$

Luego un gramo de alcohol contiene $66 \times 10^{22} / 46 = 14 \times 10^{21}$ moléculas. En un litro de alcohol de masa de 800 g el número de moléculas es

$$14 \times 10^{21} \times 800 = 112 \times 10^{23} \approx 10^{25}$$

¿Cuántos litros de agua habrá en el Océano Mundial? Su superficie mide unos $370.000.000$ de km^2 . Si consideramos que el Océano Mundial mide 4 km de profundidad por término medio, el volumen del agua será

$$148 \times 10^7 \text{ km}^3, \text{ ó } 148 \times 10^{19} \text{ litros} \approx 15 \times 10^{20} \text{ litros}$$

Al dividir el número de moléculas de un litro de alcohol por la cantidad de litros de agua del Océano Mundial, obtendremos el siguiente dato aproximado: 7000, es decir que en este caso en cualquier parte del océano cada litro de agua contendría unas 7000 moléculas de alcohol. En cada dedal de agua del océano habría 7 moléculas de esa sustancia.



Una gota de agua tiene no menos moléculas que gotas el Mar Negro

También es ilustrativa la comparación siguiente: una gota de agua contiene tantas moléculas como gotas pequeñas hay en el Mar Negro. El lector puede comprobar estos datos efectuando un cálculo similar al que acabamos de exponer.

233. Distancia entre las moléculas.

¿Cuántas veces es menor el diámetro de la molécula de hidrógeno en comparación con la distancia media entre las moléculas de ese gas que se encuentra a 0°C y a presión normal?

Aun a presión normal, entre las moléculas de los gases hay un espacio mucho mayor de lo que se suele creer. A 0°C y a presión de 760 mm de mercurio la distancia media entre las moléculas de hidrógeno es de

$$0,000003 \text{ cm } (3 \times 10^{-6} \text{ cm})$$

en tanto que el diámetro de la molécula de hidrógeno es de $2 \times 10^{-8} \text{ cm}$. Si dividimos el primer número entre el segundo, obtendremos 150.

Por consiguiente, las moléculas de nuestro gas están alejadas unas de otras a una distancia ciento cincuenta veces mayor que sus diámetros.

234. Masas del átomo de hidrógeno y de la Tierra.

Trate de determinar «a ojo» el término incógnito en la proporción siguiente:

$$\frac{\text{masa del átomo de hidrógeno}}{x} = \frac{x}{\text{masa del Globo}}$$

Dado que la masa del átomo de hidrógeno equivale a $1,7 \times 10^{-24} \text{ g}$, mientras que la del globo terráqueo es igual a $6 \times 10^{27} \text{ g}$, su media proporcional será de

$$x = \sqrt{1,7 \cdot 10^{-24} \cdot 6 \cdot 10^{27}} \approx 100 \text{ g}$$

235. El tamaño de la molécula.

¿Qué tamaño tendrían, aproximadamente, las moléculas si aumentasen 1.000.000 de veces las dimensiones lineales de todos los cuerpos que hay en la Tierra?

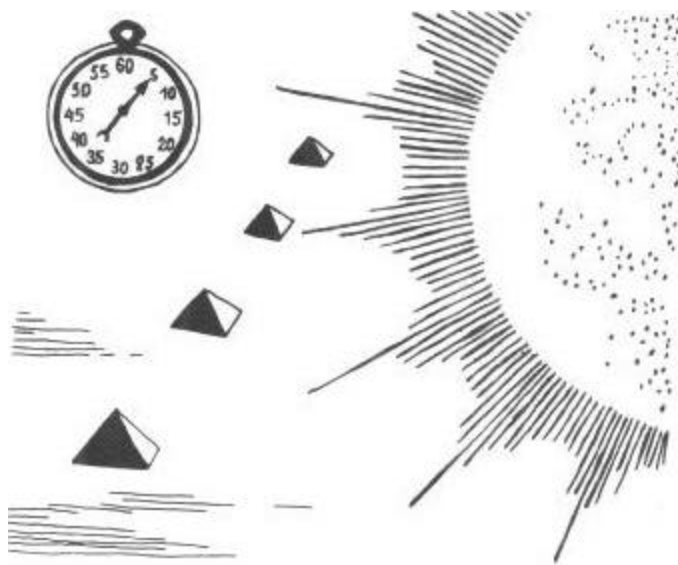
Si aumentasen 1.000.000 de veces las dimensiones lineales de todos los cuerpos que hay en la Tierra:

- la cima de la torre Eiffel estaría muy cerca de la órbita de la Luna;
- la estatura media de la persona sería de 1700 km
- el cuerpo de un ratón mediría 100 km de longitud
- el cuerpo de una mosca mediría 7 km de largo
- el cabello humano sería de 100 m de grosor
- los glóbulos rojos de la sangre tendrían un diámetro de 7 m
- Las moléculas tendrían un tamaño igual al de un punto impreso.

237. La masa de la energía.

¿Como se ha de entender la afirmación de la física moderna de que la energía posee masa?

La física moderna ha establecido que no sólo la materia, sino también la energía poseen masa ponderable. Verdad es que nadie ha advertido que pesen más los cuerpos calentados; por lo visto, el aumento de energía térmica no añade notablemente masa al cuerpo. En este caso el incremento de masa no se observa directamente, por ser infinitésimo en comparación con la de todo el cuerpo.



¿Qué cantidad de masa pierde el Sol cada segundo por la emisión de energía?

En general, las masas, con las cuales tenemos que vérmolas en la técnica y en la vida cotidiana, son suficientemente grandes para que su peso sea notable. Al contrario, las porciones de energía que advertimos diariamente, son tan insignificantes que su peso es imperceptible.

Estas relaciones serán mucho más patentes si las traducimos al lenguaje de los números. Una máquina de vapor de 3000 CV realiza un trabajo de 2.250.000 julios por segundo, o sea, de unos 800.000.000 de julios por hora. A nuestro modo de ver, esta cantidad de trabajo es enorme, pero su masa es muy pequeña, de 0,1 mg. Noventa billones (9×10^{13}) de julios tendrán masa de 1 g.

He aquí otro ejemplo. En la figura se representa una piscina cúbica de 6 m de profundidad, llena de agua a 0°C. Supongamos que para calentarla hasta 100°C se invierten

$$6 \times 6 \times 6 \times 1000 \times 100 = 21.600.000 \text{ kcal.}$$

Como una caloría equivale a 4270 julios, la energía del agua contenida en la piscina aumentó en 90.000.000.000 J. Esta magnitud constituye exactamente una milésima de los 90 billones de julios y, por consiguiente, tiene una masa equivalente a una milésima de gramo, es decir, a 1 mg. El peso del agua de la piscina (216 t) se acrecentó en 1 g, o sea, en una cantidad imposible de registrar.

Ahora está claro, por qué no advertimos el peso de la energía de los fenómenos que tienen lugar a nuestro alrededor. En la vida cotidiana y en la técnica podemos atenarnos firmemente a la noción tradicional de la energía como algo absolutamente imponderable. La física de los procesos de producción no sufre cambio alguno porque hayamos descubierto que la energía tiene peso.

Es distinto el caso de los fenómenos a escala universal, en los cuales intervienen enormes cantidades de energía. Por ejemplo, el Sol emite tanta energía que su pérdida de masa ya debe de ser notable. Hagamos el cálculo. Cada metro cuadrado de superficie dispuesta perpendicularmente a los rayos solares en el límite superior de la atmósfera terrestre, recibe del Sol 1/3 kcal por segundo. Esta magnitud equivale a $4270 \times 1/3 \sim 1423$ J. Para tomar en consideración la energía total emitida por el Sol en todos los sentidos, supongamos que este astro se encuentra dentro de una esfera hueca de radio igual a la distancia de la Tierra al Sol (150.000.000.000 km). El área de la superficie de semejante esfera será de

$$4 \times 3,14 \times 150.000.000.000^2 \approx 28 \times 10^{22} \text{ m.}$$

Cada metro cuadrado de la superficie recibe 1423 J de energía, mientras que al área calculada llegan

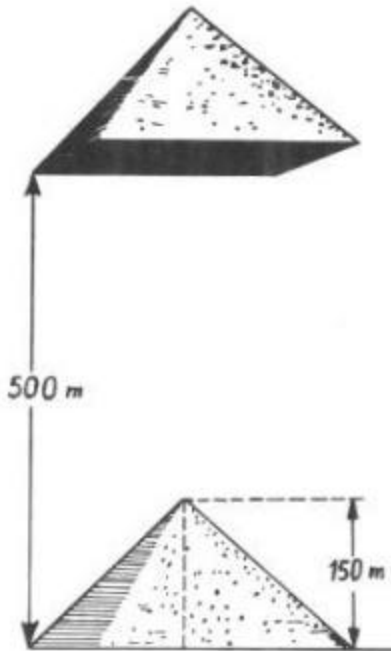
$$1423 \text{ J} \times 28 \times 10^{22} \approx 4 \times 10^{26} \text{ J}$$

Ya hemos dicho que cada 90 billones de julios de energía poseen una masa de 1 g. Por consiguiente, la cantidad de energía que el Sol emite cada segundo tiene una masa igual a

$$4 \times 10^{26} / 9 \times 10^{12} = 4,5 \times 10^{12} \text{ g.}$$

Este dato quiere decir que el astro pierde cada segundo cerca de 4.500.000.000.000 g, equivalentes a 4.500.000 t.

El peso de cada una de las pirámides más grandes de Egipto es aproximadamente igual a esta magnitud. Las pirámides de Egipto figuran entre las obras más pesadas que hay en el mundo. Mientras usted estuvo leyendo estas líneas, varios centenares de semejantes «pirámides» abandonaron la superficie incandescente del astro.



La energía necesaria para elevar esta pirámide a una altura de 500 m, posee una masa de 2,4 g

Como el Sol pierde continuamente una masa equivalente a 30.000.000 de «pirámides» de Egipto al año, ¿afecta este hecho la estabilidad de nuestro sistema planetario? ¿Altera su orden? ¿Influye en la orbitación de los planetas? Indudablemente, estas alteraciones han de tener lugar. Pero la masa de nuestro sol es increíblemente enorme, de modo que esta pérdida no es notable. Se ha calculado que a consecuencia de la disminución de la masa solar, la Tierra está alejándose paulatinamente del astro; cada año su órbita se ensancha en 1 cm. Tendrá que pasar un millón de años para que el año terrestre aumente en 4 segundos como resultado de este fenómeno. Como vemos, desde el punto de vista práctico la masa solar se reduce en una magnitud muy insignificante.

En épocas remotas, cuando el Sol estaba más caliente y emitía mayor cantidad de energía, la pérdida de masa solar era más considerable, por lo cual se notaban más las consecuencias derivadas de este fenómeno. Recordemos que la Tierra se formó hace 2.000.000.000 de años aproximadamente. Por consiguiente, considerando la pérdida de masa solar, en aquella época lejana la órbita de nuestro planeta era más estrecha, por lo cual el año duraba menos. Si suponemos que en la época temprana de existencia de la Tierra la intensidad de radiación solar era 1000 veces mayor, resulta que en aquel entonces el año era 40 días menor que ahora: duraba 325 días.

éstas son algunas de las consecuencias debidas a la ponderabilidad de la energía; no se advierten en la vida cotidiana, pero se vuelven notables si se examinan desde el punto de vista de los procesos universales.

238. La mecánica escolar y la teoría de la relatividad.

¿Cómo deberíamos enfocar la mecánica escolar desde el punto de vista de la teoría de la relatividad? ¿Tiene aún validez?

Desde que en la ciencia se estableció el llamado principio de relatividad de Einstein, las leyes fundamentales de la mecánica tradicional ya no parecen tan firmes como antes, aunque

generalmente se creía que se mantendrían inalterables eternamente. Entre los no especialistas que oyeron algo de esta revolución ocurrida en la ciencia, se arraigó la opinión de que los principios de la mecánica creada por Galileo y Newton, sobre los cuales se asientan la técnica y la industria, se han vuelto obsoletos y deben ir a parar al archivo de la ciencia.

Hubo una época en que el hecho de que las tesis de la mecánica clásica seguían figurando en los libros de texto y en las publicaciones sobre temas técnicos, dejaba perplejas a las personas no muy enteradas de cómo es el estado de cosas en ese terreno. Incluso a veces se llegaba a calificar de retrógrados a los autores de artículos y libros técnicos que se atenían en sus cálculos a la «ley metafísica de independencia de la acción de las fuerzas», establecida por Galileo, a la ley de invariabilidad de la masa, formulada por Newton, etc. Para esclarecer el asunto, vamos a analizar una de las leyes fundamentales de la mecánica clásica a saber, la de adición de velocidades. Conforme a esta ley, la regla de adición de las velocidades v y v_1 cuyos sentidos coinciden, tiene la siguiente forma matemática:

$$u = v + v_1$$

La teoría de la relatividad rechazó esta ley simple y la sustituyó por otra, más compleja, con arreglo a la cual la velocidad u siempre es menor que $v + v_1$. La ley clásica resultó ser errónea. Pero ¿hasta qué punto? ¿Sufriremos algún daño si seguimos aplicando la regla antigua? Vamos a examinar la nueva fórmula de adición de velocidades. Hela aquí:

$$u = \frac{v + v_1}{1 + \frac{vv_1}{c^2}}$$

En esta expresión, las letras u , v y v_1 denotan lo mismo que antes, mientras que c designa la velocidad de la luz. Esta nueva fórmula sólo difiere de la antigua en el término vv_1/c^2 , el cual suele tener valores muy pequeños si las velocidades v y v_1 no son muy elevadas, puesto que la velocidad de la luz c es extremadamente alta. Lo explica el siguiente ejemplo concreto.

Hagamos un cálculo para velocidades no muy grandes, típicas para la técnica moderna. La máquina más rápida es la turbina de vapor. Al dar 30.000 revoluciones por minuto y tener 15 cm de diámetro, su rotor desarrolla una velocidad lineal de 225 m/s. Los obuses tienen una velocidad más elevada, de 1 km/s. Adoptemos $v = v_1 = 1$ km/s y sustituyámosla en ambas fórmulas, antigua y nueva; c es la velocidad de la luz, igual a 300.000 km/s. Según la fórmula clásica $u = v + v_1$, $u = 2$ km/s. La fórmula nueva adopta la forma

$$u = \frac{2}{1 + \frac{1}{90.000.000.000}}$$

y proporciona el resultado siguiente:

$$u = 1,999\,999\,999\,998 \text{ km/s.}$$

Por supuesto, hay cierta diferencia, pero ¡tan sólo equivalente a una milésima del diámetro del átomo más pequeño!

Recordemos que las mediciones más exactas de la longitud no sobrepasan la séptima cifra del resultado, en tanto que en la técnica se suele conformar con la cuarta o la quinta cifras; en nuestro caso los resultados obtenidos sólo difieren en la decimosegunda cifra, de modo que la diferencia vale

0,000 000 000 002.

El resultado casi no cambia si la velocidad es más alta aún; por ejemplo, en el caso de las naves propulsadas por cohetes cuya velocidad supera decenas de veces la del obús. Por tanto, para la técnica la ley «clásica» de adición de velocidades no se ha vuelto «metafísica»: ésta sigue controlando todos los movimientos. Y sólo si las velocidades son mil veces superiores a la del cohete interplanetario (es decir, de decenas de miles de kilómetros por segundo) empieza a sentirse la inexactitud de la regla antigua de adición de velocidades. No obstante, por el momento la técnica no tiene que enfrentarse con semejantes velocidades que se examinan en la física teórica y en la experimentación en el laboratorio, en cuyo caso se utiliza la fórmula nueva.

Ahora abordemos la ley de constancia de la masa. La mecánica newtoniana está basada en la tesis de que la masa es inherente a un cuerpo dado, independientemente del estado en que éste se encuentra. La einsteiniana, en cambio, afirma lo contrario: la masa de un cuerpo no es constante, sino que aumenta cuando dicho cuerpo está en movimiento. Si esto es así, ¿serán erróneos todos los cálculos técnicos convencionales?

Examinando el ejemplo de un obús disparado, vamos a ver si podemos o no determinar la diferencia esperada. ¿En qué cantidad aumentará la masa del obús durante el movimiento? La teoría de la relatividad sostiene que el aumento de masa del cuerpo en movimiento, cuya masa en estado de reposo era m , es igual a

$$m \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right]$$

donde v es la velocidad del cuerpo y c , la de la luz.

Si usted efectúa el cálculo para $v = 1$ km/s, hallará que el incremento de masa de un proyectil disparado equivale a

0,000 000 000 005

de su masa en estado de reposo.

Según vemos, la masa ha aumentado en una magnitud imposible de determinar mediante el pesaje más exacto. La balanza más exacta permite determinar la masa con una exactitud de hasta 0,00000001 de su valor. Por cierto, semejante utensilio sería incapaz de registrar una diferencia mil veces mayor que la que generalmente es despreciada por la mecánica vieja.

En el futuro, durante los vuelos de las naves interplanetarias que se desplazarán con velocidades de una decena de kilómetros por segundo, la masa de todos los objetos dispuestos en ellas aumentará en 0,0000000005 del valor de su masa en reposo. Esta magnitud es mayor, pero tampoco será posible medirla.

Por consiguiente, en lo que se refiere a la ley de constancia de la masa, hemos de repetir lo que explicamos respecto de la ley de adición de velocidades: prácticamente, esta ley sigue en vigor, de modo que los ingenieros pueden aplicarla sin temor a cometer un error notable. Es distinto el caso de los físicos que efectúan cálculos o experimentos con electrones rápidos (su velocidad puede ser del 95% de la de la luz y aún más); éstos tienen que atenerse a las leyes de la nueva mecánica.

Y ¿qué pasa con la constancia de la masa, o sea, con el gran principio de Lavoisier, en la química? Estrictamente hablando, en la actualidad habría que darlo por inexacto. Según Lavoisier, cuando se combinan químicamente 2 g de hidrógeno y 16 g de oxígeno, deberán

proporcionar exactamente 18 g de agua. Pero según Einstein, en vez de 18 g se obtendrá menos, a saber,

$$17,9999999978 \text{ g.}$$

Esta diferencia sólo se advierte sobre el papel; es imposible detectarla mediante una balanza.

Así pues, podemos afirmar, sin restricción alguna, que las tesis de la mecánica de Einstein no cambian nada en la técnica moderna. La industria puede seguir contando con el apoyo seguro de las leyes de la mecánica newtoniana.

239. El litro y el decímetro cúbico.

¿Qué es mayor, un litro o un decímetro cúbico?

Si usted piensa que un litro y un decímetro cúbico son lo mismo, anda equivocado. Estas dos unidades tienen valores similares, pero no son idénticas. El litro homologado del sistema de medidas que se utiliza hoy en día, no se deriva del decímetro cúbico, sino del kilogramo, y constituye el volumen de un kilogramo de agua pura a la temperatura de su densidad máxima. Este volumen supera el del decímetro cúbico en 27 mm^3 .

De modo que un litro es un poco mayor que un decímetro cúbico.

240. El peso del hilo de telaraña.

¿Qué peso tendría un hilo de telaraña tendido de la Tierra a la Luna? ¿Sería posible sostenerlo con las manos?

Sin efectuar un cálculo previo, cuesta trabajo dar una respuesta verosímil a esta pregunta. El cálculo es bastante fácil; helo aquí: si el diámetro del hilo de telaraña es de $0,0005 \text{ cm}$ y la densidad, de 1 g/cm^3 , un hilo de 1 km de longitud pesaría

$$\frac{3.14 \cdot 0.0005^2}{4} \cdot 100.000 \approx 0.02 \text{ g}$$

mientras que el peso de un hilo de 400.000 km de longitud (equivalente a la distancia aproximada de la Tierra a la Luna) sería de $0,02 \text{ g} \times 400.000 = 8 \text{ kg}$.

Semejante carga se podría sostener con las manos.

241. Las botellas y los barcos.

a) Dos barcos marchan por un río en el mismo sentido, pero con velocidades diferentes. En el instante en que uno pasa al lado del otro, desde cada uno de ellos se arroja una botella. Después de marchar un cuarto de hora los buques viran y avanzan con las mismas velocidades hacia donde flotan las botellas.

¿Cuál de ellos llegará primero adonde están las botellas, el rápido o el lento?

Resuelva el mismo problema suponiendo que inicialmente los buques iban uno al encuentro del otro.

A las dos preguntas hay que responder de la misma manera: los barcos volverán a las respectivas botellas simultáneamente. Al resolver este problema se puede considerar, en primer lugar, que la corriente lleva las botellas y los barcos a una misma velocidad y, por consiguiente, no cambia la posición de unas respecto de otros. Por ello, es lógico suponer

que la velocidad de la corriente es nula. Bajo esta condición, es decir, navegando en agua quieta, los barcos tardarán el mismo tiempo en alcanzar sus respectivas botellas (después de volver atrás) que invirtieron en alejarse de ellas, es decir, un cuarto de hora.

242. En la plataforma de una báscula.

De pie en la plataforma de una báscula en equilibrio se encuentra una persona, que, en cierto momento, flexiona un poco las piernas. ¿Hacia dónde se desplazará en este instante la plataforma, hacia abajo o hacia arriba?

Sería un error suponer que la plataforma no se moverá a consecuencia de que el peso de la persona no cambia al flexionar las piernas. La fuerza que empuja el cuerpo hacia abajo cuando uno flexiona las piernas, empuja sus pies hacia arriba, a consecuencia de lo cual disminuye la presión sobre la plataforma y ésta debe subir.

243. Salto retardado.

El que escribe estas líneas recibió unas cuantas cartas cuyos autores pedían que les explicase cómo había podido establecer su récord mundial un paracaidista ruso. Éste estuvo en caída libre durante 142 s sin abrir el paracaídas y, habiendo descendido 7900 m, tiró del anillo de apertura del artefacto. Este hecho no concuerda con las leyes de la caída libre de los cuerpos. Es fácil cerciorarnos de que el deportista sólo debería tardar 40 s en descender en caída libre 7900 m, en vez de los 142 s. Si estuvo en caída libre durante 142 s, no debería salvar una distancia de 7,9 km, sino de unos 100 km. ¿De qué forma hay que resolver esta contradicción?

Esta contradicción se debe a que el descenso del deportista con el paracaídas plegado fue considerado erróneamente como caída libre, no frenada por la resistencia del aire. Pero en este caso la caída difiere notablemente de la que se produce en un medio que no opone resistencia.

Tratemos de examinar, aunque sea a grandes rasgos, lo que sucede durante el descenso sin abrir el paracaídas. Vamos a utilizar la fórmula aproximada que dedujimos experimentalmente para determinar la resistencia f que el aire opone en estas condiciones:

$$f = 0,3 \times v^2 \times H$$

donde v es la velocidad de caída en m/s. Según vemos, la resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad, y como el paracaidista desciende con rapidez creciente, en cierto instante la fuerza de resistencia equivale al peso de su cuerpo. A partir de ese instante la velocidad de caída ya no aumenta, y el proceso se vuelve uniforme.

Para el paracaidista ese instante llegará cuando su peso (más el del paracaídas) valga $0,3 \times v^2$. Suponiendo que el del paracaidista equipado es de 900 N, obtenemos

$$0,3 \times v^2 = 900,$$

de donde $v = 55$ m/s.

De manera que esa persona cae aceleradamente mientras su velocidad sea inferior a los 55 m/s. ésta es su velocidad de descenso máxima que en lo sucesivo no aumentará. Vamos a determinar (también aproximadamente) en cuántos segundos alcanza la máxima. Tengamos en cuenta que al comenzar a descender, cuando la velocidad no es muy grande, el aire presta muy poca resistencia, por lo cual el cuerpo está en caída libre, es decir, se desplaza con la aceleración de $9,8 \text{ m/s}^2$. No obstante, después, cuando el descenso se vuelve

uniforme, la aceleración se anula. Para realizar un cálculo aproximado podemos admitir que la aceleración media era igual a

$$\frac{9.8 + 0}{2} = 4.9 \text{ m/s}^2$$

Por consiguiente, si suponemos que el incremento de la velocidad por segundo era de 4,9 m/s², el paracaidista empezó a descender a la velocidad de 55 m/s al cabo de

$$55 / 4,9 = 11 \text{ s.}$$

En este caso la distancia S que el cuerpo recorre en 11 s desplazándose aceleradamente, es igual a

$$S = \frac{at^2}{2} = \frac{4.9 * 11^2}{2} \approx 300 \text{ m}$$

Ahora disponemos de todos los datos relativos al descenso del paracaidista que durante los primeros 11 s cayó con una aceleración gradualmente decreciente, hasta que, al término de un trecho de unos 300 m de longitud, alcanzó la velocidad de 55 m/s; a continuación, mientras no abrió el paracaídas, siguió cayendo uniformemente con esta misma velocidad. Según nuestro cálculo aproximado el movimiento uniforme duró

$$(7900 - 300) / 55 \approx 138 \text{ m,}$$

y el salto retardado,

$$11 + 138 = 149 \text{ s,}$$

lo cual difiere muy poco de la duración real (142 s).

Este cálculo sencillo viene a ser una primera aproximación a la realidad, puesto que está basado en una serie de suposiciones que lo simplifican.

Para comparar, ofrecemos los datos obtenidos experimentalmente: con su equipamiento que pesa 8,2 N, el paracaidista alcanza la velocidad máxima en el duodécimo segundo, mientras desciende 425 ó 460 m.

244. Dos bolas.

Una de dos bolas iguales desciende por un plano inclinado y la otra, por los bordes de dos tablas de sección triangular dispuestas paralelamente. La pendiente del plano y la altura del punto de partida son iguales para ambos cuerpos.

¿Cuál de las bolas será la primera en recorrer la pendiente?

Ante todo, vamos a señalar que la reserva inicial de energía potencial de ambas bolas es igual, puesto que tienen idénticas masas y descienden desde una misma altura. Pero hay que tener en cuenta que para la que rueda por entre dos tablas, el radio del círculo de rodadura es menor que para la otra que desciende por el plano ($r_2 < r_1$).

Lo mismo que en el problema 44, para la bola que desciende por el plano, tenemos la expresión siguiente:

$$ph = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{K\omega_1^2}{2}$$

Para su gemela que rueda por entre dos tablas,

$$ph = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{K\omega_2^2}{2}$$

Sustituyendo

$$\omega_1 = \frac{v_1}{r_1} \quad y \quad \omega_2 = \frac{v_2}{r_2}$$

obtenemos la expresión siguiente:

$$\frac{mv_1^2}{2} + \frac{Kv_1^2}{2r_1^2} = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{Kv_2^2}{2r_2^2}$$

Después de efectuar la transformación

$$v_1^2 \left(\frac{m}{2} + \frac{K}{2r_1^2} \right) = v_2^2 \left(\frac{m}{2} + \frac{K}{2r_2^2} \right)$$

obtenemos

$$\frac{v_1^2}{v_2^2} = \frac{\frac{m}{2} + \frac{K}{2r_2^2}}{\frac{m}{2} + \frac{K}{2r_1^2}}$$

Como hemos definido que $r_2 < r_1$, en esta expresión el numerador de la fracción de la derecha es mayor que el denominador y, por consiguiente, $v_1 < v_2$: la bola que desciende por el plano tiene mayor velocidad que la otra, y recorrerá su trecho antes.

245. Caída «superacelerada».

Supongamos que a una tabla que puede deslizarse verticalmente hacia abajo por las ranuras practicadas en dos montantes: está fijada por los extremos una cadena; está fijado un péndulo desviado hacia un lado respecto de la posición de equilibrio; está fijado un frasco abierto con agua.

¿Qué pasará con estos objetos si la tabla empieza a bajar con aceleración g , que supera la de caída g ?

1) En el caso de la caída «superacelerada» los puntos en que están fijados los extremos de la cadena, descenderán más rápidamente que sus eslabones; estos últimos, a su vez, tenderán a caer con una aceleración $g < g_1$. Los eslabones medios quedarán rezagados de los extremos, de modo que la cadena se arqueará hacia arriba por la acción del exceso de

aceleración $g_1 - g$, dirigido también hacia arriba. En otras palabras, la cadena parecerá estar cayendo hacia arriba con la aceleración $g_1 - g$.

2) Por esta misma causa el péndulo se volverá «patas arriba» y oscilará en torno a la posición de aplomo con un período

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_1 - g}}$$

donde l es la longitud reducida del artefacto.

3) Como el frasco estará descendiendo con una velocidad algo mayor que la de su contenido, el agua se verterá hacia arriba y estará cayendo encima de él.

246. **En una escalera mecánica.**

En una de las estaciones del metro de Moscú, un pasajero tarda 1 min 20 s en ascender mediante una escalera mecánica desde su punto más bajo hasta el más alto y tarda 4 min en subir caminando por esta misma escalera cuando permanece parada.

¿Cuánto tiempo necesitará el pasajero para ascender caminando por la escalera en dirección de su movimiento mientras funciona?

En un segundo los peldaños de la escalera mecánica se desplazan en $1/80$ parte de su altura total. Cuando la escalera permanece fija, en este mismo lapso el pasajero sube a pie en $1/240$ parte de la altura total. Por consiguiente, caminando por la escalera en movimiento ascendente, en 1 s la persona ascenderá en

$$\frac{1}{80} + \frac{1}{240} = \frac{1}{60} \text{ parte}$$

se de su altura y tardará

$$\frac{1}{\frac{1}{60}} = 60s$$

en recorrerla a todo su largo; es decir, tardará en ascender 1 minuto.