

Capítulo Cuarto

FENÓMENOS TÉRMICOS

111. El origen de la escala de Reaumur
112. El origen de la escala de Fahrenheit
113. Longitud de las divisiones de la escala termométrica
114. Termómetro destinado para medir temperaturas de hasta 50°C
115. La graduación del termómetro
116. Expansión térmica del hornigón armado
117. La expansión térmica máxima
118. La expansión térmica mínima
119. Anomalías de la expansión térmica
120. Un agujero abierto en una plancha de hierro
121. La fuerza de dilatación térmica
122. Calentamiento del nivel de burbuja
123. Corrientes de aire
124. Conductividad térmica de la madera y la nieve
125. La sartén de cobre y la sartén de hierro colado
126. Enmasillado de las rendijas de las ventanas
127. En una habitación bien calentada
128. La temperatura del agua en el fondo de un río
129. Congelación de los ríos
130. La temperatura de la atmósfera
131. Intensidad de calentamiento
132. La temperatura de la llama de una vela
133. Los clavos y la llama
134. ¿Qué es la caloría?
135. Calentamiento del agua en tres estados
136. Calentamiento del cm de cobre
137. Los cuerpos de calor específico más elevado
138. El calor específico de los alimentos

139. El metal más fusible
140. El metal más refractario
141. Calentamiento del acero
142. Una botella de agua colocada dentro de trozos de hielo
143. El hielo en el agua
144. El agua congelada en las tuberías
145. El hielo
146. Disminución del punto de fusión del hielo
147. El "hielo seco"
148. El color del vapor de agua
149. La ebullición del agua
150. Calentamiento mediante el vapor
151. Una tetera hirviendo sobre la palma de la mano
152. ¿Prefiere usted comida frita o cocida?
153. ¿Por qué no quema las manos un huevo recién sacado del agua hirviendo?
154. El viento y el termómetro
155. El principio de la pared fría
156. El poder calorífico de la leña
157. El poder calorífico de la pólvora y del queroseno
158. ¿Qué potencia luminosa tiene una cerilla?
159. ¿Cómo se quitan las manchas con una plancha?
160. Solubilidad de la sal común

111. El origen de la escala de Reaumur

¿Por qué en la escala de Reaumur el punto de ebullición del agua está señalado con el número 80?

El termómetro original de Reaumur se parecía muy poco al actual. No era de mercurio, sino de alcohol. Reaumur graduó su escala partiendo de un solo punto de referencia constante, o sea, de la temperatura de fusión del hielo, marcado con el número 1000, y utilizando alcohol cuyo coeficiente de dilatación térmica era igual a 0,0008. El inventor estableció que la división de un grado de la escala termométrica ha de equivaler al aumento del volumen de alcohol en una milésima parte. En este caso el punto de ebullición del agua debería estar 80 grados más alto que el punto de fusión del hielo y correspondería a 1080 grados. Posteriormente señaló el punto de fusión del hielo con 0, por lo cual el de ebullición del agua fue designado (y lo es hasta hoy día) con 80 grados.

112. El origen de la escala de Fahrenheit

¿Por qué en la escala de Fahrenheit el punto de ebullición del agua está marcado con el número 212?

El invierno de 1709 en Europa Occidental fue muy duro. Durante un siglo no hizo tanto frío allí. De modo que era natural que el físico danés Fahrenheit, que vivía en la ciudad de Dantzig, para señalar los puntos constantes de la escala de su termómetro, adoptase por cero la temperatura mínima que se registró aquel invierno. Una mezcla refrigerante de hielo, sal común y sal amoníaca le permitió bajar la temperatura hasta tal grado.

Para marcar otro punto constante de su termómetro, Fahrenheit, siguiendo a sus antecesores (entre ellos Isaac Newton), eligió la temperatura normal del cuerpo humano. En aquel tiempo generalmente se creía que la temperatura del ambiente nunca supera la de la sangre humana, y se suponía que si tal cosa sucede, el hombre morirá (éste es un criterio absolutamente erróneo).

En un principio, Fahrenheit marcó este segundo punto constante con el número 24, por la cantidad de horas del día solar medio, pero posteriormente se dio cuenta de que semejantes divisiones de la escala termométrica eran demasiado grandes. El inventor dividió cada grado en cuatro partes, por lo cual la temperatura del cuerpo humano se designó con el número $24 \times 4 = 96$.

De esta manera estableció definitivamente el valor de la división equivalente a un grado. Graduando la escala de abajo arriba, determinó que la temperatura de ebullición del agua era igual a 212 grados.

¿Por qué Fahrenheit no utilizó la temperatura de ebullición del agua como el segundo punto constante de su termómetro? No lo hizo porque sabía cuán variable es esta magnitud que depende de la presión del aire. La temperatura del cuerpo humano le parecía más segura, pues es más constante. A propósito, es interesante señalar (y es muy fácil comprobarlo mediante el cálculo) que en aquel entonces se creía que la temperatura normal del cuerpo humano era igual a 35,5 grados centígrados (un grado menos que ahora).

113. Longitud de las divisiones de la escala termométrica

¿Son iguales las divisiones de la escala en el termómetro de mercurio? ¿Y en el otro, de alcohol?

Por supuesto, la dimensión de las divisiones de la escala termométrica está sujeta al valor del coeficiente de dilatación térmica del líquido contenido en él. Consta que al elevar la temperatura aumenta el coeficiente de dilatación térmica de todos los líquidos; cuanto más se acerca al punto de ebullición, tanto más aumenta. Lo que acabamos de enunciar, nos permite comprender fácilmente la diferencia entre las escalas del termómetro de mercurio y de alcohol en lo que se refiere a la dimensión de sus divisiones. Por lo general, los termómetros de mercurio están destinados a medir temperaturas muy diferentes del punto de ebullición de ese líquido (357°C). En el intervalo de 0 a 100°C el coeficiente de dilatación del mercurio no crece considerablemente y, dado que la capacidad del tubo de vidrio del termómetro también aumenta al elevar la temperatura, no se advierte la irregularidad de dilatación del mercurio en dicho intervalo. Por ello, la escala del termómetro de mercurio es casi uniforme.

A su vez, el alcohol se utiliza en los termómetros destinados a medir la temperatura próxima al punto de ebullición de ese líquido (78°C), por lo cual es ostensible el aumento de su coeficiente de dilatación térmica al aumentar la temperatura. Si el volumen del alcohol a 0°C se toma igual a 100, su volumen a 30°C equivaldrá 103, y a 78°C será 110.

Queda claro que las divisiones de la escala del termómetro de alcohol deben aumentar desde cero hacia arriba.

114. Termómetro destinado para medir temperaturas de hasta 750°C

¿Es posible fabricar un termómetro de mercurio para medir temperaturas de hasta 750°C ?

Como la temperatura de ebullición del mercurio es de 357°C , y el vidrio se ablanda a 500 ó 600°C , es imposible construir el termómetro de mercurio para medir temperaturas de hasta 750°C .

No obstante, semejantes termómetros se fabrican. Para ello se utiliza el cristal de cuarzo, muy refractario (funde a 1625°C), además, en los tubos debajo del mercurio se encuentra nitrógeno.

Cuando aumenta la temperatura, la columna de mercurio empieza a comprimirlo, a consecuencia de lo cual este líquido se calienta a presión elevada (de 50 a 100 at.). Por consiguiente, se eleva el punto de ebullición, y el mercurio se mantiene líquido a una temperatura de hasta 750°C . Los termómetros de este tipo son muy caros.

115. La graduación del termómetro

Un folleto traducido del francés al ruso por León Tolstói, contiene la siguiente crítica relativa a los termómetros:

"El grado no es igual al comienzo y al final de la escala termométrica; el hecho de que los grados son espacios iguales, demuestra que la razón de cada uno de ellos al volumen del líquido que se dilata a todo lo largo del tubo, no puede ser constante."

O sea, si, por ejemplo, la longitud de la división correspondiente a un grado mide 1 mm., la columna de mercurio de tanta altura a 0°C contiene una parte mayor del volumen de mercurio que la misma columna de este líquido a 100°C , cuando aumenta su volumen total. "Por tanto — concluye el autor—, no podemos dar por iguales los correspondientes intervalos de temperatura."

¿Tendrá algún fundamento esta crítica?

El autor del folleto (y también León Tolstói, quien compartía su punto de vista) pretende refutar la siguiente tesis, sobre la cual está basado el diseño de la escala termométrica:

“Iguales intervalos de temperatura corresponden a incrementos absolutamente iguales de volumen de la sustancia termométrica.”

Descartando esta tesis, el crítico propone sustituirla con la que sigue, que da como la única correcta:

“Iguales intervalos de temperatura corresponden a incrementos relativamente iguales de volumen de la sustancia termométrica.”

No obstante, discutir cuál de estas dos afirmaciones es verdadera, sería lo mismo que discutir cuál de las unidades de longitud es más idónea para medir la distancia, el metro o el pie. Ambas tesis son convencionales, de modo que sólo se puede hablar de cuál de ellas es más conveniente, es decir, cuál de las dos hace más clara la ciencia del calor.

Semejante planteamiento ya había sido enunciado en su tiempo por Dalton, por lo cual se denomina “escala de Dalton”. Ésta, si hubiera sido aceptada, no tendría puntos de cero absoluto: en general, toda la ciencia del calor, quedaría reformada considerablemente. Esta reforma, lejos de simplificar, complicaría extremadamente la enunciación de las leyes de la naturaleza. Por lo tanto, la escala daltoniana fue rechazada.

116. Expansión térmica del hormigón armado

¿Por qué no se separan los componentes del hormigón armado —el hormigón y el entramado metálico— durante el calentamiento?

El coeficiente de dilatación térmica del hormigón (0,000012) es igual al del hierro; cuando varía la temperatura, ambos materiales se dilatan de igual manera y por eso no se separan uno de otro.

117. La expansión térmica máxima

Cite un sólido que se expande más que los líquidos al calentarlo.

Cite un líquido que se expande más que los gases durante el calentamiento.

La cera es el sólido que se dilata más que los otros, incluso más que muchos líquidos. Su coeficiente de dilatación térmica es de 0,0003 a 0,0015, dependiendo de la especie, es decir, es 25 ó 120 veces mayor que el del hierro. Como el coeficiente de dilatación cúbica del mercurio vale 0,00018, y del queroseno, 0,001, la cera se dilata más que el mercurio, además, algunas de sus especies se expanden más que el queroseno.

El líquido que se dilata más que los restantes es el éter cuyo coeficiente de dilatación es 0,0016. Pero esta sustancia no bate el récord de dilatación térmica: hay un líquido que se expande 9 veces más que ella, a saber, el anhídrido carbónico líquido (CO_2) a 20° C. Su coeficiente de dilatación térmica es 0,015, o sea, supera 4 veces al de los gases. Por lo general, el coeficiente de dilatación térmica de los líquidos aumenta más rápidamente al acercarse a la temperatura crítica, superando muchas veces al de los gases.

118. La expansión térmica mínima

¿Qué sustancia se dilata menos que otras durante el calentamiento?

El vidrio de cuarzo posee el menor coeficiente de dilatación térmica: 0,0000003, o sea, 40 veces menor que el del hierro. Se puede sumergir en agua helada un matraz de vidrio de cuarzo, caldeado hasta 1000° C (este vidrio funde a 1625° C), sin temor a que se rompa. El coeficiente de dilatación térmica del diamante también es muy pequeño, 0,0000008, aunque supera un poco el del vidrio de cuarzo.

El metal que tiene el menor coeficiente de dilatación térmica es una marca de acero llamada invar. (del fr. invar, abrev. de invariable). Esta aleación consiste en acero con 36 % de níquel, 0,4 % de carbono y otro tanto de manganeso. Su coeficiente de dilatación es 0,0000009, y el de algunas de sus marcas es menor aún, 0,00000015, es decir, 80 veces menor que el del acero ordinario. Más aún, hay marcas de invar que no se dilatan en absoluto en ciertos intervalos de temperatura.

A su coeficiente de dilatación ínfimo debe este metal sus numerosas aplicaciones; en particular, se emplea con éxito para fabricar piezas de mecanismos de precisión (péndulos de reloj) y aparatos para medir longitudes.

119. Anomalías de la expansión térmica

¿Qué sólido se contrae cuando se calienta y se dilata cuando se enfría?

Por lo general, a la pregunta de cuál de los cuerpos se dilata al ser enfriado, se suele responder a la ligera: el hielo, olvidando

que el agua posee esta dilatabilidad anómala sólo en estado líquido. El hielo, en cambio, no se dilata al ser enfriado, sino que se contrae, lo mismo que la mayoría de los cuerpos de la naturaleza. No obstante, existen otros sólidos que se dilatan cuando se enfrían por debajo de cierta temperatura. En primer lugar, son el diamante, el óxido cuproso y la esmeralda.

El diamante comienza a dilatarse al ser enfriado considerablemente, a saber, a 42°C bajo cero, mientras que el óxido cuproso y la esmeralda presentan la misma particularidad con un frío moderado, de unos 4°C bajo cero. Luego a 42 y 4 grados centígrados bajo cero, respectivamente, estos cuerpos tienen la densidad máxima, lo mismo que el agua a $+4^{\circ}\text{C}$.

El yoduro de plata cristalino (el mineral llamado yodirita, yodargirita o yodargira) se dilata al ser enfriado a temperatura ordinaria. Una varilla de goma extendida por una pesa presenta la misma particularidad: se acorta al ser calentada.

120. Un agujero abierto en una plancha de hierro

En el centro de una plancha de hierro de 1 m. de ancho hay un agujero de 0,1 mm. (de grosor de un cabello humano). ¿Cómo debe variar la temperatura del metal para que el agujero se cierre por completo?

Sería erróneo creer que si la plancha se calienta considerablemente, el orificio se cerrará a consecuencia de la dilatación térmica. Por más que se la caliente, será imposible obtener semejante resultado, puesto que durante el calentamiento aumentan las dimensiones de los orificios. Esto lo explica el razonamiento siguiente.

Si no hubiera agujero, la sustancia que estaría en su lugar, se dilataría de la misma manera que el resto de la plancha: en

otro caso esta última se plegaría o rompería; al contrario, se sabe que un cuerpo homogéneo que experimenta dilatación térmica, no se pliega ni se rompe. Queda claro, pues, que la plancha con agujero se dilataría como si no lo tuviera: o sea, durante el calentamiento el orificio aumentaría de la misma manera que cualquier parte de la plancha de área igual. Por consiguiente, la capacidad de los recipientes y el área de la sección interior de las tuberías, así como las cavidades de los cuerpos aumentan durante el calentamiento (y disminuyen durante el enfriamiento); en este caso el coeficiente de dilatación es el mismo que el de la sustancia que compone todo el cuerpo.

Así pues, es imposible cerrar un agujero calentando el objeto en el cual está practicado; por el contrario, su volumen aumentará. ¿Sería posible obtener este resultado mediante el enfriamiento? ¿Sería posible enfriar la plancha de hierro de modo que el agujero desaparezca?

A consecuencia de que el coeficiente de dilatación del hierro es 0,000012, mientras que sólo es posible enfriarlo hasta 273° C bajo cero, queda claro, pues, que el diámetro del agujero no se podría disminuir más que en $0,000012 \times 273$, o sea, aproximadamente en 0,003.

Consiguientemente, por más que cambie la temperatura, sería imposible cerrar un orificio practicado en un sólido, por pequeño que sea.

121. La fuerza de dilatación térmica

¿Es posible impedir mecánicamente la dilatación térmica de una barra metálica o de la columna de mercurio?

Es sabido que la dilatación y contracción térmicas poseen fuerza considerable. El físico inglés J. Tyndall realizó un

experimento, en el cual una barra de hierro, al contraerse debido al enfriamiento, rompió una varilla de hierro del grosor de un dedo. Por esta razón, muchos piensan que es imposible contrarrestar la fuerza de dilatación térmica de una barra o un líquido sometidos a calentamiento.

Este criterio es erróneo: a pesar de que son enormes las fuerzas moleculares que condicionan la dilatación térmica, se trata de magnitudes finitas. Por ello, es fácil calcular la fuerza que se ha de aplicar a una varilla de hierro de 1 cm² de sección transversal para impedir que se alargue al calentarla de 0 a 20° C. Sólo se necesita conocer el coeficiente de temperatura de dilatación lineal del material (el del hierro es igual a 0,000012° C⁻¹) y su resistencia al alargamiento mecánico caracterizada por el llamado módulo de elasticidad, o módulo de Young (el del hierro es de 20.000.000 N/cm²; quiere decir que al aplicar una fuerza de 10 N por centímetro cuadrado a una varilla de hierro, su longitud aumentará en dos millonésimas y disminuirá en la misma magnitud al comprimiría con la misma fuerza).

He aquí el cálculo correspondiente. Supongamos que hay que impedir que una varilla de hierro de 1 cm² de sección transversal se alargue en

$$0,000012 \times 20 = 0,00024$$

de su longitud. Para acortar la varilla en dos millonésimas se requiere un esfuerzo mecánico de 10 N. Por consiguiente, para acortarla en 0,00024 de su longitud, hará falta un esfuerzo de

$$0,00024 : (1/20.000.000) = 480 \text{ N}$$

De modo que si aplicamos a cada uno de los extremos de semejante varilla un esfuerzo de 500 N aproximadamente,

entonces, al calentarla de 0 a 20° C, su longitud no aumentará. En este caso la fuerza de dilatación de la varilla también valdrá 500 N

De la misma manera se calcula la presión que impide que la columna de mercurio del tubo del termómetro se alargue durante el calentamiento. Tomemos el mismo intervalo de temperatura, de 0 a 20° C. El coeficiente de dilatación del mercurio es 0,00018; bajo la presión de 1 at. su volumen disminuye en 0,000003 del inicial. En nuestro caso tenemos que impedir que el mercurio se dilate en

$$0,00018 \times 20 = 0,0036$$

Por lo tanto, para evitar la dilatación del líquido, habrá que aplicar una presión de

$$0,0036 : 0,000003 = 1200 \text{ at.}$$

Este hecho comprueba que si el canal del termómetro se llena con nitrógeno comprimido hasta una presión de 50 ó 100 at. (véase la respuesta 114), el grado de dilatación de la columna de mercurio no variará de manera notable.

122. Calentamiento del nivel de burbuja

La longitud de la burbuja del nivel varía al cambiar la temperatura ambiente.

¿Cuándo la burbuja tiene dimensiones mayores, cuando hace frío o calor?

Con frecuencia a esta pregunta se suele responder que en épocas calurosas las dimensiones de la burbuja son mayores

que en tiempo de frío, puesto que el gas contenido en ella. se expande debido al calor. No obstante, se olvida que en semejantes condiciones el gas no puede dilatarse: se lo impide el líquido encerrado en la ampolla. Se calientan todos los elementos del utensilio, tanto el bastidor y el tubo de cristal como el líquido y el gas de la burbuja. El bastidor y el tubo se dilatan muy poco; en cambio, el líquido se dilata más que el tubo y, por ende, deberá comprimir la burbuja.

Así que, cuando hace calor, las dimensiones de la burbuja del nivel son menores que cuando hace frío.

123. Corrientes de aire

He aquí un fragmento tomado de una revista técnica, que describe las condiciones que favorecen la ventilación natural de los locales con calefacción.

“En los locales con calefacción central las condiciones son muy desfavorables para la ventilación natural, pues, el aire sólo circula de arriba abajo. Por ello, en tales locales hay que dejar abierto el postigo de la ventana durante largo tiempo o poner a funcionar ventiladores.

Todo orificio sirve para ventilar la habitación. El aire viciado, teniendo temperatura más alta, sale por él, y el aire fresco ocupa su lugar entrando por las rendijas de las puertas y las ventanas y aun colándose por las paredes. Si en la habitación hay una chimenea, la ventilación es más intensa. Al quemar leña se consume parte del oxígeno contenido en el aire que hay en la habitación. Los productos de combustión salen por la chimenea, y el aire fresco entra en el cuarto ocupando su lugar.”

¿Es correcta la descripción de las corrientes de aire?

Este fragmento está redactado en la forma en que se solía razonar hace más de trescientos años, cuando ni se sospechaba la existencia de atmósfera, y los cuerpos de la naturaleza se clasificaban en cuerpos pesados que se precipitan a la tierra, y ligeros, que siempre suben. No se debe creer que el aire templado sale por el respiradero, mientras que el aire fresco entra desde afuera en el local para ocupar su espacio, ya que el aire templado no sube por sí mismo, sino que es desplazado hacia arriba por el aire frío que desciende. En el fragmento citado están confundidos la causa y el efecto. El mismísimo Torricelli, cuya famosa experiencia puso fin al temor del vacío, ridiculizó ingeniosamente la teoría que sostenía que los cuerpos ligeros tienden a emerger en el ambiente.

En una de sus Lecturas Académicas dice lo siguiente:

“Un día las nereidas decidieron crear su curso de física. En lo profundo del océano instalaron su academia y se pusieron a explicar los fundamentos de la física, de la misma manera que solemos hacer en nuestras escuelas los que habitamos el océano de aire. Las curiosas nereidas echaron de ver que entre todos los objetos que ellas utilizaban bajo el agua, unos bajaban, en tanto que otros subían. Entonces las ninfas, ni cortas ni perezosas, sin pensar en cómo se comportarían esos mismos objetos si se encontrasen en otros medios, dedujeron terminantemente que unos cuerpos, por ejemplo, la tierra, las piedras y los metales son pesados, pues bajan al fondo; otros, como el aire, la cera y la mayoría de las plantas, son ligeros, ya que aparecen a flor de agua... El equívoco de las jóvenes ninfas, que clasificaron de ligeros los cuerpos que solemos catalogar entre los pesados, es bien perdonable. Me imaginé que he nacido y crecido en un anchuroso mar de mercurio. Enseguida se me ocurrió redactar un tratado de cuerpos pesados y ligeros. Empecé a disertar de la manera siguiente: como vivo en lo profundo de este mar, estoy acostumbrado a guardar todos los materiales,

excepto el oro, bien amarradas para que no emerjan en la superficie. Por tanto, todos los cuerpos en general son ligeros y tienen la virtud natural de subir en el agua, menos el oro que se precipita en el mercurio. Sería muy distinta la física ideada por las salamandras (si es cierto que éstas residen en el fuego); según ellas, todos los cuerpos, incluido el aire, serían pesados.”

“Un libro de Aristóteles contiene la definición siguiente: se considera pesado aquel objeto que tiende hacia abajo; y se considera ligero aquel que tiende hacia arriba. ¿Habrá poca diferencia entre estas definiciones y las que se atribuyen a las nereidas, que concuerdan con las observaciones, pero no han sido rectificadas por la razón?”

Al cabo de tres siglos que transcurrieron desde entonces, no hemos logrado superar las nociones pretorricellianas, pues aún se encuentran afirmaciones sobre el aire templado que “tiende hacia arriba” y el frío que “ocupa su lugar”.

124. Conductividad térmica de la madera y la nieve

¿Qué es lo que resguarda mejor del frío, las paredes de madera o una capa de nieve del mismo espesor?

La nieve protege de la pérdida de calor mejor que la madera: su conductividad térmica es 2,5 veces menor. A la conductividad térmica no muy considerable de la nieve se debe el hecho de que, como suele decirse generalmente, una capa de nieve más o menos gruesa “calienta” la tierra, por lo que ésta cede menos calor al ambiente.

125. La sartén de cobre y la sartén de hierro fundido

¿En qué caso el guisado se achicharra más, cuando se prepara en una sartén de cobre o en una de hierro fundido? ¿Por qué?

La conductividad térmica del hierro fundido es 7,5 veces mayor que la del cobre; quiere decir que en una unidad de tiempo una capa de hierro fundido transmite una cantidad de calor 7,5 veces mayor que otra de cobre del mismo espesor, siendo la misma la diferencia de temperatura a ambos lados de la capa. Queda claro, pues, que en una sartén de hierro fundido puesta sobre el hornillo el guisado se achicharra más que en otra, de cobre.

126. Enmasillado de las rendidas de las ventanas

En los países de clima frío, las ventanas de los edificios tienen bastidores dobles para disminuir las pérdidas de calor durante el invierno. Además, suelen enmasillar las rendijas entre los cristales y el bastidor; no obstante, hay quien aconseja dejar sin enmasillar la rendija superior del marco exterior de las ventanas.

Explique el fundamento físico de este consejo.

Este consejo no tiene ningún fundamento físico: si se deja sin enmasillar alguna rendija, aumenta el escape de calor desde el interior del local, puesto que el segundo marco en cristalado colocado en las ventanas disminuye las pérdidas de calor si el aire comprendido entre los cristales no se comunica en absoluto con el espacio interior y el exterior. Pero si el marco exterior tiene una rendija no enmasillada, el aire frío exterior desplazará

el menos frío que se encuentra entre los cristales, se calentará y será desplazado a su vez por una nueva porción de aire frío colado desde afuera. Como en este caso el aire que ingresa, se calienta entre los cristales a expensas del calor del local, debido al cambio de aire en el espacio entre los marcos disminuirá la temperatura ambiente de la habitación. Cuanto mejor estén enmasilladas las rendijas, tanto mayor será el efecto termoaislante de los marcos de ventana.

127. En una habitación bien calentada

El calor sólo es capaz de transmitirse de cuerpos con temperatura más alta a otros, cuya temperatura es más baja. En una habitación donde hace mucho calor, la temperatura del cuerpo humano es mayor que la del ambiente.

¿Por qué tenemos calor en este caso?

La temperatura de la superficie del cuerpo humano es de 29 (las plantas de los pies) a 35° C (la cara), mientras que la del ambiente de las viviendas no suele exceder los 20° C. Por ello, nuestro cuerpo no puede recibir directamente calor del medio circundante. ¿Por qué, pues, tenemos calor cuando nos encontramos en una habitación?

Tenemos calor no porque nuestro cuerpo lo absorbe del ambiente, sino porque la capa de aire que nos envuelve, lo conduce mal e impide que el cuerpo pierda calor, o sea, disminuye sus pérdidas.

La capa de aire inmediata a nuestro cuerpo se calienta por el calor procedente de éste y es desplazada hacia arriba por otro aire, más frío; este último, a su vez, también se calienta y cede su lugar a otra porción de aire, etc. Es cierto que el aire templado debe absorber menos calor de nuestro cuerpo que el

frío. Por eso tenemos calor estando en un cuarto con buena calefacción.

128. La temperatura del agua en el fondo de un río

¿Cuándo es más alta la temperatura del agua de la capa cercana al fondo de un río profundo, en verano o en invierno?

Muchas veces se dice que en el fondo de ríos profundos la temperatura es una misma, de 4° C sobre cero durante todo el año, pues a esta temperatura la densidad del agua es máxima. Para los estanques y lagos de agua dulce esta afirmación es cierta. Pero en los ríos, contrariamente a lo que se afirma, la distribución de temperaturas es distinta.

El agua de los ríos no sólo se desplaza en el sentido longitudinal, sino también en el transversal, aunque estas corrientes no se advierten a simple vista. De modo que el agua se mezcla constantemente, por lo cual su temperatura junto al fondo es la misma que junto a la superficie.

La respuesta correcta a la pregunta planteada sería la siguiente: “Cerca del fondo del río más profundo la temperatura del agua en verano es más alta que en invierno, en tantos grados en cuantos la del ambiente exterior en verano es más alta que en invierno.”

129. Congelación de los ríos

¿Por qué los ríos de corriente rápida todavía no se congelan cuando la temperatura ambiental es de algunos grados bajo cero?

Muchos piensan que en invierno los ríos de corriente rápida se demoran en congelarse porque las partículas de agua están en constante movimiento. En realidad, esto no es cierto. Las moléculas de agua siguen moviéndose aun cuando no hay corriente, con una velocidad de varios centenares de metros por segundo, por eso un aumento de velocidad de 1 a 2 m/s no influye mucho. Además —y esto es lo más importante— el movimiento del agua del río, tanto longitudinal como vorticial, entremezcla considerables masas de agua, sin alterar el movimiento de unas moléculas respecto a otras, es decir, no cambia el estado térmico del cuerpo.

Por otra parte, el hecho de que los ríos se demoran un poco en helarse al comenzar la época de frío, está condicionado por el movimiento del agua, pero de una manera algo distinta de lo que se suele creer. El agua que corre rápidamente no se congela porque se mezcla, desde el fondo hasta la superficie, por lo que tiene una temperatura más o menos igual. El agua cercana a la superficie, cuya temperatura ha bajado hasta cero grado, enseguida se mezcla con las capas inferiores, que aún no se han enfriado, a consecuencia de lo cual la temperatura de la capa superficial vuelve a ser superior a cero. Los ríos comienzan a helarse cuando la temperatura de toda el agua, desde la superficie hasta el fondo del río, sea igual a cero. Mas, para ello se necesita algún tiempo, tanto mayor cuanto más profundo es el río.

La congelación de los ríos rápidos depende del proceso de mezclado del agua. Si el agua fluye lentamente, la corriente transversal no arrastra hacia el fondo los cristales de hielo formados en la capa superficial; éstos, pegándose unos a otros, cubren la superficie del agua formando una capa sólida. Pero si la corriente es rauda, los mismos son arrastrados hacia abajo, se pegan a los objetos que encuentran y se amontonan estorbando la corriente y provocando inundaciones. En Siberia,

el Angara –único río que nace en el lago Baikal–, de corriente rápida, no se hiela largo tiempo a pesar de que hace muchísimo frío: en esta época en el río se forman grandes masas de hielo que dificultan la corriente. Pero su afluente Irkut, de corriente lenta, se congela a una temperatura de pocos grados bajo cero. A veces, semejante fenómeno se observa en diferentes tramos de un mismo río: si la pendiente es notable, la corriente es rápida y no se hiela largo tiempo, además, se amontonan fragmentos de hielo que provocan inundaciones. Si, en cambio, la corriente es tranquila, el agua se congela prontamente.

130. La temperatura de la atmósfera

¿Por que en las capas superiores de la atmósfera hace más frío que en las inferiores?

Respondiendo a esta pregunta se suele comentar que los rayos solares calientan poco la atmósfera; la calienta más el calor procedente de la superficie terrestre, gracias a la conducción del calor.

“La Tierra se calienta con los rayos solares que atraviesan el aire sin calentarlo. Cuando inciden sobre la superficie terrestre, le transmiten su calor. A su vez, esta última calienta la capa de aire inmediata a ella. Por consiguiente, las capas superiores de aire están más frías que las inferiores.”

Esta explicación fue publicada en una de las revistas de divulgación científica como respuesta a la pregunta de uno de los lectores: “¿Por qué en las capas superiores de la atmósfera hace mucho frío?”

Cabe decir que el agua puesta a calentar en una cacerola se encuentra en las mismas condiciones: este líquido recibe calor del fondo del utensilio que conduce calor, pero sus capas

superiores tienen la misma temperatura que las inferiores. Este hecho se debe al mezclado del líquido calentado por abajo, a la llamada convección. Si la atmósfera fuera líquida, entonces, siendo calentada desde abajo, tendría temperatura igual en cada uno de sus puntos. En la atmósfera gaseosa también hay corrientes provocadas por el calentamiento: el aire frío de las capas superiores desciende desplazando desde abajo el aire templado, pero la temperatura no se iguala. ¿Por qué?

Uno de los libros de texto da la siguiente respuesta que parece bastante verosímil. El aire que sube desde la superficie terrestre, realiza trabajo merced a la energía de su reserva de calor; por ello, cada kilogramo de aire que asciende a 427 m., debe ceder una cantidad equivalente de calor, en este caso, 1 kcal. Si consideramos que el calor específico del aire es de 0,25 kcal / (kg \times grad) aproximadamente, cada 100 m. de altura su temperatura debe variar en 1° C. De hecho se observa una variación similar.

A pesar de que esta explicación concuerda con los datos reales, es del todo errónea, pues se basa en una suposición equivocada de que el aire realiza trabajo mientras asciende. En realidad, en este caso dicho fluido realiza tan poco trabajo como un corcho que emerge en el agua. El corcho no se enfría mientras sube a la superficie desde el fondo de un lago ni realiza trabajo, sino que, por el contrario, sobre él mismo se realiza trabajo. De la misma manera el aire sube, siendo desplazado por la corriente fría que realiza trabajo para elevarlo a expensas de la energía de la masa de aire frío que desciende. Además, ¿se enfría, acaso, una bala disparada hacia arriba que realiza trabajo para subir a cierta altura? Ni mucho menos: mientras disminuye su energía cinética, aumenta la energía potencial, de manera que se observa el balance energético sin que la energía mecánica se convierta en térmica.

Ahora queda claro, por qué es errónea otra explicación del hecho de que las capas superiores de la atmósfera tienen temperatura tan baja: las moléculas del flujo de aire ascendente se desaceleran mientras suben, en tanto que la disminución de su velocidad equivale a la disminución de su temperatura. Esta conclusión también es errónea, pero equivocadamente la hicieron suya incluso algunos experimentadores de gran talla, aunque Maxwell en su *Theory of Heat* prevenía de ella.

“La gravedad decía éste, no influye de ninguna manera en la distribución de temperaturas en la columna de aire”. No debemos hacer caso omiso del hecho de que merced a la gravedad todas las moléculas del gas se desplazan de un modo estrictamente igual, sin alterar la posición de unas respecto a otras: se trata pues, de su traslado paralelo. Por esta razón, el movimiento de una molécula respecto de otras no varía bajo el efecto de la gravedad, lo mismo que al trasladar un recipiente lleno de gas de un lugar a otro. El movimiento térmico de las moléculas no cambia, por ello, tampoco puede cambiar la temperatura del gas.

En realidad, las corrientes ascendentes de aire se enfrían a consecuencia de su expansión adiabática. Al mezclarse con las capas superiores de la atmósfera, cada vez más enrarecidas, el aire realiza trabajo de expansión a expensas de su reserva de calor. Cuando el gas cambia de estado variando también su presión sin recibir energía desde afuera (y sin cederla al medio exterior), se dice que semejante cambio de estado es adiabático.

En términos cuantitativos, hay que examinar este fenómeno de la manera siguiente. Si junto a la superficie terrestre la temperatura del aire es T_0 y a la altura h es T_h , mientras que la presión barométrica es P_0 y P_h , respectivamente, el descenso de la temperatura a la altura h vendrá dado por la expresión siguiente:

$$T_0 - T_h = T_0 \left[\left(\frac{P_0}{P_h} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Aquí, k es la razón de la capacidad calorífica del gas a volumen constante con respecto a su capacidad calorífica bajo presión constante; para el aire $k = 1,4$, por consiguiente, $(k - 1) / k = 0,29$.

Por ejemplo, vamos a calcular el descenso de la temperatura del aire a la misma altura de 5,5 km., donde la presión barométrica es dos veces menor que junto a la superficie terrestre. Para simplificar, vamos a examinar el ascenso de una masa de aire seco. Tenemos, pues, la expresión que sigue:

$$T_0 - T_h = T_0 (2^{0,29} - 1) = 0,22T_0$$

de donde

$$T_h = 0,78T_0$$

Si junto a la superficie terrestre la temperatura es de 17°C , ó 290 K , entonces

$$T_h = 0,78 \times 290 = 226 \text{ K.}$$

Esta magnitud equivale a -49°C , es decir, corresponde a 1°C aproximadamente por cada 100 m. de altura.

La presencia del vapor de agua modifica el cálculo que acabamos de exponer: el descenso de temperatura por cada 100 m. de altura, igual a 1 grado centígrado para el aire seco, disminuye casi en 0,5 grado si el aire contiene vapor de agua.

Así pues, en el seno de la atmósfera calentada por abajo, la mezcla de masas de aire no puede igualar su temperatura: el

aire que asciende, se enfría a consecuencia de la expansión adiabática, mientras que el que desciende, se calienta debido a la compresión adiabática. Por esta razón, las capas superiores de la atmósfera tienen una temperatura menor que las cercanas a la superficie terrestre.

131. Intensidad de calentamiento

¿Se necesita más tiempo para calentar el agua con un mechero de gas de 10 a 20 grados centígrados o de 90 a 100 grados?

Observando el calentamiento del agua con un reloj en la mano, es fácil cerciorarse de que el agua tarda más en calentarse de 90 a 100° C que de 10 a 20° C; y eso que la cantidad de agua disminuye constantemente a consecuencia de la evaporación. Este enigma se descifra de la siguiente manera: el calor de la llama no sólo se invierte en la evaporación intensa de líquido, sino también se disipa en el ambiente debido a la emisión de calor. A temperaturas altas (de 90 a 100° C) el agua emite mayor cantidad de energía que a temperaturas bajas (de 10 a 20° C). Por ello, a pesar de que el agua recibe uniformemente calor, su temperatura aumentará tanto más despacio cuanto más caliente esté el líquido.

132. La temperatura de la llama de una vela

¿Qué temperatura tendrá la llama de una vela esteárica? [un ácido graso sólido orgánico blanco de apariencia cristalina. No es soluble en agua, pero sí en alcohol y éter]

Estamos propensos a subestimar la temperatura de las fuentes de luz tan “modestas” como la llama de una vela ordinaria. Por eso, muchos se sorprenderán al enterarse de que la llama de una vela tiene una temperatura de 1600°C (según estableció O. Lummer con arreglo a la ley de desplazamiento de Wien).

133. Los clavos y la llama

¿Por qué los clavos no se funden en la llama de una vela?

Comúnmente se suele responder de la siguiente manera: “Pues, porque la llama de una vela no produce suficiente calor”. Pero si acabamos de averiguar que la temperatura de la llama de la vela es de 1600°C , es decir, supera en 100° la de fusión del hierro. Resulta, pues, que la llama de la vela da suficiente calor; no obstante, es incapaz de fundir dicho metal.

La causa de esto consiste en que al mismo tiempo que el clavo recibe calor de la llama, lo emite al medio ambiente. Cuanto más sube la temperatura del objeto que se calienta, tanto más intensa es la pérdida de calor; finalmente, en cierto momento la emisión y el suministro de calor se igualan, por lo cual deja de aumentar la temperatura del objeto sometido al calentamiento.

Si la llama, más exactamente, su parte más caliente, envolviera todo el clavo, durante el calentamiento la temperatura máxima de dicho objeto sería igual a la de la llama, y éste se fundiría. Como la llama sólo envuelve parte del clavo, mientras que el resto emite calor, el ingreso y la pérdida de calor se igualarán mucho antes de que la temperatura del metal se iguale con la de la llama, y aun con la de fusión del hierro.

De modo que el clavo no se funde en la llama de la vela porque ésta no lo envuelve enteramente, y no porque produce poco calor.

134. ¿Qué es la caloría?

¿Por qué la definición exacta de la caloría específica que 1 g. o 1 kg. de agua deben calentarse de 14,5 a 15,5 grados centígrados?

La cantidad de calor que se necesita para aumentar la temperatura del agua en un grado, no es estrictamente igual a diferentes temperaturas. Al calentarla de 0 a 27° C. esta cantidad disminuye gradualmente, y a partir de 27° C aumenta. Para que la definición de la caloría sea exacta, es menester especificar a qué temperatura el agua empieza a calentarse en un grado.

He aquí la definición exacta de la caloría, adoptada por un acuerdo internacional: por caloría se entiende la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua de 14,5° a 15,5° bajo una presión atmosférica de 760 mm. de mercurio.

Según se estableció mediante cálculos, esta caloría equivale a su valor medio determinado para un intervalo de temperaturas de 0 a 100° C; a consecuencia del cálculo se eligió la temperatura para una caloría "de 15 grados". A su vez, para el intervalo de 0 a 1° C esta unidad es en un 0,8 % menor que la calculada para los 15° C.

135. Calentamiento del agua en tres estados

¿Qué es más fácil de calentar en una misma cantidad de grados, 1 kg. de agua líquida, 1 kg. de hielo o 1 kg. de vapor de agua?

Lo más fácil es calentar el vapor de agua (su calor específico es de $0,46 \text{ kcal}/(\text{kg} \times \text{grad})$) y luego el hielo (de calor específico igual a $0,505 \text{ kcal}/(\text{kg} \times \text{grad})$); la mayor cantidad de calor se necesita para calentar el agua líquida.

136. Calentamiento de un centímetro cúbico de cobre

¿Qué cantidad de calor se necesita para calentar en 1 grado centígrado 1 cm. de cobre (de calor específico $\sim 0,1$)?

A la pregunta sobre la cantidad de calor que se requiere para calentar en un grado 1 cm^3 de cobre, a veces se suele responder equivocadamente: 0,1 cal, o sea, lo que vale el calor específico de este metal, olvidando que el calor específico no se refiere a la unidad de volumen, sino a la unidad de masa, es decir, no corresponde a 1 cm^3 , sino a 1 g. Para calentar en un grado 1 cm^3 de cobre (cuya densidad es de $9 \text{ g}/\text{cm}^3$) se necesita 0,9 cal en vez de 0,1 cal.

137. Los cuerpos de calor específico más elevado

a) *¿Qué sólido necesita la mayor cantidad de calor para su calentamiento?*

- b) ¿Qué líquido necesita la mayor cantidad de calor para su calentamiento?
- c) ¿Qué sustancia necesita la mayor cantidad de calor para su calentamiento?
- a) Entre los sólidos, el que mayor cantidad de calor necesita para ser calentado, es el metal litio: su calor específico de 1,04 kcal/(kg × grad) es dos veces mayor que el del hielo.
- b) Entre los líquidos, el mayor calor específico lo tiene el hidrógeno líquido (5,4 kcal/(kg × grad)), y no el agua, como se suele creer las más de las veces. El calor específico del amoníaco licuado también es mayor que el del agua (aunque no lo supera mucho).
- c) Entre los cuerpos de la naturaleza, sólidos, líquidos y gaseosos, el que mayor cantidad de calor requiere para ser calentado, es el hidrógeno. El calor específico de esta sustancia al estado gaseoso (a presión constante) es de 3,4, y al estado líquido, de 6,4 kcal/(kg × grad). El calor específico del helio al estado gaseoso (1,25 kcal/(kg × grad)) es más elevado que el del agua.

138. El calor específico de los alimentos

Para conservar los alimentos en frío se necesita conocer su calor específico. ¿Conoce usted el calor específico de la carne, el huevo, el pescado y la leche?

He aquí los datos relativos al poder calorífico (en kcal/kg) de los alimentos enumerados al plantear el problema: carne 1797, pescado 836, huevo 1649 y leche 668.

139. El metal más fusible

¿Cuál de los metales que se mantienen sólidos a temperatura ambiente, se funde más fácilmente?

Entre las aleaciones que se encuentran en estado sólido a temperatura ambiente, es muy fusible la aleación de Wood que consta de estaño (4 partes), plomo (8 partes), bismuto (15 partes) y cadmio (4 partes) y funde a 70°C . Además, existe otra aleación, más fusible aún, que también debe su nombre a su inventor Lipowitz; ésta contiene menor cantidad de cadmio que la de Wood (3 partes en vez de 4) y funde a 60°C .

No obstante, estas aleaciones no ocupan el primer lugar entre los metales más fusibles. El metal galio funde a una temperatura menor aún, a 30°C , es decir, se derruiría en la boca de la persona, por decirlo así. El galio es el elemento 31 de la tabla de Mendeléev, "pronosticado" por D. Mendeléev en 1870 y descubierto por P.E. Lecoq de Boisbaudran en 1875.

El galio se utiliza fundamentalmente en los termómetros en vez del mercurio; su fusión empieza a 30°C y la ebullición, sólo a 2300°C , es decir, este elemento permanece en estado líquido en un intervalo de temperatura muy amplio de 30 a 2300°C . Como existen marcas de vidrio de cuarzo que funden a 3000°C , técnicamente es posible fabricar termómetros de galio. Ya se fabrican termómetros de galio para temperaturas de hasta 1500°C .

140. El metal más refractario

Cite el metal más refractario

Hace mucho que el platino, cuya temperatura de fusión es de 1800°C , ha dejado de ocupar el primer puesto entre los

metales refractarios. Se conocen metales cuyas temperaturas de fusión superan en 500 ó 1000 grados la del platino. Entre ellos figuran el iridio (2350°C), el osmio (1700°C), el tantalio (2800°C) y el tungsteno (3400°C).

El tungsteno es el metal más difícilmente fusible entre los que se conocen (se emplea para los filamentos de lámparas de incandescencia).

141. Calentamiento del acero

¿Por qué se destruye el entramado de acero de los edificios durante el incendio, aunque este metal no se inflama ni se funde por las llamas?

Las barras de acero se vuelven menos resistentes cuando sufren la acción de una temperatura muy alta. A los 500°C su resistencia a la rotura es dos veces menor que a 0°C ; a los 600°C es tres veces menor; a los 700°C disminuye casi siete veces. (He aquí datos más exactos: si adoptamos por unidad su resistencia a 0°C , entonces la resistencia a 500°C valdrá 0,45; a 600°C , 0,3; a 700°C , 0,15.) Por esta razón, durante los incendios las estructuras de acero se desploman bajo la acción de su peso.

142. Una botella de agua colocada dentro de trozos de hielo

- a) *¿Se podría colocar una botella tapada llena de agua dentro de una masa de hielo en derretimiento sin temor a que se rompa?*

- b) Una botella llena de agua se encuentra dentro de una masa de hielo a 0°C , y otra, dentro de agua a la misma temperatura. ¿En cuál de las botellas el agua se congelará antes?
- a) Si se congelara el agua contenida en la botella, el vidrio se rompería a consecuencia de la dilatación del hielo. No obstante, en las condiciones especificadas el agua no se helará. Para ello no sólo habría que reducir la temperatura hasta 0°C , sino también haría falta disminuir el calor latente de fusión en 80 calorías por cada gramo de agua que se congela. El hielo, dentro del cual se encuentra la botella, tiene una temperatura de 0°C (se derrite) y, por consiguiente, el agua no transmitirá calor al hielo: la transmisión de calor es imposible cuando las temperaturas son iguales. Como el agua no cede calor a 0°C , permanecerá en estado líquido. Por ello, no hay que temer que la botella se rompa.
- b) El agua no se congelará en ninguna de las botellas. En ambos casos la temperatura es de 0°C , por consiguiente, el agua contenida en la botella se enfriará hasta 0°C , pero no se helará, pues no podrá ceder calor latente de fusión al ambiente: si los cuerpos tienen temperaturas iguales, no intercambiarán calor.

143. El hielo en el agua

¿Podría sumergirse por sí mismo el hielo en el agua a 0°C ?

Como a 0°C el hielo tiene un peso específico de 0,917, en las condiciones normales se sostiene en la superficie del agua.

Pero durante el calentamiento disminuye el de esta última: por ejemplo, a 100°C equivale a $0,96\text{ g/cm}^3$, por lo cual en este caso el hielo que se derrite, continuará flotando. Si seguimos calentando el líquido (a presión elevada), a los 150°C su peso será de $0,917$, de modo que el hielo podrá permanecer por debajo del nivel de su superficie, sin bajar ni subir. A los 200°C el agua tendrá una densidad de $0,86\text{ g/cm}^3$, es decir, menor que la del hielo, por lo cual éste se hundirá.

Cabe señalar que en condiciones normales el hielo es una de las variedades del agua sólida; en otras condiciones (cuando varía la presión) se forman otras variedades de hielo cuyas propiedades son distintas. Realizando experimentos sobre las propiedades de diversos cuerpos sometidos a una presión bastante alta (de hasta 30.000 at.), el físico inglés Bridgman descubrió seis variedades diferentes de hielo y las designó con números: hielo I, hielo II, etc. El hielo I es más ligero que el agua en un 10 ó en un 14%. Las otras cinco variedades son más densas que esta última: el hielo II, en el 22 %; el hielo III, en el 3 %; el hielo IV, en el 12 %, el hielo V, en el 8 % y el hielo VI, en el 12%.

Por consiguiente, entre las seis variedades de hielo sólo una flota en el agua, mientras que las demás se hunden.

144. El agua congelada en las tuberías

En los países de clima frío, a veces, el agua de las tuberías de las partes subterráneas de los edificios se congela cuando empieza el deshielo, y no cuando la temperatura es bajo cero. ¿A qué se debe este fenómeno?

Muchas personas quedan sorprendidas por el hecho de que en las tuberías que pasan por los sótanos de las casas el agua

se congela frecuentemente en épocas de deshielo, y no cuando hace mucho frío. No obstante, este fenómeno tan extraño se debe a la conductividad térmica insuficiente del suelo.

La tierra conduce tan mal el calor que la temperatura mínima se establece más tarde en el suelo que, sobre la superficie terrestre; cuanto mayor es la profundidad, tanto más se tarda. Por ello, cuando la temperatura del ambiente ya se mantiene bajo cero, el frío aún no tiene tiempo para alcanzar las tuberías y los locales subterráneos, por lo cual el agua no se congela. Sólo después, cuando en la superficie ya comienza el deshielo, penetra hasta las tuberías. Bajo tierra se establece la temperatura mínima cuando en la superficie terrestre el hielo empieza a derretirse.

145. El hielo

La explicación que se da al hecho de que la superficie del hielo es resbaladiza es que su punto de fusión desciende al aumentar la presión. Se sabe que para disminuir en un grado centígrado el punto de fusión del hielo hay que crear una presión de 130 at. Por ello, para poder patinar a la temperatura de 5°C bajo cero, el deportista debe ejercer sobre el hielo una presión de $5 \times 130 = 650$ at. No obstante, la superficie de contacto entre el patín y el hielo no mide menos de unos cuantos centímetros cuadrados, de modo que a 1 cm. le corresponden no más de 10 a 20 kg. de la masa del patinador. Por consiguiente, la presión que éste ejerce sobre el hielo, es muchas veces menor que la necesaria para disminuir el punto de fusión del hielo en 5° .

¿Cómo explicaría usted el hecho de que a 5°C bajo cero y a más baja temperatura es posible patinar?

La diferencia entre la explicación del fenómeno y el resultado del cálculo se debe a las dimensiones exageradas de la superficie de contacto entre el patín y el hielo. No toda la superficie del patín está en contacto con el hielo, sino algunos de sus puntos, cuya área total no debe de superar $0,1 \text{ cm}^2$ (es decir, 10 mm^2). En este caso la presión que el patinador (de 60 kg . de peso) ejerce sobre el hielo, no será menor de $60 : 0,1 = 600 \text{ kg/cm}^2$, es decir, no será inferior a la magnitud que se requiere para que, conforme a la teoría, disminuya la temperatura, a la cual el hielo empieza a derretirse.

Si el frío es muy intenso, la presión de los patines será insuficiente para reducir la temperatura de fusión del hielo hasta el valor requerido; en este caso el patinaje se dificultará, puesto que aumentará notablemente la fricción por falta del agua que sirve de engrase

146. Disminución del punto de fusión del hielo

¿Hasta qué temperatura es posible disminuir el punto de fusión del hielo elevando mucho la presión?

El punto de fusión del hielo disminuye en $1/130$ de grado cuando la presión ambiente aumenta en una atmósfera. Pero no se piense que el hielo empezará a derretirse a una presión suficiente, por muy baja que sea la temperatura. Cuando se eleva la presión, el punto de fusión del hielo disminuye hasta cierto límite: es imposible reducirlo más de 22 grados; esto se lograría a la presión de 2200 at .

Así pues, por más que se eleve la presión, el hielo no se derretirá a una temperatura menor de 22° C bajo cero; es imposible patinar sin dificultad alguna cuando la temperatura baja hasta ese valor, ya que a la presión de 2200 at . el hielo se

torna más denso que de ordinario y. por consiguiente, ocupa menos espacio: la presión ya no contribuye a su derretimiento.

147. El “hielo seco”

¿Sabe usted qué es el «hielo seco»?

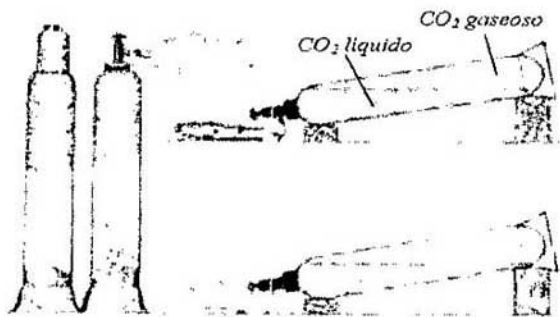
En la técnica, por “hielo seco”, o “nieve carbónica”, se entiende el anhídrido carbónico sólido. Si se deja salir anhídrido carbónico líquido de una botella a presión muy alta (de 70 at.) al aire libre, empieza a evaporarse tan intensamente que su resto se congela (por el frío engendrado durante la evaporación) formando una masa suelta como la nieve. Al prensarla, se compacta tomando forma muy parecida al hielo.

El “hielo” carbónico posee una propiedad notable: no se derrite cuando se calienta, sino que inmediatamente se convierte en gas sin pasar por la fase líquida. Esta propiedad proporciona una gran ventaja al utilizarlo para enfriar los productos de fácil deterioro: el “hielo seco” no moja y ni siquiera humedece los productos mientras se evapora. De aquí proviene su nombre.

Otra ventaja del “hielo” carbónico ante el ordinario consiste en que proporciona unas quince veces más frío que este último. Además, se evapora muy lentamente; un vagón de frutas, enfriado mediante “hielo seco”, puede estar en camino durante diez días sin cambiar ni reponer la reserva de anhídrido carbónico.

El efecto refrigerante del “hielo seco” se debe a su temperatura muy baja (-80°C); además, el gas que se forma al sublimarlo, también es bastante frío (0°C): el “manto” gaseoso que envuelve el anhídrido carbónico sólido, ralentiza el deshielo. El gas carbónico no contamina en absoluto el

producto, además, disminuye considerablemente el peligro de incendios impidiendo la propagación del fuego.



A la izquierda: anhídrido carbónico contenido en una botella de acero de paredes gruesas; encima están sus vapores. Más a la derecha: cuando se abre la válvula el líquido comienza a bullir a consecuencia del descenso de presión. A la derecha arriba: la botella está inclinada para verter anhídrido carbónico en un saco atado al grifo. A la derecha abajo: el saco queda envuelto en una nube de vapores de anhídrido carbónico condensados; dentro del mismo se encuentra anhídrido carbónico congelado.



El anhídrido carbónico congelado forma una masa parecida a la nieve; después de prensarla se obtiene "hielo seco".

148. El color del vapor de agua

¿De qué color es el vapor de agua?

La mayoría de las personas están seguras de que el vapor de agua es de color blanco, y se asombran mucho al oír que esto no es así. De hecho, el vapor de agua es absolutamente transparente e invisible y, por consiguiente, es incoloro. La niebla blanquecina que se suele llamar “vapor” no es vapor en el sentido físico de la palabra, sino agua pulverizada que tiene forma de gotitas pequeñísimas. Las nubes tampoco constan de vapor de agua, se componen de diminutas gotitas de líquido.

149. La ebullición del agua

¿Qué agua -sin hervir o hervida- empieza a hervir antes que la otra bajo condiciones iguales?

El agua no hervida empezará a bullir antes, pues contiene aire disuelto. Para explicar, por qué el aire presente en el agua acelera la ebullición, hay que examinar algunos detalles. Helos aquí. La ebullición, a diferencia de la evaporación, consiste en que aparecen burbujas de vapor en el seno del líquido que se calienta. Esto sólo es posible cuando la presión del vapor supera la presión atmosférica sobre la superficie de líquido, que se transmite a su interior con arreglo a la ley de Pascal.

Consta que a los 100° C la presión del vapor de agua saturante es igual a la atmosférica. No obstante, esto sólo se refiere al caso cuando el vapor satura el espacio encima de la superficie del agua plana. En el seno de la burbuja que se forma en el agua, la presión del vapor saturado debe ser menor que la atmosférica, es decir, menor que junto a la superficie del agua

plana a la misma temperatura. La causa de este fenómeno consiste en que la superficie cóncava de líquido vuelve a captar fácilmente las moléculas desprendidas de ella. Por consiguiente, cuando hay relativamente pocas moléculas liberadas, la cantidad de moléculas que se liberan cada segundo dentro de la burbuja debe equivaler a la de moléculas capturadas. Se trata, pues, del estado de saturación, cuando un espacio dado contiene, a una temperatura determinada, la cantidad máxima de vapor, y cuando la presión del vapor también es máxima. De modo que queda claro que la presión máxima del vapor en el seno de la burbuja es menor que encima de la superficie del agua plana, donde equivale a la atmosférica. Cuanto más cóncava es la superficie de agua, es decir, cuanto menor es el radio de la burbuja, tanto menor será la presión máxima del vapor. Por ejemplo, dentro de una burbuja de 0,01 pm. de radio, a los 100° C la presión del vapor saturante es de 750 mm. de mercurio en vez de 760 mm. de mercurio.

Resulta, pues, que el agua no debe empezar a bullir a los 100° C, como establece la teoría, sino a una temperatura mayor, es decir, cuando el vapor cree en el agua una presión más alta, igual a la atmosférica. Por esta razón, el agua hervida previamente, que ya no contiene aire disuelto, tarda más en empezar a bullir. En cambio, la ebullición dura menos, se desprende mayor cantidad de vapor, y el agua tarda poco tiempo en calentarse hasta la temperatura normal de ebullición (100° C) a consecuencia del consumo intenso de calor para la evaporación. La ebullición del agua sin hervir que contiene aire disuelto transcurre de una manera distinta.

Como la solubilidad de los gases disminuye al aumentar la temperatura, el exceso de aire debe desprenderse del líquido que se calienta. Precisamente este aire forma burbujas. Los primeros glóbulos que aparecen en el agua sin hervir durante el calentamiento, no contienen vapor, sino aire, y sólo poco

rato después empiezan a desprenderse de su superficie interna moléculas de vapor de agua. Hay que tener en cuenta que a las primeras burbujas de vapor, las más pequeñas, les cuesta más trabajo formarse, puesto que la presión del vapor de agua en ellas es muy reducida. Cuando terminan estas dificultades, es decir, cuando de una u otra forma aparecen burbujas, se facilita considerablemente el proceso de formación de vapor en ellas, y su tamaño aumenta. Este hecho explica, por qué el agua no hervida con aire disuelto no tarda tanto en empezar a hervir como la hervida previamente. Maxwell logró sobrecalentar hasta 180°C (a presión normal y creando ciertas condiciones complementarias) agua, de la cual había extraído, en la medida de lo posible, aire disuelto. Tal vez eliminando más aire, lograría calentarla hasta una temperatura mayor, sin que dejase de ser líquida.

150. Calentamiento mediante el vapor

¿Sería posible calentar el agua mediante vapor de 100°C hasta que empiece a hervir?

El vapor calentado hasta 100°C puede ceder calor al agua siempre que la temperatura de ésta sea inferior a los 100°C . A partir del instante en que se igualan las temperaturas del vapor y el agua, el primero deja de transmitir calor a la segunda. Por ello, es posible calentar agua hasta 100°C mediante el vapor que tiene esa misma temperatura, pero éste no podrá transmitirle la cantidad de calor necesaria para pasar al estado gaseoso. Por consiguiente, se puede calentar agua hasta la temperatura de ebullición mediante el vapor, cuya temperatura es de 100°C , más es imposible lograr que empiece a hervir; seguirá en estado líquido.

151. Una tetera con agua hirviendo sobre la palma de la mano de la mano

Hay quien dice que se puede poner una tetera metálica, recién retirada del hornillo, sobre la palma de la mano sin que esto provoque una quemadura, a pesar de que el agua sigue hirviendo.

La mano empieza a sentir calor sólo después de algunos segundos. ¿Cómo explicaría usted este fenómeno?



Un experimento menos peligroso de lo que parece ser:

Se suele interpretar equivocadamente el hecho descrito al plantear el problema, aunque, de por sí, es cierto. Generalmente se cree que la mano no siente el calor de la tetera con agua hirviendo porque parte considerable se consume para continuar la ebullición. El calor necesario para la ebullición se toma de las paredes del recipiente, en particular, de su fondo, debido a lo cual descende la temperatura de este último. Cuando cesa la ebullición, el fondo deja de transmitir su calor al agua, y la mano empieza a sentir calor.

Esta explicación es errónea, pues no aclara por qué las paredes laterales queman más que el fondo, además, no considera el hecho de que a consecuencia de la evaporación el fondo de la tetera no puede tener una temperatura menor que el agua contenida en ella; en este caso la temperatura del agua es de unos 100°C , o sea, es suficiente para quemar la mano.

La causa real de este fenómeno consiste en lo siguiente: la humedad (el sudor) de la palma de la mano entra en contacto con el fondo de la tetera, pasando al llamado "estado esferoidal"; en un primer instante después de retirar la vasija del hornillo, el fondo tiene calor suficiente para ello. Mas, cuando su temperatura está por debajo de 150°C , ya no hay humedad que se encuentre en estado esferoidal, por lo cual el calor se siente más.

Este experimento se lleva a cabo con éxito siempre que el fondo de la tetera sea liso y no esté ensuciado, pues la rugosidad de la superficie metálica y la suciedad estorban que haya humedad en estado esferoidal.

152. ¿Prefiere usted comida frita o cocidas?

¿Por qué la comida frita es más sabrosa que la cocida?

La comida frita sabe mejor que la cocida no sólo porque se le añade aceite o grasa, sino fundamentalmente porque la freidura y el cocimiento tienen sus particularidades físicas. Tanto el agua como la grasa no se calientan por encima de la temperatura de su ebullición. La primera hierve a 100°C , mientras que la segunda a 200°C . Por consiguiente, para freír se necesita una temperatura más alta que para cocer. A su vez, un calentamiento más intenso de las sustancias orgánicas contenidas en la comida provoca en ellas transformaciones que

mejoran su sabor. Por eso la carne frita sabe mejor que la cocida, así como el huevo frito es más sabroso que el duro, etc.

153. El huevo caliente en la mano

¿Por qué no quema la mano un huevo recién sacado del agua hirviendo?

Al sacar un huevo del agua hirviendo, su cáscara aún está húmeda y muy caliente. El agua que se evapora de la superficie caliente, la enfría, por lo cual el calor no se siente mucho. Pero este efecto sólo tiene lugar en los primeros instantes, mientras el huevo se seca, después de lo cual su elevada temperatura empieza a sentirse.



Un huevo recién sacado del agua hirviendo no abrasa la mano.

154. El viento y el termómetro

¿Qué influencia ejerce el viento sobre el termómetro cuando hace frío?

Si el termómetro está seco, sus indicaciones no dependen de ninguna manera del viento, aunque a veces se cree lo contrario, pues si el tiempo es ventoso, sentimos el frío más intensamente. No obstante, dicho elemento influye de diferente manera en el organismo humano y este instrumento de medida. El viento se lleva rápidamente las capas de aire templado y húmedo que envuelven nuestro cuerpo, y las sustituye por capas de aire frío, intensificando de ese modo la pérdida de calor y aumentando la sensación de frío. A su vez, el termómetro, en cambio, indicará la misma temperatura, a pesar de que haga viento o no.

155. El principio de la pared fría

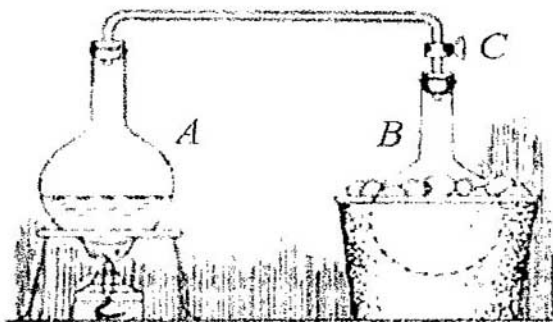
El traductor de un tratado de astronomía se topó en el texto con el término "principio de la pared fría". Al consultar numerosos libros de física no encontró semejante término. ¿Sabe usted, en qué consiste este principio?

Cuando el traductor del libro me pidió que le explicara el "principio de la pared fría", tardé mucho en encontrar este término. Por fin lo localicé en un libro de texto traducido del francés, que hoy día es difícil de encontrar. He aquí lo que dice al respecto: "Principio de Watt" o "principio de la pared fría". Supongamos que tenemos dos recipientes: el recipiente *A* contiene agua a 100°C y el *B*, a 0°C . Mientras no se comunican, tienen diferente tensión del vapor: en *B* la tensión es de 4,6 mm. de mercurio y en *A*, de 760 mm. de mercurio.

Pero cuando se abre la llave *C*, el vapor de *A* entra en *B* y enseguida se convierte en agua; por ello, la presión del vapor del recipiente *A* no puede superar la de *B*. Se trasvasa vapor de

A a B sin aumentar la tensión del vapor en este último. He aquí el principio formulado por primera vez por J. Watt.

“Si se comunican dos recipientes que contienen un mismo líquido a temperatura diferente, tendrán igual tensión de vapor, equivalente a la máxima que se registra a la temperatura más baja de estas dos.”



Experimento que explica el “principio de la pared fría”.

Si el lector tiene alguna noción del instrumento físico llamado “crióforo”, muy sencillo e ilustrativo, sabrá qué es el “principio de la pared fría”, puesto que su acción está basada precisamente sobre dicho principio. El crióforo consta de dos bolas de vidrio huecas unidas mediante un tubo.

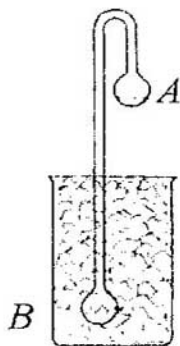
Dentro de este dispositivo hay un poco de agua con vapor encima de ella, y no hay aire. Al trasegar agua a la bola superior, la inferior se coloca en una mezcla refrigerante. Con arreglo al “principio de la pared fría”, en el recipiente superior encima del agua debe establecerse la presión baja del otro, metido dentro de la mezcla refrigerante. Como la presión es reducida, el agua empieza a hervir, mientras que el vapor que se forma en este

caso se condensa en la bola inferior enfriada; la ebullición es tan enérgica y la pérdida de calor a consecuencia de la evaporación es tan intensa que se congela, el agua del recipiente superior, aunque no está en el seno del hielo. J. Watt aprovechó este principio para construir su “refrigerador”: el vapor de escape contenido en el cilindro se dirige por sí mismo al refrigerador y se condensa en él. Antes de J. Watt, en la máquina de Newcomen, para condensar el vapor agotado se inyectaba agua fría en el cilindro, enfriando de esta manera no sólo el vapor, sino también las paredes del cilindro, sin lo cual el vapor no se condensaba; durante la carrera siguiente del émbolo, en el cilindro enfriado se inyectaba vapor caliente, cuyas primeras porciones se condensaban en las paredes hasta que la temperatura del cilindro se igualaba con la del vapor en la caldera. Queda claro, pues, que semejante procedimiento de condensación del vapor no era muy económico, por cuanto se consumían grandes cantidades de vapor y agua fría, para lo cual se gastaba mucho carbón. Es por eso que las máquinas anteriores a la de Watt tenían un rendimiento tan bajo, sólo del 0,3 %. Este inventor utilizó, entre otros adelantos, el condensador cuyo funcionamiento se basaba en el “principio de la pared fría”, descubierto por él mismo: el vapor abandona por sí mismo el cilindro dejando calientes sus paredes y enfriándose fuera de él, en el condensador.

Por cierto, al lector le interesará saber de qué manera se aplicará en la astronomía este principio que, al parecer, sólo tiene aplicaciones mecánicas. No obstante, este principio es fundamental al resolver problemas relacionados con la revolución de los planetas más cercanos al Sol, o sea, Mercurio y Venus.

Orbitando al Sol, Mercurio siempre le presenta la misma cara, por lo cual en ese planeta el “día” equivale al “año”. En su cara siempre iluminada por los rayos solares, hay un día

eterno y un intenso calor, mientras que en la cara opuesta, siempre sumida en las tinieblas del Universo, reinan una noche infinita y un intenso frío de -264°C , casi lo mismo que en el espacio. En la mitad fría de Mercurio la atmósfera debe condensarse y congelarse, aunque consista en hidrógeno. Pero, según el principio de Watt, a esta "pared fría" del planeta debe afluir la atmósfera del hemisferio diurno, donde se establece la presión reducida que se registra en la atmósfera licuada del hemisferio frío. Además, la parte de la atmósfera que se traslada de esa manera, también se condensa a consecuencia de la temperatura tan baja. Este proceso ha de continuar hasta que toda la atmósfera del planeta se desplace a la cara fría.



El crióforo: cuando se enfría el recipiente inferior, se congela el agua contenida en el superior.

Por consiguiente, Mercurio no puede tener atmósfera gaseosa, lo cual se deriva irrefutablemente del "principio de la pared fría", siendo iguales los períodos de giro del planeta sobre su eje y el de revolución en torno al Sol.

Los astrónomos no tienen opinión unánime en cuanto a la duración de los respectivos períodos de Venus. Unos consideran que en este planeta el “día” dura lo mismo que el “año” como en Mercurio. Según otros, el período de rotación venusiano, es decir, su “día” va le menos que el “año”. El referido principio de la pared fría redunda en beneficio de este segundo grupo de astrónomos, pues las observaciones directas de Venus han permitido establecer que tiene atmósfera: si su “día” y “año” fueran iguales, la atmósfera de dicho planeta correría la misma suerte que la de su vecino Mercurio.

El “principio de la pared fría” también echa por tierra las suposiciones de Herbert Wells de que la Luna pudiera tener atmósfera, enunciada en su ingeniosa novela *Los primeros hombres en la Luna*. El novelista supone que de noche su atmósfera se congela y de día se derrite y evapora volviendo a ser gaseosa. Pero ya sabemos que es imposible que en un hemisferio de dicho cuerpo celeste haya un gas licuado y en el otro, la misma sustancia, pero en estado gaseoso.

156. El poder calorífico de la leña

¿Qué leña da más calor, de abedul o de álamo temblón (si se queman cantidades iguales de leña igualmente seca)?

Generalmente se piensa que la leña de abedul da más calor que la de pino y, en especial, que la de álamo temblón. Esto es cierto si se comparan volúmenes iguales: al quemar totalmente un leño de abedul, se obtiene más calor que quemando otro, de álamo temblón, de las mismas dimensiones.

No obstante, en física y en técnica, al estimar el poder calorífico del combustible, se comparan las masas y no los volúmenes. Como la madera del abedul es 1,5 veces más densa

que la del álamo temblón, no nos debe sorprender el hecho de que el poder calorífico de la leña de abedul es igual que el de la otra especie de madera. En general, cuando se quema un kilogramo de leña de cualquier especie de madera se obtiene una misma cantidad de calor (siempre que sea igual el porcentaje de humedad contenida en ellas).

Así pues, nos parece que la madera de abedul tiene mayor poder calorífico que la de álamo temblón porque comparamos masas desiguales de estos combustibles quemando mayor cantidad de una de ellas.

Si las diferentes especies de madera, de igual masa, producen iguales cantidades de calor, no serán completamente equivalentes como combustible. Cuando se utilizan calderas de vapor, no sólo importa el poder calorífico del combustible, sino también la velocidad con que se quema. En tiempos lejanos, cuando en las fábricas de vidrio se empleaban tales calderas, se prefería la leña de álamo temblón o de pino, que se quema más rápidamente que la de las demás especies. En las chimeneas y estufas que sirven para calentar las habitaciones, la leña de especies más densas calienta mejor que la de otras, de menor densidad, que tardan menos en quemarse.

157. El poder calorífico de la pólvora y del queroseno

¿Qué agente tiene mayor potencia calorífica, la pólvora o el queroseno?

Sería erróneo suponer que el efecto violento de los explosivos se debe a la enorme cantidad de energía de dichas sustancias, es decir, a su elevado poder calorífico, el cual, en muchos tipos de explosivos, es sorprendentemente pequeño en

comparación con el poder calorífico de muchas clases de combustible industrial, como son,

<i>Al quemar 1 kg de:</i>	<i>Se obtiene</i>
Pólvora negra	700 cal
Pólvora de proxilina cordita	960 cal
	1200 – 1400 cal

He aquí el poder calorífico de algunos tipos de combustible industrial:

Queroseno y gasolina	11.000 cal
petroleo	10.500 cal
carbón	7.000 cal
Leña seca	3.100 cal

Pero no se debe comparar en forma directa estos datos con los anteriores; hay que tener en cuenta que durante la quema de los explosivos sólo se consume el oxígeno contenido en ellos, mientras que en el caso de los combustibles convencionales se consume el del medio ambiente. Al relacionar el número de calorías con la masa del combustible, hay que incluir también la de oxígeno que se consume durante su quema. Esta masa adicional supera 2 ó 3 veces la del combustible. Por ejemplo, para quemar 1 kg. de carbón se consumen 2,2 kg. de oxígeno (éste es un cálculo teórico; en la práctica la cifra es mayor), 1 kg. de petróleo consume 2,8 kg. de oxígeno, etc.

Mas, las cifras relativas al poder calorífico de los combustibles superan los datos que caracterizan el de los explosivos, aunque se corrijan correspondientemente. Sería un despilfarro calentar las estufas quemando pólvora, pues esta sustancia produce tres veces menos calor que la hulla.

Por ello, naturalmente surge la pregunta siguiente: si los explosivos contienen cantidades no muy grandes de energía, ¿cómo se podría explicar el terrible efecto destructor que producen? Éste se explica únicamente por la rapidez de combustión, es decir, por el hecho de que una cantidad relativamente pequeña de energía se libera en un intervalo de tiempo muy corto. Durante la quema de los explosivos se forma gran cantidad de gases que, encerrados en un recinto de volumen reducido, empujan el proyectil con una presión de 4000 atmósferas.

Si la combustión de la pólvora fuera lenta, en el tiempo necesario para salir el proyectil por la boca del cañón, se quemaría una parte pequeña de la carga y se formarían pocos gases, por lo cual su presión y la velocidad del proyectil serían insuficientes. Pero de hecho la pólvora se quema en el cañón casi instantáneamente. En menos que una centésima de segundo la carga se quema totalmente y los gases proyectan la bala con una fuerza enorme.

158. ¿Qué potencia luminosa tiene una cerilla?

No se trata de una broma, sino de un problema bastante serio de la física. Durante la combustión se libera energía. ¿Cuántos julios de energía se obtienen cada segundo quemando una cerilla?

En otras palabras, ¿cuál es la potencia de una cerilla en vatios? Como ve, este problema no tiene nada de broma.

No se crea, pues, que la energía de la cerilla es ínfima. Es fácil cerciorarse de que no lo es. He aquí el cálculo. Una cerilla pesa unos 100 mg., ó 0,1 g. (el peso se determina mediante una balanza sensible o midiendo su volumen, adoptando su

densidad igual a $0,5 \text{ g/cm}^3$). Supongamos que el poder calorífico de la madera vale 3000 cal/g . Mediante el reloj determinamos que una cerilla tarda unos 20 segundos en quemarse.

Por lo tanto, de las 300 calorías ($3000 \times 0,1$) que rinde una cerilla, cada segundo se obtienen $300 : 20 = 15 \text{ cal/g}$. Una caloría pequeña vale $4,2 \text{ J}$, por consiguiente, la potencia de la cerilla que se quema es de

$$4,2 \times 15 = 63 \text{ W}$$

Así pues, la potencia de una cerilla supera la de una bombilla eléctrica de 50 W .

De la misma manera se podría calcular que fumando un cigarrillo se obtiene una potencia de 20 W . He aquí los datos para el cálculo: masa de la picadura, 5 g ; poder calorífico específico, 3000 cal/g ; tiempo en que se consume un cigarrillo, 5 min .

159 ¿Cómo se quitan las manchas con la plancha?

¿Merced a qué efecto se quitan de la tela las manchas de grasa con una plancha?

A la ropa se le quitan las manchas de grasa mediante el calentamiento, puesto que la tensión superficial de los líquidos disminuye cuando aumenta la temperatura. "Por eso, si en distintos puntos de una mancha líquida la temperatura es diferente, la grasa tiende a desplazarse de la zona caliente hacia la fría. Si a una de las caras de la tela aplicamos un hierro caliente, y a la otra una hoja de papel de algodón, este último absorberá la grasa." (Maxwell, Theory of Heat).

Por consiguiente, el material que absorberá la grasa debe aplicarse a la cara opuesta a la plancha.

160. Solubilidad de la sal común

¿A qué temperatura del agua se disuelve mayor cantidad de sal común, a 40 ó 70 grados centígrados?

Cuando se eleva la temperatura del agua, aumenta la solubilidad de la mayoría de las sustancias sólidas disueltas en ella: por ejemplo, a 0° C se disuelve en el agua el 64 % del azúcar, mientras que a 100° C, el 83 %. No obstante, la sal común no figura entre estas sustancias, ya que su solubilidad en el agua casi no depende de la temperatura: a 0° C se disuelve el 26 % de la sal y a 100° C, el 28 %. Tanto a 40° C como a 70° C en el agua se disuelve exactamente una misma cantidad de sal, el 27 %.

Capítulo Quinto

SONIDO Y LUZ

- 161. El trueno
- 162. El sonido y el viento
- 163. La presión del sonido
- 164. ¿Por qué la puerta debilita el sonido?
- 165. La lente acústica
- 166. La reflexión acústica
- 167. El ruido del caracol
- 168. El diapasón y el resonador
- 169. ¿Adónde van las ondas acústicas?
- 170. La visibilidad de los rayos luminosos
- 171. El orto del Sol
- 172. La sombra del alambre
- 173. La sombra de una nube
- 174. Lectura a la luz de la luna
- 175. El terciopelo negro y la nieve blanca
- 176. Una estrella y una vela
- 177. El color de la superficie lunar
- 178. ¿Por qué la nieve es blanca?
- 179. Sacando lustre al calzado
- 180. El número de colores del espectro y del arco iris
- 181. El arco iris
- 182. A través de vidrios de colores
- 183. El oro cambia de color
- 184. El percal visto a la luz eléctrica
- 185. El color del firmamento
- 186. El eclipse artificial del Sol
- 187. La luz roja
- 188. La refracción y la densidad
- 189. Dos lentes

- 190. La Luna junto al horizonte
- 191. La Luna vista a través de un orificio punzado en una hoja de cartulina
- 192. La constante solar
- 193. El objeto más negro
- 194. La temperatura del Sol
- 195. La temperatura del Universo

161. El trueno

Observando un relámpago o escuchando el trueno, ¿será posible determinar la distancia hasta la descarga eléctrica que los produce?

El trueno se desplaza por medio de las llamadas ondas explosivas cuya amplitud de oscilación es bastante considerable, y no mediante ondas acústicas ordinarias. En general, las primeras se diferencian mucho de las segundas, y sólo poco antes de extinguirse se descomponen en ondas sonoras. En primer lugar, las ondas explosivas son notablemente más rápidas que el sonido, además, su velocidad no es constante, sino que disminuye drásticamente a medida que cambian de estructura y se destruyen. Mediante experimentos realizados en tuberías se estableció que la velocidad de propagación de dichas ondas alcanza 12 ó 14 km/s, o sea, supera unas cuarenta veces la del sonido.

El rayo engendra ondas explosivas que en un principio viajan en la atmósfera más rápido que el sonido. En esta fase las percibimos como un chasquido. Un trueno fuerte y brusco, no precedido de ruido sordo, que se oye inmediatamente después de la fulguración (o, a veces, al mismo tiempo que la vemos), es engendrado por una onda explosiva que aún no se ha destruido.

Semejantes descargas indican que la chispa se ha producido muy cerca de nosotros, pues sólo a distancia corta la onda explosiva tiene estructura original.

Otro género de trueno, acompañado de descargas sordas características, que se debilitan y amplifican alternadamente, se escucha al cabo de cierto intervalo de tiempo después de que se ve el rayo, lo que prueba que su fuente está alejada a una distancia considerable. Se equivocan los que piensan que es

posible determinar la distancia hasta la descarga partiendo del espacio de tiempo transcurrido entre la chispa y el trueno (multiplicando el número de segundos por la velocidad del sonido), ya que la onda de aire que transporta el sonido, viaja con una velocidad variable, recorriendo la parte inicial de esta distancia a una velocidad supersónica y el resto, con la del sonido.

Lo que acabamos de exponer sobre el trueno, no tiene nada que ver con el sonido del disparo: al disparar un cañón, la onda explosiva se convierte en una onda acústica ordinaria a dos metros de la pieza; por ello, es posible determinar la velocidad del aire a base del disparo de cañón.

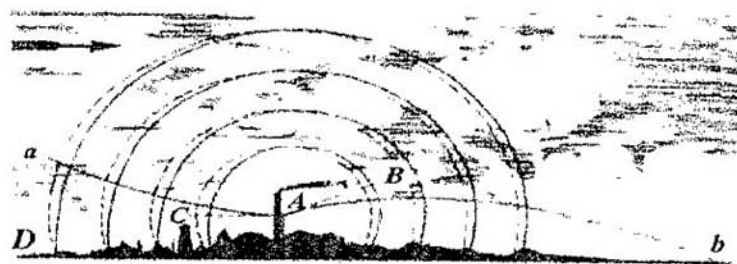
162. El sonido del viento

¿Cómo explicaría usted el hecho de que el viento amplifica el sonido?

A continuación ofrecemos un pasaje relativo a este problema, tomado del libro *Historische Physik* de Lacour y Appel.

“Es sabido que el sonido se oye mejor cuando el viento es favorable, y peor cuando es contrario. Por regla general, sólo se acostumbra explicar este fenómeno con el hecho de que en dirección del viento la velocidad de éste se suma a la del sonido. Nos daremos cuenta de que semejante explicación es insuficiente si recordamos que el movimiento del aire con una velocidad de 10 m/s se siente como un viento bastante fuerte. Pero esta magnitud no influye notablemente en la intensidad del sonido, pues, de hecho, se trata de un aumento o disminución poco considerables de su velocidad, de orden de un 3 %. El físico inglés J. Tyndall explica este fenómeno de la manera

siguiente. La velocidad del viento casi siempre aumenta en función de la altitud. Por consiguiente, las ondas acústicas que se propagan a cierta altura y cuya superficie en el ambiente tranquilo suele ser esférica (líneas de trazos en la figura), cambian de forma con mayor velocidad en dirección del viento (según indica la flecha) que las que se desplazan junto a la superficie terrestre. Por esta razón tienen forma parecida a la que viene representada por las líneas continuas en la figura. Como en cada punto el sonido se propaga perpendicularmente a la superficie de la onda, el que procede del punto A en dirección AC no podrá llegar hasta el punto D , sino que pasará por encima de él siguiendo la línea Aa , por lo cual el observador que se encuentra en dicho punto, no lo oirá.



El viento deforma las ondas acústicas.

Al contrario, el sonido emitido en la dirección AB , sigue la curva Ab , la cual no deja de ser perpendicular a la superficie de la onda. Por ello, el observador que se encuentra en el punto b , podrá oírlo; todos los sonidos emitidos por A en una dirección inferior a AB serán desviados de la misma manera y alcanzarán la superficie terrestre en diversos puntos localizados entre A y b .



*Influencia del viento favorable
en la propagación del sonido.*

En esta parte de la superficie terrestre incidirá mayor cantidad de sonido del que debería incidir, o sea, en este trecho también se oirán todos los sonidos que en tiempo de calma se desplazarían por encima de *AB*.”



*La influencia del viento contrario
en la propagación del sonido.*

Así pues, el hecho de que el sonido se amplifica por el viento no se debe a la variación de la velocidad de las ondas sonoras, sino al cambio de su forma (en resumidas cuentas el cambio de forma depende de la variación de la velocidad).

163. La presión del sonido

¿Qué presión, aproximadamente, ejercen las ondas acústicas sobre el tímpano?

Si las ondas de aire tienen una presión de $5 \cdot 10^{-18}$ N/cm², el sonido se vuelve perceptible. Cuando el sonido es alto, la presión es cientos y miles de veces mayor. No obstante, la presión del sonido es pequeñísima. Por ejemplo, se sabe que el ruido de una vía pública con tráfico animado ejerce sobre el tímpano una presión de $(1 \text{ ó } 2) \cdot 10^{-4}$ N/cm², es decir, de 0,00001 a 0,0005 at.

164. ¿Por qué la puerta debilita el sonido?

Consta que la madera conduce el sonido mejor que el aire: al dar golpes por un extremo de un rollo largo se pueden escuchar muy bien aplicando el oído al otro extremo.

¿Por qué, pues, no se oyen claramente las voces de las personas que están conversando en un cuarto mientras la puerta esté cerrada?

Por más extraño que parezca, la puerta amortigua el sonido precisamente porque lo conduce mejor que el aire. El haz sonoro se desvía de la perpendicular de incidencia cuando pasa del aire a la madera, es decir, cuando penetra en un medio que

transmite el sonido más rápidamente. Por lo tanto, existe cierto ángulo límite de incidencia de los haces sonoros que pasan del aire a la madera, el cual es bastante pequeño (debido al elevado índice de refracción). O sea, una parte considerable de las ondas aéreas que atraviesan el aire e inciden en la superficie de madera, deberán reflejarse al aire sin penetrar en esta última. En suma, la madera dejará pasar un porcentaje reducido de ondas sonoras procedentes del aire, que inciden en la superficie de separación de estos dos medios. Por esta razón, la puerta disminuye la intensidad del sonido.

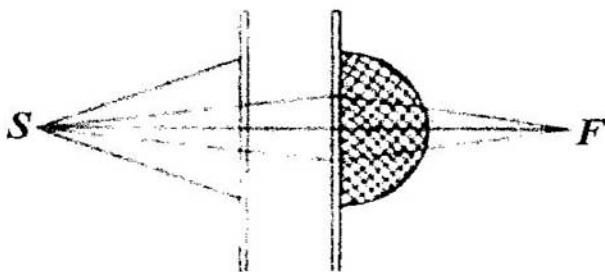
165. La lente acústica

¿Existirá lente que refracte el sonido?

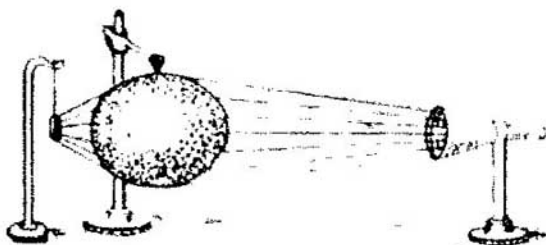
Es muy fácil construir una lente para refractar el sonido. Para ello se podría utilizar una semiesfera de malla de alambre llena de plumón que disminuye la velocidad del sonido. Dicho objeto podrá servir de lente convergente para el sonido. En la figura aparece un diafragma consistente en una hoja de cartulina puesta delante de la lente, que separa los haces sonoros que se enfocan en F por esta última. En el punto S está colocada una fuente de sonido (un silbato), y en F , una llama sensible al sonido.

Ofrecemos la descripción de la lente “acústica” ideada por J. Tyndall. “Mi «lente» —escribe el inventor— consta de una esfera hueca hecha de una sustancia preparada a base de colodión (ver figura), que contiene un gas más denso que el aire, por ejemplo, dióxido de carbono. La pared de la esfera es tan delgada que cede fácilmente al menor empuje dirigido desde afuera y lo transmite al gas. A un lado de la lente, bastante cerca de ella, cuelgo mi reloj de bolsillo y al otro lado, a una distancia

de 1,5 m. aproximadamente, un embudo de vidrio, con la parte ancha dando hacia la esfera.



Lente de plumón para refractar el sonido.



Lente de dióxido de carbono para refractar el sonido.

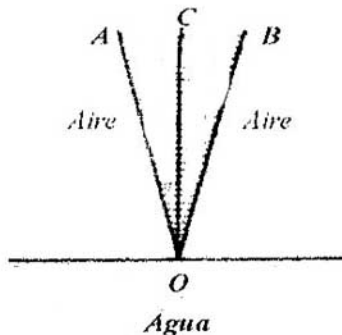
Aplico el oído al embudo y, moviendo convenientemente la cabeza, muy pronto localizo el lugar donde el tictac se oye muy alto. Éste es el "foco" de la lente. Si aparto el oído del foco, el sonido se debilita; si, en cambio, el oído permanece en el foco mientras se desplaza la esfera, el tictac también se debilita; cuando la esfera vuelve a su lugar, el reloj sigue

sonando como antes. Por lo tanto, la lente permite oír claramente el tictac del reloj que no se oye “a simple oído”, por decirlo así.”

166. La reflexión acústica

Cuando el sonido penetra en el agua, ¿se aproximará el “haz” acústico a la perpendicular de incidencia o se alejará de ella?

Si razonamos como en el caso del haz luminoso, sacaremos una conclusión errónea, puesto que la luz se propaga en el agua más lentamente que en el aire, en tanto que las ondas sonoras viajan en él con una velocidad cuatro veces mayor. Por ello, el haz sonoro que pasa del aire al agua, se desviará de la perpendicular de incidencia.



Refracción del sonido en el agua.

Por esta misma razón, cuando el sonido pasa del aire al agua, existe un ángulo límite que en este caso sólo es de 13° (correspondientemente al valor elevado del índice de refracción, equivalente a la razón de velocidades de propagación del sonido en ambos medios). La figura muestra cuán pequeño es el “cono” *AOB* que incluye todos los ángulos, bajo los cuales el sonido puede penetrar en el líquido. Los haces sonoros que no pertenecen a dicho cono, se reflejarán de la superficie del agua sin atravesarla (reflexión interna total del sonido).

167. El ruido del caracol

¿Por qué se oye un ruido leve en una taza o en un caracol aplicados al oído?

El ruido que percibimos cuando aplicamos una taza o un caracol al oído, se debe a que en este caso dicho objeto sirve de resonador que amplifica los ruidos procedentes del medio ambiente; generalmente no nos damos cuenta de ellos, puesto que son muy débiles. Este ruido mixto se asemeja al que producen las olas del mar al batir la costa, lo cual ha dado origen a muchas leyendas relacionadas con el ruido del caracol.

168. El diapasón y el resonador

Si un diapasón vibrante se coloca sobre una caja de madera, el sonido aumentará notablemente.

¿De dónde procede en este caso la energía excesiva? Cuando las vibraciones del diapasón se transmiten al resonador, el sonido se vuelve más alto, pero dura menos tiempo. De modo

que la cantidad de energía emitida por el diapasón vibrante y el resonador, es una misma. No se obtiene ningún exceso de energía.

169. ¿Adónde se van las ondas acústicas?

¿Adónde se va la energía de las oscilaciones acústicas cuando el sonido deja de oírse?

Cuando se extingue un sonido, la energía de las ondas acústicas se convierte en la del movimiento térmico de las moléculas de las paredes y el aire. Si en el aire de las habitaciones no hubiera rozamiento interno, y las paredes fueran perfectamente elásticas, ningún sonido se extinguiría: se oiría eternamente cualquier nota. En las habitaciones de dimensiones ordinarias las ondas acústicas son rechazadas por las paredes de 200 a 300 veces, trasmitiéndoles parte de su energía cada vez que se reflejan, hasta que, al fin y al cabo, quedan absorbidas totalmente, elevando la temperatura de las paredes. Por supuesto, la cantidad de calor que entregan a estas últimas, es infinitésima. Una persona debería estar cantando durante dos o tres días sin cesar para generar una caloría mediante este procedimiento.

170. La visibilidad de los rayos luminosos

¿Ha visto usted alguna vez rayos luminosos?

Muchos lectores están seguros de que han visto rayos luminosos. Semejantes testigos oculares quedarán muy asombrados al enterarse de que jamás los han visto. Esto no ha

podido ocurrir por la sencilla razón de que los rayos luminosos son invisibles. Cada vez que nos parece que vemos rayos de luz, lo que notamos son cuerpos iluminados por ellos. La luz que permite verlo todo, es invisible. He aquí lo que dijo sobre este tema John Herschel, hijo de un célebre astrónomo y gran astrónomo y físico él mismo:

“La luz, a pesar de que permite ver los objetos, de por sí es invisible. Hay quien dice que se puede ver un rayo luminoso cuando éste penetra en un cuarto oscuro por un orificio abierto en una pared, o cuando conos o rayos luminosos irrumpen en los espacios entre las nubes un día nublado, procedentes de una zona (invisible) del sol como del punto, en el cual convergen todas las líneas paralelas. Pero lo que vemos en este caso, no es la luz, sino innumerables partículas de polvo o niebla que reflejan cierta parte de la luz que incide en ellas.

Vemos la Luna porque la ilumina el Sol. Donde no hay Luna, no vemos nada, aunque estamos seguros de que la veremos cuando vuelva a ocupar la misma posición, y que veríamos el Sol si estuviéramos en la Luna (dondequiera que se encuentre, a menos que no esté tapada por la Tierra). Por consiguiente, en cada uno de estos puntos siempre hay luz solar, aunque es imposible verla como un objeto cualquiera. Existe, pues, en forera de proceso.

Lo que acabamos de explicar respecto al Sol, también se refiere a las estrellas; por eso, cuando contemplamos el cielo nocturno no vemos sino un fondo oscuro, excepto las direcciones en que vemos estrellas, aunque estamos seguros de que todo el espacio (fuera de la sombra de la Tierra) es atravesado constantemente por haces luminosos...”

Esta afirmación parece refutar el hecho de que percibimos claramente rayos de luz procedentes de las estrellas y, en general, de todo punto luminoso; además, cuando entornamos los ojos distinguimos un haz luminoso que llega hasta nosotros desde

un astro lejano. Tanto lo uno como lo otro es una equivocación. Lo que entendemos por rayos procedentes de las estrellas, es un efecto que surge como resultado de la disposición radial de las fibras que componen el cristalino del ojo humano. Si seguimos un consejo de Leonardo de Vinci y miramos las estrellas a través de un orificio muy pequeño practicado mediante una aguja en una hoja de cartulina, no veremos ningún rayo ni estrella; los astros nos parecerán partículas de polvo muy brillantes, puesto que en este caso un haz luminoso muy fino penetra en el ojo a través de la parte central del cristalino, de modo que la estructura radial de éste no lo puede deformar. Por lo que atañe al haz de luz que vemos al entornar los ojos, éste se forma a consecuencia de la difracción de la luz en las pestañas.

171. El orto del Sol

La luz tarda poco más de ocho minutos en recorrer la distancia del Sol a la Tierra. ¿Cómo está relacionado este hecho con el instante de salida de este astro?

El hecho de que el haz luminoso tarda 8 minutos en salvar la distancia del Sol a la Tierra, no nos permite concluir que si lo hiciera instantáneamente, veríamos la salida del Sol 8 minutos antes.

Los rayos de luz que penetran en el ojo cuando contemplamos el sol naciente, fueron emitidos hace 8 minutos, de manera que no tenemos que esperar ese lapso para que alcancen el lugar donde nos encontramos. Por eso, si la luz se propagara instantáneamente, veríamos la salida del sol en el mismo instante que ahora, y no 8 minutos antes.

172. La sombra del alambre

¿Por qué en un día soleado la sombra de un farol suspendido de un alambre se proyecta claramente en el pavimento, mientras que la del alambre casi no se ve?

La longitud de la sombra proyectada por el alambre iluminado por el sol depende de la posición del punto de intersección de sus tangentes comunes, trazadas al limbo solar y a la circunferencia que acota la sección del alambre. La figura muestra que el ángulo A de intersección de las tangentes es igual al ángulo bajo el cual el observador terrestre ve el limbo solar, o sea, es de $0,5^\circ$.



¿Por qué el alambre no proyecta sombra?

Este dato nos permite determinar la longitud de la sombra proyectada por el alambre: ésta es igual a su diámetro multiplicado por 2×57 , pues es sabido que un objeto que se ve bajo un ángulo de 1° se encuentra a una distancia equivalente a 57 veces su diámetro. Si el alambre que sostiene el farol, mide 0,5 cm. de grosor, la longitud de la sombra será de

$$0,5 \times 114 = 57 \text{ cm.}$$

o sea, esta magnitud es mucho menor que la altura a la que se encuentra suspendido el farol. Por ello, la sombra (sin contar la penumbra) del alambre no llega hasta el pavimento.



¿Por qué es tan corta la sombra PA proyectada por el alambre P?

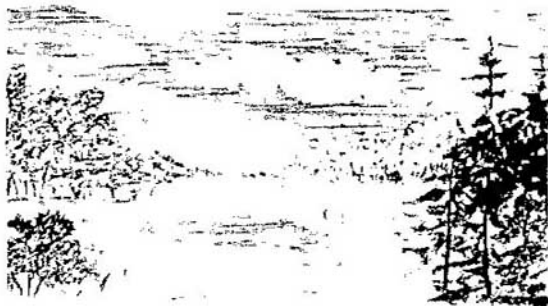
La sombra del farol (en el espacio) es mucho más larga, correspondientemente a su diámetro más grande. Si la sección de este último es de 30 cm., la longitud de la sombra proyectada en el espacio será igual a $0,3 \times 114 = 34 \text{ m.}$

Es decir, siempre alcanzará la tierra, puesto que se suelen colocar los faroles a una altura de 5 a 10 m.

173. La sombra de una nube

¿Qué es lo que tiene mayores dimensiones, una nube o su sombra completa?

La nube, lo mismo que el farol del ejercicio precedente, proyecta una sombra en forma de cono que se estrecha (y no se ensancha, como se cree a veces) hacia la tierra. Este cono es bastante grande, pues las dimensiones de la nube son considerables. Si ésta mide tan sólo 100 m. de diámetro, proyectará una sombra de más de 11 km. de longitud. Sería interesante calcular en qué magnitud disminuye la sombra proyectada sobre la tierra en comparación con las dimensiones reales de la nube.



¿Qué es lo que tiene mayores dimensiones, una nube o su sombra completa?

He aquí un ejemplo: una nube flota a una altitud de 1000 m., mientras que los rayos solares inciden sobre la superficie terrestre bajo un ángulo de 45° ; la longitud de la parte del cono

comprendida entre la nube y el suelo es de $1000 \times \sqrt{2} \approx 1400$ m. En semejante caso, la distancia entre las semirrectas que forman un ángulo de $0,5^\circ$, será de $1400/115$, es decir, de unos 12 m. Si la nube mide menos de 12 m. de diámetro, su sombra completa no alcanzará la superficie de la tierra. En las condiciones dadas y cuando la nube es de grandes dimensiones, ésta proyectará sombra completa sobre la tierra, 12 m. más corta que el diámetro correspondiente de la nube.

Si las nubes son de dimensiones considerables, semejante diferencia no tiene mucha importancia, de modo que las sombras perfiladas en el suelo no se distinguirán mucho de sus "prototipos". Por consiguiente, podemos considerar que sus dimensiones son iguales, aunque comúnmente se piensa que la sombra es más grande que la nube que la proyecta. Este hecho permite estimar fácilmente las dimensiones longitudinales y transversales de las nubes.

174. Lectura a la luz de la luna

¿Será posible leer un libro a la luz de la luna llena?

Subjetivamente, la luz de la luna se percibe como una luz bastante intensa, por lo cual generalmente se suele contestar afirmativamente a esta pregunta. Pero los lectores que han tratado de leer un libro a la luz de la luna llena, se habrán dado cuenta de que cuesta mucho trabajo distinguir los caracteres. Para leer un libro impreso con caracteres corrientes, se necesita una iluminación no menor de 40 lx^{15} , mientras que si los caracteres son menudos (gallarda), no menos de 80 lx .

A propósito, cuando el cielo está despejado, la luna llena sólo asegura una iluminación de una décima de lux. (La luna

llena produce la misma iluminación que una vela encendida a 3 m de distancia.) Queda claro, pues, que la luz del satélite natural, no es suficiente para leer un libro sin hacer algún esfuerzo. También estamos propensos a sobrestimar la iluminación natural en las noches blancas. En esta época, a la medianoche, la iluminación en la latitud de San Petersburgo es de 0,5 lx aproximadamente. Por tanto, durante las noches blancas se puede escribir o leer sin más luz que la natural sólo a las 10 de la “noche” o a las 2 de la madrugada, cuando la iluminación es de 30 a 40 lx.

175. El terciopelo negro y la nieve blanca

¿Cuál de estas dos cosas es más clara, el terciopelo expuesto a la luz del sol o la nieve limpia una noche de luna?

Parecería que no hay nada más negro que el terciopelo de ese color, ni puede existir cosa más blanca que la nieve virgen. No obstante, estas nociones clásicas de *negrura* y *blancura* se toman distintas si se utiliza un instrumento físico tan imparcial como el fotómetro. Resulta que el terciopelo más negro iluminado por los rayos solares es más claro que la nieve virgen una noche de luna.

La causa de esto es la siguiente: una superficie de color negro, por más oscura que parezca, no absorbe totalmente los rayos de luz visible que inciden sobre ella. Aun el negro de carbón y el de platino, que son las pinturas más negras de las que se conocen, dispersan del 1 al 2 % de la luz que sobre ellas incide.

Vamos a considerar que esta magnitud es del 1 % y que la nieve dispersa el 100 % de la luz recibida (estos datos están un poco exagerados; es conocido que la nieve reciente sólo dispersa

un 80 % de la luz que incide sobre ella). Se sabe que la iluminación que da el sol es 400.000 veces más intensa que la de la luna. Por ello el 1 % de la luz solar rechazada por el terciopelo negro es miles de veces más intensa que el 100 % de la luz de la luna dispersada por la nieve.

En otras palabras, el terciopelo negro expuesto a la luz del sol es mucho más claro que la nieve iluminada por la luna. Por cierto, lo que acabamos de exponer no sólo se refiere a la nieve, sino también al mejor pigmento blanco (el litopón, el más blanco entre los pigmentos, dispersa el 91 % de la luz recibida).

No hay superficie, excepto la que esté caldeada al rojo, que rechace más luz que la que incide sobre ella (la luna refleja 400.000 veces menos luz que el sol), por ello, es imposible que exista una pintura tan blanca que a la luz de la luna sea objetivamente más clara que la pintura más negra un día de sol.

176. Una estrella y una vela

¿Qué es lo que alumbra más, una estrella de primera magnitud o una vela encendida alejada a 500 m.?

La intensidad luminosa de una vela ordinaria supera cientos de miles de veces la de una estrella: una vela encendida y alejada de nosotros a 500 m produce la misma iluminación que una estrella de primera magnitud. Por ende, con arreglo a las condiciones indicadas al formular el problema, las dos fuentes de luz iluminan de manera igual (a saber, cada una genera 0,000004 lx).

177. El color de la superficie lunar

La Luna observada desde la Tierra a simple vista tiene color blanco y observada en un telescopio parece tener color de yeso. No obstante, los astrónomos afirman que su superficie es de color gris oscuro.

¿De qué forma conciliamos estos criterios?

La Luna sólo rechaza una catorceava parte de la luz recibida. Por lo tanto, los astrónomos dicen con toda razón que la superficie de nuestro satélite natural es gris. En una de sus conferencias sobre la luz J. Tyndall explica por qué la Luna vista desde la Tierra parece ser de color blanco: "La luz que un cuerpo recibe, se divide en dos partes, una de las cuales es rechazada por su superficie. Esta luz reflejada conserva el color que tenían originariamente los rayos incidentes. Si la luz incidente era blanca, la reflejada también lo será. Por ejemplo, la luz solar, aunque la rechace un cuerpo negro, seguirá siendo blanca. Las diminutas partículas del humo más negro que sale de una chimenea y se ilumina con un haz de luz del sol, reflejarán esta luz blanca... De modo que si la Luna estuviera tapizada del terciopelo más negro, no por ello dejaría de presentarnos su disco plateado." Por supuesto, el contraste con el cielo oscuro, sobre el cual parecen más brillantes las fuentes luminosas más débiles, no puede menos que realzar la intensidad de la luz de la Luna.

178. ¿Por qué la nieve es blanca?

¿Por qué la nieve es blanca aunque la forman diminutos cristales transparentes?

La nieve es de color blanco por la misma razón, por la cual parece ser blanco el vidrio triturado y, en general, todas las sustancias transparentes trituradas. Si desmenuzamos un trozo de hielo en un mortero o lo raspamos con un cuchillo, obtendremos polvo de color blanco. Este color se debe a que los rayos luminosos que penetran en los diminutos trocitos de hielo transparente, no emergen de ellos, sino que se reflejan en su interior por la superficie de separación del hielo y el aire (reflexión interna total). A su vez, la superficie del trozo de hielo, que refleja desordenadamente en todos los sentidos los rayos de luz recibidos, nos parece tener color blanco. De modo que la causa que condiciona el color blanco de la nieve, es su fraccionamiento. Si los espacios que hay entre las partículas de nieve se llenan de agua, ésta pierde su color blanco y se vuelve transparente.

179. Sacando lustre al calzado

¿Por qué tienen brillo los zapatos lustrados?

Por lo visto, ni el betún negro ni el cepillo tienen algo que pueda dar brillo al calzado. Por esto, este fenómeno es para muchas personas una especie de enigma.



A una persona disminuida 10.000.000 de veces, una placa bien pulida le parecerá un terreno poblado de colinas.

Para descubrir el secreto hay que comprender en qué se diferencia una superficie brillante de otra mate. Se suele creer que la superficie pulida es lisa, mientras que la mate es rugosa. Esto no es cierto: ambas superficies son rugosas. No existen superficies perfectamente lisas. Una pulimentada vista en un microscopio parece cortada a pico, lo mismo que el filo de una navaja vista en un microscopio; a una persona disminuida diez millones de veces, la superficie de una placa esmeradamente pulida le parecería un terreno poblado de colinas.

Cualquier superficie, sea mate o esté muy bien pulida, es rugosa, tiene abolladuras y raspaduras. Todo depende de las dimensiones de estas irregularidades y defectos. Si son menores que la longitud de onda de la luz que cae sobre ellos, los rayos serán reflejados de forma "regular", es decir, conservando todos los ángulos de inclinación de unos respecto a otros que tenían antes de ser rechazados por la superficie. Semejante superficie produce imágenes especulares, brilla y se dice que está pulida. Pero si, en cambio, dichas irregularidades miden más de la longitud de onda de la luz incidente, los rayos luminosos serán reflejados de forma desordenada, sin conservar los ángulos iniciales de inclinación de unos respecto a otros. Semejante luz difusa no da reflejos especulares y se dice que es mate.

De aquí se deduce que una superficie puede estar pulida para unos rayos y ser mate para otros. Para los rayos de luz visible, cuya longitud de onda es de 0,5 micras (0,0005 mm.) por término medio, una superficie con irregularidades menores que las que acabamos de indicar, será pulida; para los rayos infrarrojos, de onda más larga, también lo será; pero para los ultravioletas, de onda más corta, será mate.

Mas, volvamos al prosaico tema de nuestro problema: ¿por qué tiene brillo el calzado lustrado?

Si la superficie de cuero no está embetunada, presenta todo tipo de irregularidades, de dimensiones considerablemente

mayores que la longitud de onda de la luz visible, por consiguiente, es mate. Una capa delgada de betún viscoso, aplicada a tal superficie rugosa, camufla las irregularidades y alisa las fibras finas que hay en ella. Pasando muchas veces el cepillo, se quita el exceso de betún en los salientes y se llenan los entrantes, por lo cual las irregularidades se disminuyen y sus dimensiones se vuelven menores que la longitud de onda de los rayos visibles: a ojos vistos la superficie deja de ser mate y se torna brillante.

180. El número de colores del espectro y del arco iris

¿Cuántos colores tienen el espectro solar y el arco iris?

Generalmente se dice y repite que el espectro solar y el iris tienen siete colores. Éste es uno de los equívocos más frecuentes, y a nadie se le ha ocurrido refutarlo. Si examinamos la banda de colores del espectro sin atenernos a esta idea preconcebida, sólo distinguiremos los cinco colores fundamentales que siguen: **rojo, amarillo, verde, azul y violeta**. Estos colores no tienen límites acusados, la transición de uno a otro es gradual. De modo que además de los colores fundamentales enumerados se distinguen los siguientes matices

intermedios: **anaranjado, verde amarillo, verde azulado y añil**.

O sea, el espectro solar tendrá cinco colores si sólo tenemos en cuenta los fundamentales, o nueve si también consideramos los matices intermedios.

Pero, ¿por qué se acostumbra nombrar siete colores?

Inicialmente, I. Newton sólo distinguió cinco colores. Describiendo su famoso experimento (en su obra *Optics*) dice lo siguiente: “El espectro está coloreado de modo que su parte menos refractada es roja; la parte superior, más refractada, tiene

color violeta. En el espacio comprendido entre estos colores extremos se distinguen los colores amarillo, verde y azul claro.”

Posteriormente, tratando de armonizar el número de colores del espectro y el de los tonos fundamentales de la gama musical, Newton añadió dos colores más a los cinco enumerados. Esta afición al número siete, que no está motivada de ninguna manera, no es sino una reminiscencia de las creencias astrológicas¹⁶ y del tratado de la “música de las esferas” de los antiguos.

Por lo que se refiere al arco iris, ni siquiera podemos tratar de distinguir los siete colores: nunca se llega a distinguir cinco matices. Generalmente, en el arco iris sólo se ven tres colores, a saber, el rojo, el verde y el violeta; a veces apenas se aprecia el amarillo; en otros casos el iris ostenta una franja blanca bastante ancha.

No podemos menos que asombrarnos de cuán arraigada está en la mente humana la leyenda de los “siete” colores del espectro, a pesar de que en nuestra época la física se enseña por métodos experimentales. A propósito, este prejuicio aun subsiste en algunos libros de texto de escuela, mientras que ya está desterrado de los cursos universitarios.

Estrictamente hablando, aun los cinco colores fundamentales del espectro, a los cuales nos hemos referido, son convencionales hasta cierto grado. Podemos dar por sentado que la banda espectral sólo está dividida en tres zonas principales, a saber,

la zona roja,
la zona verde amarilla y
la zona añil.

Si tenemos en cuenta cada uno de los matices distinguibles, según muestran los experimentos, será posible clasificar más de 150 matices.

181. El arco iris

Hay quien afirma que ha visto un arco iris un 22 de junio al mediodía en Moscú.

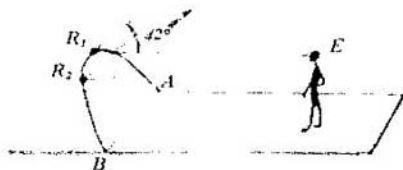
¿Será posible tal cosa?

El arco iris sólo se puede ver cuando el sol se encuentra formando un ángulo de 42° sobre el horizonte (ver figura).

En la latitud de Moscú, el día del solsticio de verano la altitud del sol meridional (el 22 de junio) es de

$$90^\circ - 56^\circ + 23,5^\circ = 57,5^\circ.$$

Por consiguiente, aquel día el sol estuvo más alto de lo necesario para que fuera posible ver el arco iris.



Para que sea posible observar el arco iris, el sol debe ascender a una altitud determinada respecto al horizonte.

182. A través de vidrios de colores

¿Qué color parecen tener las flores rojas cuando se miran a través de un vidrio verde? Y las azules, ¿qué color tienen?

El vidrio verde sólo deja pasar los rayos verdes y detiene todos los demás: las flores rojas sólo emiten rayos rojos y casi

no emiten rayos de otro color. Mirando una flor roja a través de un trozo de vidrio verde, no percibimos de sus pétalos ningún rayo, pues los únicos rayos que emiten, son detenidos por el referido vidrio. Por ello, una flor roja vista a través de semejante vidrio parecerá negra.

También parecerá tener color negro una flor azul vista a través del vidrio verde. He aquí lo que dice en su libro *La física enseñada en las excursiones estivales* el Prof. M. Piotrovski, físico, artista y observador muy sagaz de la naturaleza:

“Si observamos un macizo de flores a través de un trozo de vidrio rojo, advertiremos que las flores rojas, por ejemplo, el geranio, son tan intensas como las flores blancas; sus hojas verdes nos parecerán absolutamente negras, con un brillo metálico; las flores azules (el acónito, por ejemplo) se verán tan negras que apenas se distinguirán sobre el fondo negro de las hojas; las flores de color amarillo, rosa y violeta nos parecerán más o menos opacas.”

“Si miramos las mismas flores a través de un vidrio verde, nos impresionará el verdor brillante de sus hojas, cuyo fondo realza la intensidad de las flores blancas; algo más pálidas se verán las amarillas y las celestes; las rojas se convertirán en muy negras; las de color lila y rosa pálido se verán opacas y hasta grises, de modo que los pétalos de color rosa claro del escaramujo resultarán más oscuros que sus hojas.”

“Las flores rojas vistas a través de un vidrio azul también «se volverán» negras; las blancas «se tornarán» claras; las amarillas, totalmente negras; las celestes, casi tan claras como las blancas. Es obvio que las flores rojas nos envían mucho más rayos rojos que todas las demás; las amarillas despiden cantidades aproximadamente iguales de rayos rojos y verdes, pero muy pocos azules; las de color rosa y púrpura, muchos rayos azules y rojos, pero poco verdes, etc.”

183. El oro cambia de color

¿En qué condiciones el oro tiene color plateado?

Para que el oro pierda su característico color amarillo, hay que exponerlo a una luz exenta de rayos amarillos. Para crear este efecto, Newton retenía el color amarillo del espectro dejando pasar los demás colores y uniéndolos a continuación mediante una lente convergente. “Si los rayos amarillos se retienen antes de que atraviesen la lente –apuntó el sabio posteriormente– el oro (iluminado por los demás rayos) parecerá tan blanco como la plata.”

184. El percal visto a la luz eléctrica

¿Por qué el percal que tiene color lila a la luz diurna, parece ser negro a la luz eléctrica?

La luz de la bombilla eléctrica tiene muchos menos rayos azules y verdes que la del sol. De modo que el percal lila, iluminado por la luz de la bombilla eléctrica casi no refleja rayos; los únicos rayos que podría reflejar, no los recibe. Si el ojo humano no recibe rayos luminosos de una superficie, ésta le parece negra.

185. El color del firmamento

¿Por qué el firmamento que tiene color azul de día, se torna rojo cuando se pone el Sol?

El sol envía luz blanca a la atmósfera terrestre, pero nuestro ojo sólo percibe los rayos dispersados por las moléculas del aire y por las diminutas partículas de polvo que se encuentran suspendidas en él. Las moléculas de aire y las partículas de polvo rechazan los rayos de onda corta, es decir, sólo los de color azul oscuro y claro; las ondas más largas “contornean” dichas partículas y prosiguen su recorrido. Por consiguiente, en la luz dispersa predominan rayos azules, mientras que la que atravesó la atmósfera, tiene un exceso de rayos rojos.

De día vemos el cielo azul oscuro o claro, puesto que sólo recibimos rayos dispersos. Pero por la mañana o por la tarde, en cambio, cuando el sol sale o se pone, nuestro ojo percibe los rayos que atravesaron una gruesa capa de aire, de modo que vemos roja la franja del cielo próxima al horizonte. De la misma manera, durante los eclipses lunares totales el satélite natural de la Tierra se vuelve rojizo debido a los rayos que atravesaron la atmósfera terrestre.

Un meteorólogo norteamericano explica la variedad de los matices del cielo vespertino de la manera siguiente:

“El color del cielo depende del brillo relativo de los rayos de color que llegan al ojo del observador; a su vez, este brillo depende de la dispersión condicionada por el tamaño de las partículas de polvo presentes en la atmósfera y de su número... Si dichas partículas son relativamente pocas o pequeñas, el cielo es azul claro. Cuando aumentan su cantidad o dimensiones (por ejemplo, en los días secos y ventosos) o sólo las dimensiones (en vista de la higroscopicidad de las partículas, cuando se eleva la humedad atmosférica), los rayos de onda corta se debilitan mucho más, de modo que el cielo tiene un color que corresponde a una longitud de onda mayor, tornándose verde, anarillo e incluso rojo. Además, si las partículas de polvo son tan grandes que rechazan los rayos de todos los colores, el cielo se vuelve blanquecino. Esta descripción explica, por qué

el cielo suele estar matizado de diferentes colores por la tarde y por la mañana: rojo junto al horizonte, anaranjado y amarillo algo más arriba y verde o verde azulado a más altura aún. En este caso influye la altitud y, por consiguiente, la disminución de la cantidad de partículas y de su número en aquellas capas de la atmósfera que reciben los rayos solares antes de que éstos recorran el espacio desde el límite exterior de la atmósfera hasta la zona del cielo que estamos examinando, y desde esta última, hasta los ojos del observador.”

A propósito, el color del cielo vespertino es uno de los presagios “locales” del tiempo que hará al día siguiente. Si por la tarde el cielo se tiñe de rojo, al día siguiente no lloverá. Si junto al horizonte en el poniente el cielo tira a amarillo o verde, es muy probable que haga buen tiempo. Pero si por la tarde el cielo se matiza de gris homogéneo, es posible que llueva.

186. El eclipse artificial del Sol

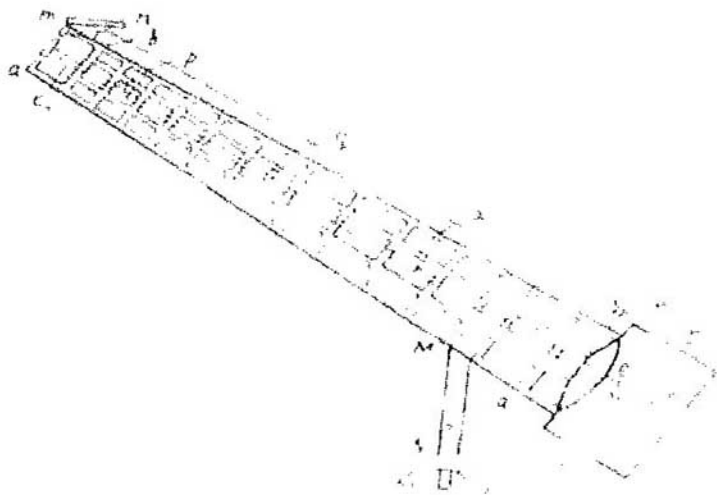
Un inventor patentó su dispositivo consistente en un tubo que permite ver las estrellas y otros objetos dispuestos cerca del borde del disco solar, sin esperar un eclipse total del astro.

He aquí la descripción del invento:

“El artefacto consta de un tubo de 35 a 50 m. de longitud compuesto de varillas de aluminio (para disminuir su peso) sujetadas unas a otras de modo que forman marcos rectangulares no muy grandes, según muestra la figura. En dichos marcos se colocan cristales pintados de negro por el lado interior; absolutamente impenetrables para la luz.

En el extremo superior del tubo está fijado un disco metálico que sustituye la Luna. Éste debe tapar el Sol como en un eclipse total. El disco se desplaza por una varilla que mide lo mismo que el tubo; dicha varilla también se desplaza

en sentido vertical, regulando la posición del disco. La varilla está sujeta en tres puntos (p , q y x) a la armazón del tubo para evitar las desviaciones y la vibración.



Dispositivo destinado a imitar el eclipse solar total.

Después de terminar las observaciones, la boca superior del tubo se tapa con el disco de aluminio mn (para proteger el interior de las precipitaciones) mediante un resorte y un alambre. El tubo puede girar como un telescopio permitiendo efectuar las observaciones sin que importe la posición del Sol en el cielo. El aparato está fijado sobre el soporte MN .

El telescopio ef , destinado a efectuar las observaciones, se encuentra dentro de la cámara oscura CD . Es sabido que

desde el fondo de un pozo profundo se pueden ver las estrellas en el cielo de día y a la luz del sol; desde la superficie terrestre las estrellas sólo se ven después de la puesta del sol. Este fenómeno se observa porque en el pozo no entran rayos luminosos procedentes de la atmósfera iluminada por el astro, que de día no dejan ver las estrellas desde la superficie terrestre."

"El mismo efecto se produce en el tubo descrito, en cuyo interior no entra luz y en cuya cámara oscura CD no entran rayos luminosos reflejados por la atmósfera iluminada. En el otro extremo del artefacto está colocado un disco que tapa el Sol. Precisamente en el espacio entre el disco y el borde del tubo se observan los fenómenos que tienen lugar junto a la llamada posición visible del astro."

¿Qué opina usted sobre este invento?

La idea de este invento está basada en un equívoco ingenuo de que es suficiente tapar el limbo solar con un círculo no transparente para crear la situación de eclipse solar. Otro error del inventor consiste en la seguridad de que desde el fondo de un pozo profundo es posible ver estrellas a la luz del sol. Ambos supuestos son teóricamente erróneos y no se corroboran experimentalmente.

¿Por qué, en condiciones normales, no distinguimos ni las estrellas ni los rayos de la corona solar junto al borde de este astro? No sólo porque nos deslumbra la luz brillante del sol, sino porque la atmósfera dispersa los rayos luminosos que inciden en ella, a consecuencia de lo cual la luz tenue procedente de la corona y las estrellas se pierde en la dispersa. Si no hubiera atmósfera, sobre el firmamento negro a la luz del sol divisaríamos tanto las estrellas como la corona solar. Cada partícula que se encuentra en suspenso en la atmósfera terrestre iluminada por el sol viene a ser un lucero que emite una luz

más intensa que las estrellas verdaderas, de modo que la que nos llega de los luceros es incapaz de penetrar a través de esa cortina brillante y continua. Ésta es la causa por la cual de día no vemos las estrellas.

Para un observador que se encuentra en el fondo de un pozo profundo, las condiciones son las mismas: entre su ojo y las estrellas media la misma capa de la atmósfera que las hace indistinguibles: los rayos luminosos procedentes de los astros se confunden con haces más intensos dispersados por las partículas de aire.

Es muy extraño, pues, que haya surgido esta leyenda tan poética de que desde el fondo de los pozos profundos y a través de las chimeneas de fábricas se ven estrellas. Ninguna de las publicaciones contiene pruebas directas de que esto sea factible: todos los autores que habían escrito sobre esto Aristóteles hasta John Herschel, hacen referencia a otras personas. Cuando Humboldt trató de averiguar entre los deshollinadores berlineses si alguno de ellos de día había visto estrellas desde el interior de las chimeneas de una fábrica, nadie le respondió afirmativamente¹⁷.

Ahora volvamos a examinar el eclipse solar artificial. Tapando el sol con un círculo y permaneciendo en el fondo del enorme océano de aire, protegemos el ojo de los rayos solares directos; no obstante, el cielo que se ve encima de dicho círculo sigue lleno de luz, y las partículas de aire continúan dispersándola y “acortando el paso” a la procedente de las estrellas y la corona solar. El caso se torna distinto si una pantalla protectora se coloca fuera de la parte densa de la atmósfera, como sucede cuando la luna tapa el sol: en este caso la pantalla intercepta los rayos solares antes de que alcancen la atmósfera terrestre.

De modo que los rayos luminosos no se dispersan en la zona sombreada de la atmósfera; no obstante, en dicha zona

penetran rayos dispersados por las zonas más claras cercanas a la sombra, llegando algunos de ellos hasta el observador. Por ello, ni siquiera en los momentos de eclipse solar total el firmamento es tan negro como a la medianoche. Así pues, la inconsistencia de la idea de este invento está a la vista.

187. La luz roja

¿Por qué en los ferrocarriles se utiliza la luz roja como señal de alto?

Los rayos rojos, como rayos de mayor longitud de onda, son menos dispersados por las partículas suspendidas en el aire que los de otros colores. Por eso, su alcance es mayor que el de estos últimos. A su vez, en el transporte, la visibilidad de la señal es la característica más importante: para detener el tren, el maquinista debe empezar a frenarlo a una distancia considerable del obstáculo.

Para obtener imágenes de los planetas (especialmente, de Marte) los astrónomos se valen del filtro infrarrojo, pues la atmósfera es más transparente para los rayos rojos que para los de otros colores. Los detalles que no se distinguen en una imagen ordinaria, se revelan más nítidamente en una foto sacada a través de una placa de vidrio que sólo deja pasar rayos infrarrojos; en este último caso se logra obtener imágenes de la superficie del planeta, mientras que en las fotografías ordinarias sólo aparece su atmósfera.

Además, se prefiere utilizar la luz roja como señal de alto porque el ojo humano es más sensible a este color que al azul o al verde.

188. La refracción y la densidad

¿Qué dependencia hay entre el índice de refracción y la densidad del medio?

Muy a menudo se suele afirmar que el índice de refracción de una sustancia es tanto mayor como mayor es su densidad. Se asevera que “al pasar un rayo de un medio menos denso a otro, más denso, su recorrido se aproxima a la perpendicular de incidencia”. Este fenómeno tiene lugar frecuentemente, pero no siempre, ni mucho menos.

Es cierto que la razón de los índices de refracción de dos medios es inversamente proporcional a la de las velocidades de la luz en éstos. Por lo tanto, el problema que nos interesa puede ser planteado de otra manera, más idónea para el análisis:

¿Será cierto que la velocidad de la luz es tanto menor cuanto más denso es el medio donde se propaga?

Si comparamos los tres medios más importantes —el vacío, el aire y el agua— nos daremos cuenta de que semejante dependencia no existe. Si adoptamos por unidad la densidad del aire, la de los tres medios se expresará con los datos siguientes:

vacío	0
aire	1
agua	770

Si adoptamos la velocidad de la luz en el aire como unidad, las respectivas velocidades de la luz serán las siguientes:

en el vacío	1
en el aire	1
en el agua	0.75

Como vemos, no se advierte la dependencia que se esperaba. Más aún, existen sustancias de una misma densidad, en las cuales la luz se propaga con velocidad diferente (es decir, los índices de refracción de estas sustancias son distintos). Así son el cloroformo y la caparrosa blanca diluidos convenientemente. También existen sustancias de índice de refracción igual, pero de densidad diferente: el vidrio es dos veces más denso que el aceite de cedro, no obstante la velocidad de la luz en ellos es igual (es imposible ver una varilla de vidrio colocada en el seno del aceite de cedro).

La proporcionalidad inversa entre el índice de refracción y la densidad tiene lugar en un solo caso, a saber, cuando se trata de un mismo medio, pero a diferente temperatura o presión. En los demás casos esta regla no sirve.

189. Dos lentes

He aquí una de las preguntas del certamen de Edison:

"El índice de refracción de una lente biconvexa es 1,5, y el de otra, 1,7. Ambas lentes son geoméricamente idénticas. ¿Habrá alguna diferencia óptica entre ellas? ¿Qué cambios sufre un haz luminoso al pasar por cada una de estas lentes si están sumergidas en un líquido transparente cuyo índice de refracción es 1,6?"

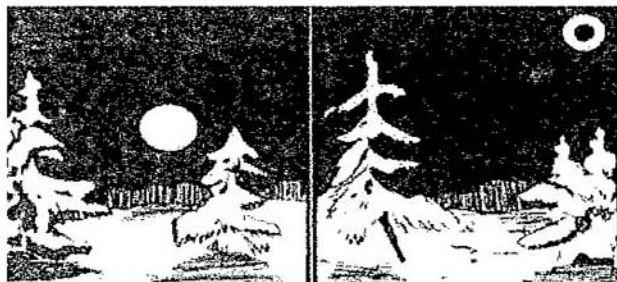
Las lentes de forma y dimensiones iguales, pero de índice de refracción diferente (1,5 y 1,7) tienen diferentes distancias focales principales; la lente del índice mayor tiene más corta la distancia focal (en el caso dado, en el 28%).

Si ambas lentes se encuentran en el seno de un líquido cuyo índice de refracción es 1,6; influirán de diferente manera en el comportamiento de los rayos luminosos: la de índice de

refracción 1,5; o sea, menor que el del líquido, actuará como una lente poco divergente, y la de índice mayor, como una poco convergente.

190. La Luna junto al horizonte

Cuando la Luna se encuentra junto al horizonte, parece tener dimensiones más grandes que estando próxima al cenit. ¿Por qué, pues, en su disco aumentado es imposible distinguir nuevos detalles?



¿En qué caso es mejor estudiar la superficie de la Luna, cuando está lejos o cerca del horizonte?

Se distinguirán nuevos detalles siempre que el objeto se observe bajo un ángulo visual mayor. Por eso, si observáramos la luna cerca del horizonte bajo un ángulo de visión mayor que cerca del cenit, descubriríamos nuevos detalles en su disco. Mas, cuando está cerca del horizonte, sus dimensiones angulares no superan, ni mucho menos, las que tiene estando junto al cenit, ya que este satélite natural no se acerca hacia el

observador cuando lo contempla próximo al horizonte; al contrario, es fácil comprender que en este caso se encuentra aún más lejos del observador que cuando está en lo alto del firmamento.

Aunque no hay necesidad de exponer las causas del aumento aparente de los astros junto al horizonte, no estará de más indicar que dicho efecto no tiene nada que ver con la refracción atmosférica, a la cual se atribuye frecuentemente.

En realidad, la refracción, lejos de aumentar el diámetro vertical del lucero junto al horizonte, lo disminuye, dando forma elíptica a los limbos solar y lunar. Aún no se ha logrado determinar definitivamente la causa verdadera del aumento del diámetro de los luceros junto al horizonte; pero sea cual fuere, este fenómeno no tiene nada que ver con la refracción atmosférica.

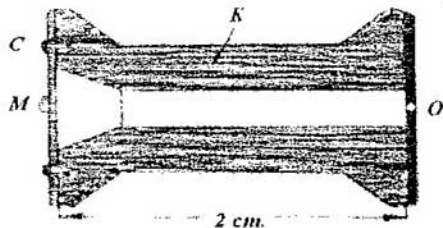
Volviendo a nuestro problema, hemos de subrayar que el aumento virtual del tamaño de los astros junto al horizonte es consecuencia de un efecto muy distinto del que tiene lugar cuando se mira a través de un telescopio o un microscopio. Los instrumentos ópticos cambian el sentido de los rayos que entran en el ojo humano, de modo que aumenta su imagen en la retina. En esto reside la esencia del efecto que crean los instrumentos ópticos que no agrandan los objetos ni los aproximan hacia el observador (éstas sólo son expresiones figuradas), sino que aumentan las imágenes de los objetos proyectadas sobre la retina, por lo cual cada una cubre un mayor número de terminaciones nerviosas. Si no se utiliza ningún instrumento, ciertos elementos del objeto se proyectan sobre una misma terminación nerviosa y, por ello, se confunden en un punto; en cambio, cuando se mira a través del artificio correspondiente, se proyectan sobre diferentes terminaciones y se perciben como entes distintos.

Nada similar se observa cuando aumenta aparentemente el tamaño de los astros cerca del horizonte; la Luna no se proyecta aumentada sobre la retina, por lo cual es imposible divisar nuevos detalles en su disco.

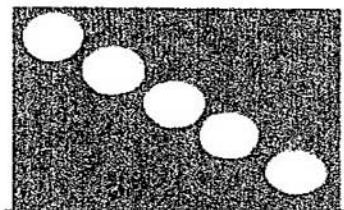
191. La luna vista a través de un orificio punzado en una hoja de cartulina

¿Por qué una hoja de cartulina con un orificio practicado en su centro puede utilizarse como una lupa?

Si examinamos un objeto pequeño a través de un diminuto orificio abierto en una hoja de cartulina, sus dimensiones nos parecerán notablemente aumentadas; este aumento no es aparente (como el del limbo solar próximo al horizonte), puesto que semejante dispositivo permite descubrir nuevos detalles en el objeto. No obstante, la función que en este caso cumple el referido orificio, se diferencia de la de una lupa.



*La Luna vista en un carrete de madera. El objeto se pega a un círculo de celuloide transparente C y se examina a través de un diminuto orificio O, practicado en el círculo de cartulina P.
El interior del carrete está pintado de negro.*



Compresión virtual del disco solar junto al horizonte por efecto de la refracción atmosférica.

La lente cambia el sentido de los rayos luminosos de modo que en la retina del ojo se proyecta la imagen aumentada del objeto que se examina. El orificio diminuto también la aumenta, pero no cambiando el sentido de los rayos, sino reteniendo aquellos que desdibujan la imagen sobre la retina. De manera que dicho orificio permite acercarse considerablemente el objeto hacia la pupila sin afectar la nitidez de la imagen; en otras palabras, hace las veces de diafragma.

Pero semejante orificio no es totalmente idéntico a la lente en todos los sentidos: ésta utiliza más luz y proporciona imágenes mucho más brillantes que un orificio.

La "lupa" representada en la figura consta del carrete de madera *K* (su interior está pintado de negro). El objeto está pegado al círculo de celuloide transparente *C* en el punto *M* y se examina desde una distancia de 2 cm. mediante un orificio muy pequeño *O* punzado en el círculo de cartulina *P*. Para que la imagen sea nítida, la distancia del ojo normal hasta el objeto debe ser de 25 cm., por ello, este último se verá bajo un ángulo 12,5 veces mayor que cuando la lupa no se utiliza. En otras palabras, se obtiene un aumento lineal de 12,5 veces. No

obstante, este aumento sólo es eficiente si el objeto esta muy bien iluminado.

192. La constante solar

Por constante solar se entiende la cantidad de energía térmica recibida cada minuto en el límite superior de la atmósfera por una superficie plana de 1 cm² de área, dispuesta perpendicularmente a los rayos solares.

¿Dónde y cuándo es más elevada esta magnitud, en un trópico en invierno o dentro de un círculo polar en verano?

La constante solar vale lo mismo (1,9 kcal por minuto) en todas las latitudes del globo terráqueo y en todas las estaciones del año. Durante todo el año el sol envía una cantidad igual de energía a cada centímetro cuadrado de superficie que esté dispuesta perpendicularmente a los rayos fuera de la atmósfera terrestre. Las diferencias del clima y de unas estaciones del año respecto a otras sólo se deben a que durante las diversas estaciones distintas zonas de la superficie terrestre y de una misma zona de ésta están inclinadas bajo diferentes ángulos con respecto a los rayos solares.

En la Tierra, cada centímetro cuadrado de una superficie perpendicular a los rayos solares, dondequiera que se encuentre, siempre recibirá una misma cantidad de calorías, tanto en invierno como en verano, lo mismo en el polo que en el ecuador. Pero en las zonas polares la superficie no forma ángulo de 90° respecto a los rayos solares; en el ecuador algunas zonas sólo lo forman dos días al año, mientras que el resto del año la superficie de la zona ecuatorial forma con ellos un ángulo muy próximo al recto, a diferencia de las regiones polares, donde es mucho más agudo.

193. El objeto más negro

Cite el objeto más negro.

Se dice que una superficie es negra si está iluminada y no envía al ojo rayos luminosos. Estrictamente hablando, en la naturaleza no existen semejantes objetos: los llamados colores negros (el negro de humo, el negro de platino, etc.) rechazan cierta parte de la luz que los ilumina.

Así pues, ¿cuál de los objetos es el más negro?

La respuesta es bastante inesperada: el objeto más negro es un agujero negro. Por cierto, no se tiene en cuenta un agujero cualquiera, sino uno bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, lo sería un orificio perforado en la pared de una caja cerrada, cuyo interior esté pintado de negro.

Coja una caja, píntela del color más negro por dentro y por fuera y abra en su pared un agujero pequeño: éste siempre le parecerá más negro que la pared de la caja. La causa de este efecto es la siguiente: una parte del haz de rayos luminosos que entran en la caja a través de dicho orificio, es absorbida por las paredes negras, en tanto que la otra es reflejada; esta última no sale de la caja por el agujero, sino que incide repetidamente sobre la superficie interior negra, volviendo a ser absorbida y reflejada parcialmente, etc. Antes de que el resto de rayos salga por el orificio, dentro de la caja la luz es absorbida y rechazada tantas veces que se debilita hasta no poder herir nuestro ojo.

Si este fenómeno se ilustra con datos numéricos, se entiende mejor en qué progresión disminuye la intensidad del haz luminoso mientras es reflejado muchísimas veces. Para simplificar, supongamos que el color negro de las paredes interiores de la caja absorbe el 90 % de la luz que recibe, dispersando el 10 % restante. Entonces, el haz reflejado una vez sólo tendrá 0,1 parte de la energía inicial; el reflejado dos

veces, $0,1 \times 0,1$, es decir, $0,01$; el reflejado tres veces, $0,1 \times 0,01$, es decir, $0,001$, etc.

Por ejemplo, es fácil calcular la intensidad de un rayo reflejado por vigésima vez: será 1×10^{20} veces menor que la inicial, a saber, constituirá su

0,00000000000000000001 parte.

Prácticamente, esta cifra equivale a la ausencia de luz, pues el ojo humano es incapaz de percibir una luz de intensidad tan insignificante. Si el haz inicial procedente del sol generaba una iluminación de 100.000 lx , después de la vigésima reflexión la iluminación será de sólo

0,0000000000000001 lx.

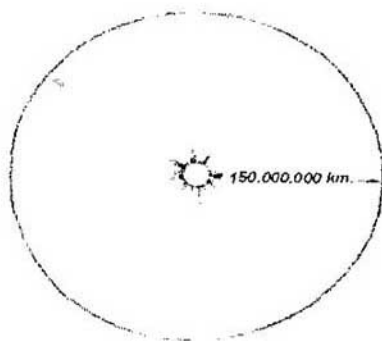
Se sabe que la iluminación creada por una estrella de sexta magnitud (de la estrella menos brillante que se distingue a simple vista) vale $0,00000004 \text{ lx}$. Por consiguiente, los rayos que salen por el orificio después de reflejados por vigésima vez son incapaces de producir algún efecto en la vista humana.

Ahora está claro, por qué el orificio de una caja o un recipiente de garganta estrecha es más negro que el color más negro. Semejante caja con orificio sirve de modelo del cuerpo negro o de cuerpo negro artificial.

194. La temperatura del Sol

¿Cómo se logró determinar la temperatura de la superficie del Sol?

La temperatura de la superficie solar se determina con arreglo a la ley de emisión del llamado cuerpo negro, es decir, de un cuerpo imaginario que absorbe el 100 % de la energía radiante que recibe (todos los cuerpos negros naturales, aun el negro de humo, no lo son absolutamente, pues rechazan cierta parte de los rayos que inciden sobre ellos). La ley física establecida por Stefan reza: la energía radiada por un cuerpo negro varía como la cuarta potencia de su temperatura absoluta.



Para el cálculo de la temperatura del sol.

Por ejemplo, un cuerpo negro calentado hasta 2400 K (2127° C) emite 3^4 , es decir 81 veces más energía que a los 800 K (527° C).

Para calcular la temperatura de la superficie del Sol partiendo de este dato, supongamos que el globo terráqueo se diferencia poco del cuerpo negro, y que la temperatura media de toda la superficie terrestre es de 17° C ó 290 K. El hecho de que en realidad las diversas zonas de esta última tienen una temperatura mayor o menor que la media, no influirá mucho

en el resultado del cálculo (lo mismo que el hecho de que la Tierra no es un cuerpo negro).

Es posible calcular geoméricamente que el limbo solar ocupa $1/188.000$ parte de toda la esfera celeste¹⁸. Vamos a suponer que la Tierra se encuentra en el centro de una esfera hueca de $150.000.000$ km. de radio (la distancia de la Tierra al Sol), y que cada unidad de superficie de esta última emite la misma cantidad de energía que el astro. En otras palabras, supongamos que todo el firmamento está cubierto de soles; serán 188.000 soles. Esta esfera resplandeciente enviaría al Globo 188.000 veces más energía que ahora.

Por consiguiente, la temperatura de nuestro planeta sería igual a la del astro, ya que en el caso de equilibrio térmico estabilizado se iguala la temperatura de todos los cuerpos. También hay que considerar que en estas condiciones la Tierra emitiría tanta energía como recibiría (en otro caso no estaría en equilibrio térmico con la esfera resplandeciente, sino que se calentaría o enfriaría).

Como la Tierra recibiría toda la energía enviada por la esfera caliente, las cantidades de energía emitidas por ellas serían iguales. Pero dicha superficie esférica emite la misma cantidad de energía que el Sol; por consiguiente, la superficie del planeta despediría la misma cantidad de energía que este último, y, al mismo tiempo, 188.000 veces más de lo que está emitiendo ahora. La temperatura (en grados Kelvin) es proporcional a la raíz cuarta de la emisión; si esta magnitud es 188.000 veces mayor, resulta que la temperatura será

$$\sqrt[4]{188.000}$$

es decir $20,8$ veces más alta. Multiplicando 290 K (la temperatura del globo terráqueo) por $20,8$; obtenemos 6000 K.

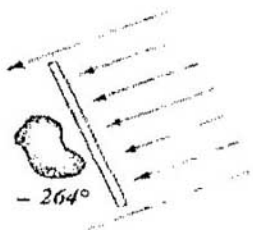
Ésta sería la temperatura del Globo. Como su temperatura equivaldría a la del Sol, de esta manera queda determinada la de este último: sería de unos 6000 K, es decir, de 5700° C.

Este razonamiento que semeja la demostración de un teorema de geometría, pues requiere de construcciones auxiliares bastante complicadas, muestra cómo se las ingenian los físicos para examinar los hechos que no pueden ser estudiados por vía experimental.

195. La temperatura del Universo

¿Qué se entiende por temperatura del Universo? ¿Qué temperatura tendrán los cuerpos que se encuentran en él?

Muchas personas utilizan el término “temperatura del Universo” seguras de que conocen y entienden su significado. Además, están muy seguras de que la temperatura del Universo es de 273° C, y que todo cuerpo del espacio interplanetario, que no esté dentro de la atmósfera terrestre, debe estar enfriado hasta cero absoluto.

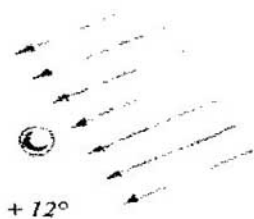


Un cuerpo dispuesto en el Universo a 150.000.000 km. del sol y protegido de sus rayos, tendrá una temperatura de -264° C.

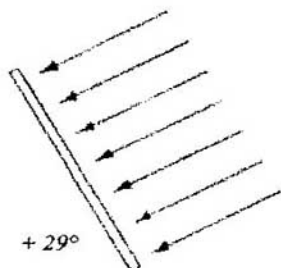
Tanto lo uno como lo otro son criterios equivocados. Primero, hay que tener en cuenta que un espacio que no contiene materia, no puede tener temperatura alguna. El término "temperatura del Universo" tiene significado convencional y no literal. Segundo, si todos los cuerpos del Universo tuvieran la temperatura de -273°C , el globo terráqueo, que también pertenece al Universo, correría la misma suerte; no obstante, la temperatura de la superficie terrestre es 290° mayor que el cero absoluto.

En fin, ¿qué debemos entender por "temperatura del Universo"?

Ésta es la temperatura que tendría el cuerpo negro (véase la respuesta al problema 194), protegido de los rayos del Sol y los planetas, es decir, sólo calentado por el calor de las estrellas. En distintas épocas esta magnitud se determinaba de distintas maneras, además, se obtenían valores diferentes. En opinión del físico francés C. Pouillet, su valor más probable sería de -142°C ; utilizando criterios muy diversos, su colega inglés H. Fröhlich obtuvo un valor de -129°C . El resultado más confiable lo proporciona el cálculo efectuado a base de la emisión de las estrellas y la ley d Stefan, siguiendo el mismo procedimiento que para determinar la temperatura del Sol.



*Los rayos solares
calentarían hasta $+12^{\circ}\text{C}$
una bola metálica
de 1 cm. de diámetro,
dispuesta a
150.000.000 km.
del Sol.*



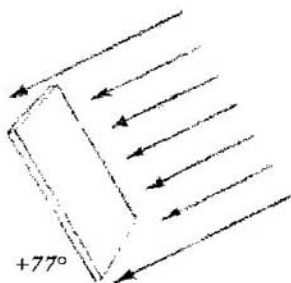
Un alambre fino, colocado perpendicularmente a los rayos solares y sujeto a las mismas condiciones, se calentaría a + 29° C.

La radiación total de las estrellas de un hemisferio celeste es 5.000.000 de veces menor que la del Sol. Si el firmamento brillase como el Sol, su radiación sería

$$(5.000.000 \times 188.000) / 2 = 470.000.000.000$$

veces mayor que la estelar.

Si la Tierra sólo fuera calentada por el calor de las estrellas, irradiaría una cantidad de energía 470.000.000.000 de veces menor que el Sol.



Una lámina metálica en estas mismas condiciones, tendría una temperatura de - 77° C.

Dado que la temperatura absoluta es proporcional a la raíz cuarta de la radiación, la del Globo sería

$$\sqrt[4]{470.000.000.000}$$

veces menor que la de la superficie solar.

Es sabido que la temperatura absoluta de esta última es de 6000 K, por lo cual las estrellas calentarían la Tierra en 6000 : 700 grados, es decir, sólo en 9 grados más que la temperatura del cero absoluto, lo cual equivaldría a -264°C . Ésta es la temperatura del Universo.

La temperatura media de nuestro planeta es mucho mayor que 9K, es de 290 K, ya que no sólo lo calienta la luz estelar, sino también los rayos del Sol. Si no existiera el Sol, en la Tierra reinaría un frío de -264°C .

Ahora está claro que cualquier objeto dispuesto en el espacio interplanetario, pero no protegido de los rayos solares, tendría una temperatura mucho mayor que los -264°C . La temperatura de dicho cuerpo dependería de su conductividad térmica, así como de su forma y las propiedades de su superficie. A continuación ofrecemos algunos ejemplos que muestran, cuánto se calentarían diversos cuerpos en semejantes condiciones.

- a) Una bola metálica de 1 cm. de diámetro que conduce bien el calor, colocada a una distancia de 150.000.000 de kilómetros del Sol se calentaría hasta $+12^{\circ}\text{C}$.
- b) Un alambre delgado y largo de sección circular, alejado a la misma distancia del Sol y colocado perpendicularmente a sus rayos, se calentaría hasta $+29^{\circ}\text{C}$. (El mismo alambre, dispuesto paralelamente a los rayos solares, se calentaría mucho menos). Cualquier otro cuerpo de forma alargada, colocado perpendicularmente a los rayos solares, tendría una temperatura de $+12$ a $+29^{\circ}\text{C}$.

- c) Una lámina metálica delgada, alejada del Sol a la misma distancia que la Tierra y dispuesta perpendicularmente a los rayos solares, se calentaría en el espacio interplanetario hasta 77°C . Si su cara que da a la sombra es de color claro y está pulida, mientras que la otra es negra y mate, se calentaría hasta $+147^{\circ}\text{C}$.

Se podría preguntar: ¿por qué, pues, nunca se calienta tanto semejante plancha metálica dispuesta en la superficie terrestre? Porque está rodeada de aire, y las corrientes de aire (la convección) se llevan parte de su calor, impidiendo que éste se acumule en ella. En la Luna, en cambio, donde no hay atmósfera, se calentaría hasta esa temperatura: es harto conocido cuánto se calienta la zona ecuatorial del satélite natural durante el día lunar. Si la cara negra de la referida lámina da a la sombra, en tanto que la pulida da al Sol, todo el objeto se calentará hasta una temperatura más baja, de -38°C .

Estos datos tienen mucha importancia práctica para mantener las condiciones adecuadas en la cabina del globo estratostático y, especialmente, en la astronáutica. Cuando Piccard ascendió por primera vez a la altitud de 16 km, en una cápsula cuyas dos mitades estaban pintadas de blanco y negro, esta última -a consecuencia de un defecto del mecanismo de giro- tuvo que permanecer durante algún tiempo virada del lado oscuro al Sol. Aunque fuera de aquella cabina de aluminio hacía un frío de -55°C , el tripulante sufrió mucho a causa del calor que hacía en su interior.

Los que tomaron parte en una expedición al Polo austral, se percataron de que la temperatura de los cuerpos alumbrados por el sol puede ser muy elevada, aunque la del medio ambiente sea muy baja. "Es interesante señalar que a la temperatura ambiente que generalmente era bastante baja, pocas veces superior a los 18°C bajo cero -escribió posteriormente uno de

los expedicionarios— nuestro actinómetro (instrumento destinado a medir la energía de la radiación solar) a veces indicaba unos 46° C sobre cero”. Este fenómeno tiene numerosas aplicaciones industriales. Por ejemplo, en Tashkent (Asia Central) fue construido un dispositivo que eleva la temperatura hasta 200° C a expensas de la energía solar, sin emplear lentes ni espejos. En Samarcanda se hizo hervir agua calentada por rayos solares mediante el mismo procedimiento, a pesar de que la temperatura ambiente era de 14 grados bajo cero.

En el espacio extraterrestre sería posible calentar hasta una temperatura extraordinariamente alta un cuerpo de absorción selectiva, es decir, que no absorbe todos los rayos que recibe (como hacen los cuerpos negros), sino sólo los de determinada longitud de onda. Por ejemplo, el astrónomo francés Ch. Fabry calculó que un cuerpo que sólo absorba rayos azules de longitud de onda 0,004 mm. y que se encuentre en la órbita terrestre en el espacio tendrá una temperatura de 2000° C aproximadamente: un trozo de platino cubierto de una capa de semejante sustancia se fundiría por la acción de los rayos solares. Es posible que a esas propiedades de la sustancia se deba la luminosidad de los cometas cuando se acercan al Sol.

Capítulo Sexto

VARIAS

196. Aleación magnética
197. Partición del imán
198. Un trozo de hierro en una balanza
199. Atracción y repulsión eléctrica y magnética
200. Capacidad eléctrica del cuerpo humano
201. Resistencia del filamento
202. Electroconductibilidad del vidrio
203. El daño que causa el encendido frecuente de las bombillas eléctricas
204. El filamento
205. Longitud del relámpago
206. La corriente mortífera
207. Longitud de un segmento
208. La gota de agua horada la piedra
209. Dos ciudades
210. Una botella en el fondo del océano
211. Calas, o bloques de calibrado
212. Una vela dentro de un tarro tapado
213. Cronología de las escalas termométricas
214. Los inventores de termómetros
215. La masa del globo terráqueo
216. El movimiento del Sistema Solar
217. Acerca del vuelo a la Luna
218. El hombre se pone a salvo de la gravedad
219. La tercera ley de Kepler
220. El movimiento perpetuo
221. El organismo humano y la máquina térmica
222. Meteoritos
223. La niebla en zonas industriales

- 224. El humo, el polvo y la niebla
- 225. Velocidad de las moléculas de agua
- 226. Movimiento térmico de las moléculas a 273° C bajo cero
- 227. El cero absoluto
- 228. El vacío
- 229. La temperatura media de la materia
- 230. Una diezmillonésima de grano
- 231. El número de Avogadro
- 232. Un litro de alcohol vertido en el Océano Mundial
- 233. Distancia entre las moléculas
- 234. Masas del átomo de hidrógeno y de la Tierra
- 235. El tamaño de la molécula
- 236. El electrón y el Sol
- 237. La masa de la energía
- 238. La mecánica escolar y la teoría de la relatividad
- 239. El litro y el decímetro cúbico
- 240. El peso del hilo de telaraña
- 241. Las botellas y los barcos
- 242. En la plataforma de una báscula
- 243. Salto retardado
- 244. Dos bolas
- 245. Caída “superacelerada”
- 246. En una escalera mecánica

196. Aleación magnética

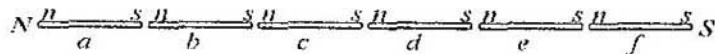
¿Existe alguna aleación que se magnetice más que el hierro?

Existe una aleación que, estando en iguales condiciones que el hierro, se imanta más. Se trata de la aleación llamada permívar, que consta de níquel (45 %), cobalto (25%) y hierro (30 %). La permeabilidad magnética del permívar es dos veces mayor que la del hierro.

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?

“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.



Un trozo de hierro en una balanza.

Semejante fenómeno tiene lugar si 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?

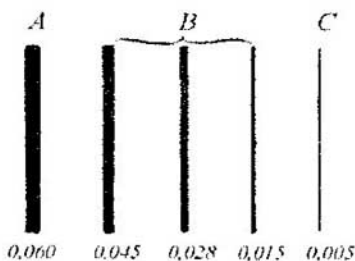
Si las bombillas de filamento de tungsteno se encienden y apagan con mucha frecuencia, se deterioran fácilmente. En estado frío, el filamento metálico absorbe restos de gas que quedan en el interior de la bombilla después de evacuarlo. En estado caliente, el mismo vuelve a desprender el gas absorbido,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

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.



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

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.

205. Longitud del relámpago

¿Qué longitud puede tener un relámpago?

Muy pocas personas tienen una noción más o menos exacta acerca de las dimensiones de los relámpagos. En realidad, éstos

suelen medir varios kilómetros de longitud. Una vez se observó un rayo de 49 km. de largo.

206. La corriente mortífera

Una corriente de 0,1 A de intensidad puede causar la muerte de la persona. La intensidad de corriente de la red de alumbrado suele superar varias veces esta magnitud. Entonces, ¿por qué esta corriente no siempre mata a la persona?

La intensidad de corriente de la red de alumbrado asciende a 0,5 A mientras el cuerpo humano no está "conectado" a ella. Cuando el mismo forma parte del circuito, disminuye considerablemente la intensidad de corriente, puesto que su resistencia es bastante elevada y varía desde cien ohmios hasta varias decenas de miles. Naturalmente una resistencia tan alta incorporada en el circuito disminuye la intensidad de corriente, de modo que ésta ya no puede perjudicar al organismo.

Sucede a veces que una tensión de hasta 5000 voltios no causa daño alguno a la persona, pues la resistencia del cuerpo humano puede ser muy considerable. Pero sería un error concluir que podemos descuidarnos totalmente y no prestar atención a la corriente eléctrica. Hay que tener en cuenta que la resistencia de nuestro cuerpo no es constante, sino que depende de muchos factores imposibles de prever. Por ello, una corriente de tensión no muy elevada puede afectar gravemente a la persona. Es imposible indicar un voltaje por encima del cual la corriente es perjudicial.

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

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

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 $E = 6 \times 10^{10}$ (en unidades del SI). Por eso, bajo la presión de la columna de agua de 1000 m (10^7 N/m²) la capacidad de la botella de vidrio de 1 litro ó 10^{-3} m³, de capacidad, disminuirá en

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

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?

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 desecharse este criterio cuando fue medida la fuerza necesaria para desprenderlas; resultó que ésta es de 3 ó 6 kgf/cm² e incluso más.



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

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 $0,2 \mu\text{m}$. ($0,0002 \text{ mm}$.)¹⁹. 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

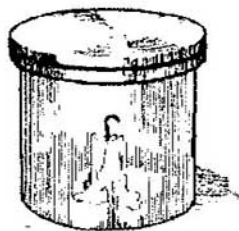
Ofrecemos la descripción de un experimento para comprobar la influencia de la presión atmosférica, que fue publicada en su tiempo en una revista para escolares:

“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?



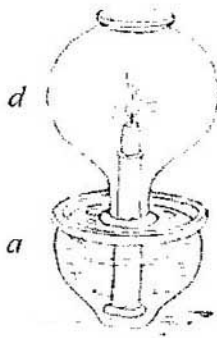
Un cabo de vela colocado en un tarro de cristal.

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.

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:



El experimento con una vela encendida descrito por Filón.

“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 fue el de 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 $5,5 \text{ g/cm}^3$; 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 $6,7 \times 10^{-11}$ 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 $M (6,7 \cdot 10^{-11})$ 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 $6.400.000^2$ veces y es

$$\frac{6.7M}{6.4^2} \times 10^{-23} \text{ N}$$

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 \sim 10 N. Por eso podemos escribir la igualdad

$$\frac{6.7M}{6.4^2} \times 10^{-23} \text{ N} = 10 \text{ N}$$

de donde

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

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

216. El movimiento del Sistema Solar

En uno de los libros de problemas de física hemos encontrado el siguiente problema:

“Los astrónomos consideran que el Sistema Solar se mueve con una velocidad aproximada de 17 km. por segundo hacia la constelación Lira. ¿Qué fenómenos sería posible observar en la Tierra si este movimiento no fuera uniforme, sino acelerado o retardado?”

Responda.

El autor del mencionado libro de problemas de física da la respuesta siguiente a este problema:

“Si el movimiento sólo fuera acelerado, todos los cuerpos dispuestos en el hemisferio que da a la constelación Lira, pesarían más, mientras que los del hemisferio opuesto pesarían menos.”

Esta respuesta sería correcta si la fuerza que pone en movimiento los cuerpos celestes no influyera de ninguna manera en los objetos que se encuentran en ellos. Pero conocemos cuál es la única fuerza capaz de imprimir movimiento acelerado al sistema planetario: la gravitación. Dicha fuerza comunica aceleraciones iguales a todos los cuerpos. Los planetas y los cuerpos que se encuentran en ellos, en todo momento deberían moverse con velocidad igual, es decir, se hallarían en reposo unos respecto a otros. Por consiguiente, el peso de los objetos no cambiaría. Observando los fenómenos que tienen lugar en la Tierra, es imposible determinar si se mueve progresivamente o no, si está en movimiento acelerado o uniforme.

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

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

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

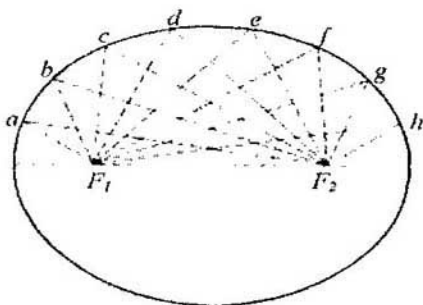
La tercera ley de Kepler se formula de diferentes maneras en diversos libros. Unas veces se afirma que los cuadrados de los periodos de revolución de los planetas y cometas se relacionan entre sí como los cubos de las respectivas distancias medias al Sol. Otras veces se sostiene que lo hacen como los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

¿Cuál de estas dos formulaciones es correcta?

Las dos formulaciones son idénticas: el semieje 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 periodo 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_1a, F_1b, F_1c, F_1d , 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.

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 $2\tilde{a}$ de la elipse (esta curva posee semejante propiedad). Por consiguiente,

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



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

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

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

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:

$$2S = 2n\bar{a}$$

Por lo cual

$$S/n = \bar{a}$$

Mas, S/n es la distancia media del planeta al Sol, en tanto que \bar{a} designa el semieje mayor de la órbita. Por consiguiente, la distancia media del planeta al astro es igual al semieje 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 (0°). 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 ó 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 (ídem); 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:

$$T_f - 200 = 200 (10^8)^{0.29} = 40.000 K$$

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. Récuérdesse, 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 en seguida.

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 en seguida. 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).

226. Movimiento térmico de las moléculas a 273°C bajo cero

¿Cuál es la velocidad aproximada de movimiento térmico de las moléculas de hidrógeno a -273°C ?

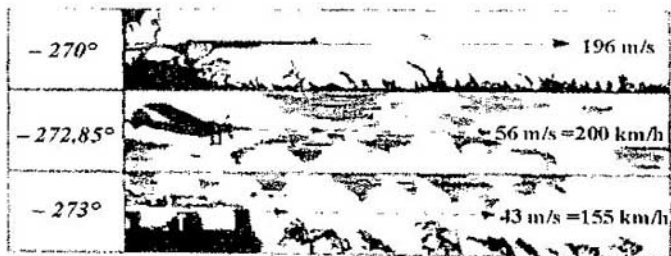
He aquí la respuesta que parecerá muy correcta a muchos lectores:

“La temperatura de -273°C es la del cero absoluto. A esa temperatura la velocidad progresiva de las moléculas es nula. Por ello, a 273°C bajo cero las de hidrógeno, al igual que cualesquiera otras, se encuentran en reposo.”

No obstante, la respuesta es errónea, puesto que la temperatura del cero absoluto es de $-273,15^{\circ}\text{C}$, y no de -273°C .

¿Tendrán mucha importancia las 0,15 de grado? Ya que, de seguro, a temperaturas tan bajas las moléculas estarán muy cohibidas, de modo que una diferencia de $0,15^{\circ}\text{C}$ no debería cambiar radicalmente la situación.

Así puede parecer, pero el cálculo no justifica estas expectativas: la velocidad de las moléculas disminuye proporcionalmente a la raíz cuadrada de la temperatura (en grados Kelvin), por lo cual a temperaturas muy bajas las moléculas todavía se mueven con bastante rapidez. Hagamos el cálculo.



¿Qué velocidad tendrán las moléculas de hidrógeno a temperaturas próximas al cero absoluto?

La teoría cinética de los gases afirma que a 0°C , es decir, a 273 K , las moléculas de hidrógeno se mueven con una velocidad de 1843 m/s . Por consiguiente, su velocidad media x

a -270°C (es decir, a $3,1\text{ K}$) se determina haciendo uso de la proporción siguiente:

$$\frac{x}{1843} = \frac{\sqrt{3.1}}{\sqrt{273.5}}$$

de donde

$$x \approx 196\text{ m/s.}$$

Las moléculas de un gas tan enfriado tienen una velocidad superior a la de una bala. Aun a la temperatura en $1/4$ de grado mayor que el cero absoluto la velocidad de movimiento de las moléculas de hidrógeno es bastante elevada. Haciendo uso de la proporción

$$\frac{y}{1843} = \frac{\sqrt{0.25}}{\sqrt{273.5}}$$

determinamos

$$y \approx 56\text{ m/s}$$

es decir, su velocidad supera 200 km/h (la de una avioneta).

Volvamos, pues, a la pregunta planteada y respondamos, qué velocidad tendrán las moléculas de hidrógeno a -273°C , es decir, a $0,15\text{ K}$. Para ello utilizaremos la proporción siguiente:

$$\frac{z}{1843} = \frac{\sqrt{0.15}}{\sqrt{273.5}}$$

de donde

$$z \approx 43\text{ m/s.}$$

O sea, la velocidad de las moléculas es de unos 155 km/h y supera casi dos veces la de un tren ordinario. Semejante velocidad no se puede considerar ínfima, próxima a la de estado en reposo, ni mucho menos.

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:

- del primer principio (ley de conservación de la energía) se deduce la imposibilidad del móvil perpetuo de primera especie;
- del segundo principio, la imposibilidad del móvil perpetuo de segunda especie;
- 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 $0,0001 \times 1.000.000 = 100\text{ mm.} = 10\text{ cm.}$

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!

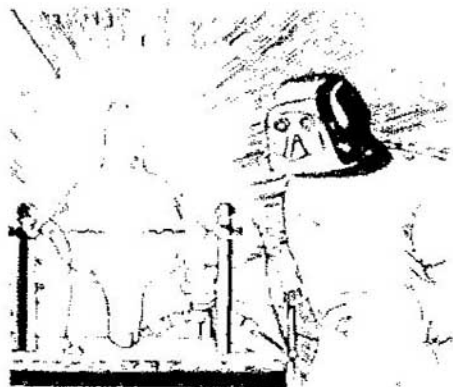
Esta estimación sorprendente dejará de ser paradójica si recordamos que la masa de los planetas del Sistema Solar constituye $1/700$ (0,0013) parte de la del Sol, y que una relación del mismo orden tendrá lugar en el caso de otras estrellas (si tienen sus respectivos sistemas planetarios). Por consiguiente, 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° 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.

Posemos 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 E.E.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 (figura) 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. 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.

20.000° C	Obtenida 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° 1.475°	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.

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 muchas 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, 6.6×10^{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?

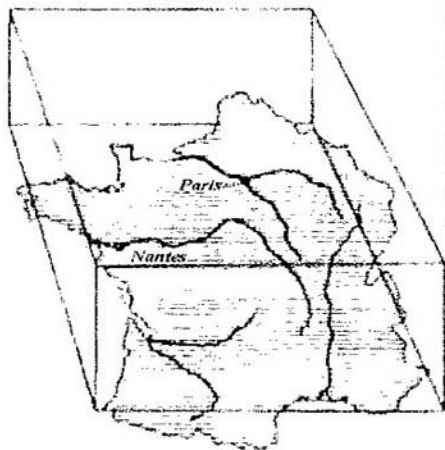
Es inútil tratar de ubicar dentro de los límites de una ciudad, por muy extensa que sea, una caja llena de cabezas de alfiler cuyo número equivale al de Avogadro, aunque las paredes de ésta midan 1 km. de altura. Tanafía “caja” no cabría en el territorio de Francia, el país más extenso de Europa occidental.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



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

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 (C_2H_6O) 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 $148 \times 10^7 km^3$, o 148×10^{19} litros $\approx 15 \times 10^{20}$ 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.

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.



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

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 cm. (3×10^{-6} cm.), en tanto que el diámetro de la molécula de hidrógeno es de 2×10^{-8} 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 $1,7 \times 10^{-24}$ g., mientras que la del globo terráqueo es igual a 6×10^{27} g., su media proporcional será de

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

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;

- a) la estatura media de la persona sería de 1700 km.;
- b) el cuerpo de un ratón mediría 100 km. de longitud; el cuerpo de una mosca mediría 7 km. de largo;
- c) el cabello humano sería de 100 m. de grosor;
- d) los glóbulos rojos de la sangre tendrían un diámetro de 7 m.
- e) Las moléculas tendrían un tamaño igual al de un punto impreso.

236. El electrón y el Sol

¿A qué equivale x en la proporción siguiente:

$$\frac{\text{diámetro del electrón}}{x} = \frac{x}{\text{diámetro del Sol}}$$

Una bolita cuyo diámetro equivale a la media proporcional del diámetro del electrón y el Sol, es sorprendentemente pequeña. He aquí el cálculo:

el diámetro del electrón es de 4×10^{-13} cm.;

el diámetro del Sol equivale a 14×10^{10} cm.;

$$x = \sqrt{4 \times 10^{-13} \times 14 \times 10^{10}} = \sqrt{0.058} = 0.24 \text{ cm.} = 2.4 \text{ mm.}$$

Así pues, una bola que es tantas veces menor que el Sol como es mayor que el electrón, tiene el tamaño de un perdigón.

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. En general, las masas, con las cuales tenemos que vérnoslas 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.

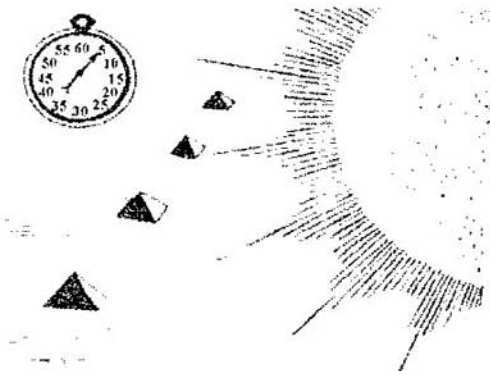
Estas relaciones serán mucho más patentes si las traducimos al lenguaje de los números. Una máquina de vapor de 3000 CV realiza un trabajo de 2.250.000 julios por segundo, o sea, de unos 800.000.000 de julios por hora. A nuestro modo de ver, esta cantidad de trabajo es enorme, pero su masa es muy pequeña, 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.



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

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

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

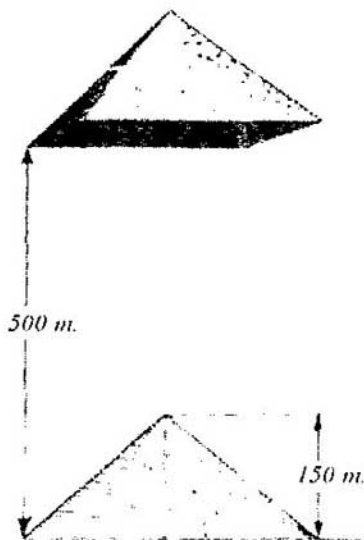
Este dato quiere decir que el astro pierde cada segundo cerca de 4.500.000.000.000 g., equivalentes a 4.500.000 t.

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.

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.



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

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:

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

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

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

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 décimosegunda 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 0,0000000000005 de su masa en estado de reposo.

Según vemos, la masa ha aumentado en una magnitud imposible de determinar mediante el pesaje más exacto²⁰. 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 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 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

$$\frac{3,14 \times 0,0005^2}{4} \times 100.000 \approx 0,02 \text{ g.}$$

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

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:

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

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 $0,3 v^2$. Suponiendo que el del paracaidista equipado es de 900 N, obtenemos

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

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 $9,8$ m/s². 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

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

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:

- 1) *está fijada por los extremos una cadena;*
- 2) *está fijado un péndulo desviado hacia un lado respecto de la posición de equilibrio;*
- 3) *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 plomo 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 1 s. 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

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

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

APÉNDICE

Unidades de Longitud

1 angstrom (Å)	10^{-10} m.
1 unidad astronómica (u.a.)	1.49×10^{11} m.
1 pulgada	2.54×10^{-2} m.
1 micra	10^{-6} m.
1 parsec (pc)	3.09×10^{16} m.
1 pie	0.305 m.

Unidades de Área

1 área (a)	10^2 m ²
1 hectárea (ha)	10^4 m ²
1 barn	10^{-28} m ²

Unidades de Volumen

1 litro (l)	10^{-3} m ³
-------------	--------------------------

Unidades de Masa

1 unidad de masa atómica (uma)	1.66×10^{-27} kg.
1 gramo (g)	10^{-3} kg.
1 tonelada (t)	10^3 kg.

Unidades de Tiempo

1 año	3.16×10^7 s.
1 minuto (min.)	60 s.
1 día solar medio = 24 horas	86.400 s.
1 hora (h)	3.600 s.

Unidades de Fuerza

1 dina	10^{-5} N
1 kilogramo-fuerza (kgf) = 1 kilopondio (kp)	9.81 N

Unidades de Velocidad

1 kilómetro por hora (km/h)	0.278 m/s
-----------------------------	-----------

Unidades de Trabajo, Energía y Cantidad de Calor

1 Wh	3.6×10^3 J
1 caloría (cal)	4.19 J
1 kilogramo-fuerza-metro (kgf-m)	9.81 J
1 ergio	10^{-7} J

Unidades de Potencia

1 kilogramo-fuerza-metro por segundo (kgf m/s)	9.81 W
1 kilocaloría/hora	1.16 W
1 caballo de vapor (CV)	736 W
1 ergio/s	10^{-7} W

Unidades de Presión

1 atmósfera técnica (at) = 1 kgf/cm ²	9.81×10^4 Pa
1 atmósfera física o normal (atm)	1.05×10^5 Pa
1 bar (b)	10^5 Pa
1 dina/cm ²	0.1 Pa
1 kgf/m ²	9.81 Pa
1 kgf/mm ²	9.81×10^6 Pa
1 mm de mercurio (1 mmHg)	133 Pa
1 mm de agua (1 mmH ₂ O)	9.81 Pa

Unidades de Ángulo Plano

1 grado (1°)	1.75×10^{-4} rad
1 minuto de ángulo ($1'$)	2.91×10^{-4} rad
1 segundo de ángulo ($1''$)	4.85×10^{-6} rad

NOTAS

¹ El micrómetro también viene a ser una medida de longitud demasiado grande para la técnica moderna: la producción en cadena de maquinaria muy compleja, factible sólo a condición de que las piezas utilizadas en ellas sean intercambiables, obligó a introducir en la práctica aparatos e instrumentos de medida que registran décimas de micrómetro (véase el ejercicio 211, Calas, o bloques de calibrado).

² Estrictamente hablando, sólo podemos referirnos al diámetro del electrón con cierto convencionalismo. “Suponiendo, observa J. Thompson, que el electrón está sujeto a las mismas leyes que una bola metálica cargada en un laboratorio, podemos calcular su “diámetro”: el resultado será de $3,7 \cdot 10^{-13}$ cm.; mas, no se ha logrado comprobarlo por ningún experimento”.

³ Dos años antes de morir, este inventor norteamericano anunció que quería otorgar una beca al joven más ingenioso de los EE.UU. Poco tiempo después reunió un grupo de alumnos más talentosos, uno de cada estado. Edison se puso al cargo de la comisión que él mismo había instituido para agraciar a uno de los aspirantes y les propuso responder por escrito a 57 preguntas relativas a la química, física y matemáticas, así como de carácter general. Ganó el certamen el joven de 16 años, Wilbour Haston, procedente de la ciudad de Detroit.

⁴ Las barras de la torre Nivel, de 70 t. de peso cada una, se sustituirían en el modelo por trozos de alambre delgado de 0,07 g. de masa.

⁵ Jean-Charles de Borda, matemático, astrónomo y marino francés, realizó en el Observatorio de París una experiencia con un péndulo oscilante en el vacío reduciendo al mínimo el rozamiento en el punto de suspensión; aquel dispositivo osciló 30 horas. Es muy interesante observar el amortiguamiento gradual de las oscilaciones de su homólogo de 98 m. de longitud suspendido en la Catedral de San Isaac en San Petersburgo, cuya amplitud inicial de 12 m. disminuye diez veces al cabo de tres horas. Seis horas después del comienzo de las observaciones esta magnitud se reduce hasta 6 cm., y al cabo de nueve horas, hasta 6 mm. Doce horas después del comienzo de las observaciones las oscilaciones se vuelven imperceptibles a simple vista.

⁶ Siempre que se desprece el rozamiento. Si éste es considerable, la pesa no ascenderá.

⁷ Rey de Siracusa; según refiere una tradición, era pariente de Arquímedes.

⁸ A la presión de 25.000 at. una columna de agua de 1 m. de altura se comprime hasta 65 cm. (experimentos de James Basset).

⁹ La película superficial de líquido consta sólo de una capa de moléculas.

¹⁰ Este mismo criterio se expone en Pequeño Larousse de ciencias y técnicas, artículo Vórtice.- Nota del T.

¹¹ Con arreglo a las leyes del choque de cuerpos completamente elásticos de masas iguales.

¹² Los líquidos son muy resistentes a la rotura; por ejemplo, la resistencia del agua equivale a 10.000 at. Luego, en este sentido, los líquidos no son inferiores a los sólidos: el agua es tan resistente a la rotura como el alambre de acero. La facilidad aparente con que los líquidos se dividen en partes, no contradice en absoluto lo que acabamos de exponer. Durante su trasvase sólo observamos los cambios externos, y no el debilitamiento de la cohesión interna de la sustancia.

¹³ Al leer este párrafo, al lector le puede ocurrir la siguiente idea errónea: como encima del recipiente inferior la columna de aceite es más alta que encima del superior, el mercurio será desplazado del primero al segundo. En este caso no se tiene en cuenta el hecho de que no sólo el aceite, sino también el mercurio contenido en el tubo que comunica ambos vasos, presiona (en sentido opuesto) sobre el líquido del recipiente inferior; su presión es más notable para este último que para el otro recipiente. En suma, hay que comparar la diferencia de presiones de ambas columnas de aceite con la de las columnas de mercurio. Es fácil comprender que la diferencia de alturas de las columnas de ambos fluidos es una misma, pero, dado que el mercurio pesa mucho más que el aceite, la presión del primero es más notoria. (Si sustituimos mentalmente el aceite por el aire, obtenemos la explicación habitual del funcionamiento del sifón.)

¹⁴ La densidad del aire sería mayor que la del agua sólo a la presión de 5000 at., o sea, ya la profundidad de 50 km!

¹⁵ 1 lux (lx) es la unidad de medida de iluminación, que se define como la iluminación producida por un flujo luminoso de 1 lm. que incide perpendicularmente sobre una superficie de 1 m².

¹⁶ En la época antigua los siete planetas eran catalogados como deidades (el Sol y la Luna también se consideraban planetas); esta adoración de los cuerpos celestes perduró en toda la astrología medieval. La influencia que el Sol ejercía sobre las cosechas y el tiempo, era muy evidente, por lo cual era natural que se creyese que el destino y los hechos humanos estaban sujetos a la “voluntad” de los planetas... Los meses fueron divididos en semanas en honor a estos últimos. Y, por supuesto, a los siete planetas se atribuía el carácter mágico y sagrado del número siete en la Biblia; en alquimia figuraron siete piedras fundamentales; la octava tiene siete notas y el espectro, siete colores.

¹⁷ Esto es cierto para todas las estrellas fijas, pero no lo es para todos los planetas: en ciertos períodos algunos de ellos, sobre todo, Venus, pueden brillar mucho más que las estrellas. Uno de los pastores del Cáucaso me dijo en una carta que desde el fondo de un desfiladero muy profundo de día solía ver dos estrellas; además recalcó que sólo eran dos, por lo visto, siempre las mismas. No tenemos por qué dudar de lo que dice el pastor. Lo más probable es que ha visto Venus y Júpiter en la época de brillo máximo, cuando Venus tiene magnitud estelar - 4,4, mientras que Júpiter, - 2,5. Quiere decir que Venus brillaba 140 veces más que una estrella de primera magnitud, y Júpiter, 25 veces más. Semejantes luceros pueden distinguirse en el firmamento incluso en pleno día (de día Venus se observa a simple vista aun en condiciones normales).

¹⁸ He aquí el cálculo. El diámetro angular (medio) del Sol es de $0,53^\circ$; por ello, el disco solar ocupa en el cielo $\frac{1}{4} \times \pi \times 0,53^2$ grados cuadrados. ¿Cuántos grados cuadrados mide toda la superficie esférica? El radián es 57,3 veces mayor que el ángulo de 1° ; por tanto, el radián vale 57,3 ángulos de este tipo, mientras que la superficie esférica será de cielo $\frac{1}{4} \times \pi \times 57,3^2 = 41.252$ grados cuadrados. Dividiendo 41.252 por 0,2206 determinaremos cuántas veces la superficie de toda la esfera es mayor que la superficie visible del Astro Rey.

¹⁹ Además, se fabrican calas con una exactitud más elevada, ¡de 0,01 μm !, puesto que en algunos mecanismos hay que asegurar una precisión muy alta. Por ejemplo, se necesita construir un árbol de tractor con una exactitud no menor de 0,01 mm. (este árbol pesa más de media tonelada); figúrese, cuán alta debe ser la precisión de fabricación de las piezas de mecanismos más exactos.

²⁰ Por supuesto, es imposible pesar un cuerpo en movimiento mediante una balanza. En tales casos la masa se establece por métodos indirectos. Pero ninguno de ellos puede proporcionar un resultado más exacto que el pesaje del cuerpo en reposo.