

Capítulo Tercero

GASES

78. El tercer componente del aire
78. El gas más pesado
79. ¿Resistimos un peso de 20t?
80. La fuerza del aliento
81. La presión de los gases de la pólvora
82. Unidad de medida de la presión atmosférica
83. El agua contenida en un vaso puesto boca abajo
84. El huracán y el vapor
85. La fuerza de tiro de una chimenea
86. ¿Dónde hay más oxígeno?
87. Las burbujas
88. Las nubes
89. La bala y el balón
90. ¿Por qué es posible pesar un gas?
91. El ejemplo de los elefantes
92. La presión creada en la barquilla del globo estratostático
93. La cuerda de la válvula
94. Un barómetro suspendido de una balanza
95. El sifón en el aire
96. El sifón en el vacío
97. El sifón para los gases
98. Elevación del agua mediante una bomba
99. La salida del gas
100. Un proyecto de motor que no consume energía
101. Sofocar incendios con agua hirviendo
102. Gas contenido en un recipiente
103. Una burbuja en el fondo de un océano
104. La rueda de Segner en el vacío
105. El peso del aire seco y húmedo
106. El vacío máximo
107. ¿Qué es lo que se entiende por vacío?
108. ¿Por qué existe la atmósfera?
109. Un gas que no llena todo el recipiente

78. El tercer componente del aire.

Indique el tercer componente constante del aire atmosférico, según el porcentaje.

Muchos lectores continúan considerando «por inercia» que el tercer componente constante del aire es el bióxido carbónico que, cuantitativamente, ocupa el tercer lugar después del nitrógeno y el oxígeno. No obstante, hace mucho tiempo que se ha descubierto otro componente del aire, cuyo contenido es 30 veces mayor que el del bióxido carbónico. Éste es el argón, uno de los

llamados gases nobles. Su contenido en el aire es del 1 % (más exactamente, del 0,94 %), mientras que el del bióxido carbónico es del 0,03 %.

79. El gas más pesado.

Entre los elementos gaseosos, ¿cuál es el más pesado?

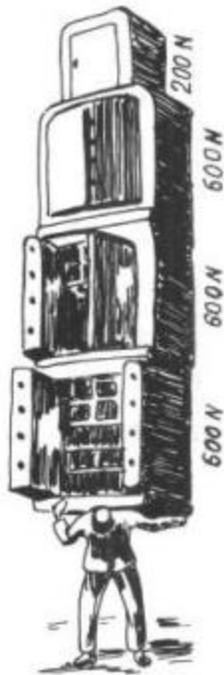
Sería erróneo creer que el elemento gaseoso más pesado es el cloro cuyo peso es 2,5 veces mayor que el del aire. Existen otros mucho más pesados. Si hacemos caso omiso del radón, o la emanación del radio, muy efímero, que pesa ocho veces más que el aire, tendremos que colocar en el primer lugar el gas xenón que es 4,5 veces más pesado que el aire. El aire atmosférico contiene una cantidad ínfima de xenón, a saber, cada 150 m de aire contienen 1 cm de este elemento.

Si hubiera que indicar un compuesto gaseoso en vez de un elemento gaseoso, entre los gases más pesados tendríamos que citar el tetracloruro de silicio (SiCl_4) que pesa 5,5 veces más que el aire, y el carbonilo de níquel cuyo peso supera seis veces el del aire.

Los vapores de diversos gases suelen pesar más que el aire: los de bromo pesan 5,5 veces más que este último; los de mercurio, 7 veces más. (Por supuesto, el lector recuerda el rasgo más importante que sirve para distinguir entre vapor y gas: este último tiene una temperatura superior a la crítica, mientras que el primero la tiene menor que la crítica.)

80. ¿Resistimos un peso de 20 t?

Consta que la superficie del cuerpo humano mide 2 m; ¿podemos considerar que el peso total que la atmósfera ejerce sobre el hombre es de 20 t (200.000 N)?



«Resistimos un peso de 20.000 kg ejercida por la columna de aire de 300 km de altura. No la sentimos porque no solo nos oprime por arriba, sino que también nos presiona desde abajo e incluso desde dentro, equilibrándose de esa manera». Esta figura y el pie de ella fueron tomados de un libro de divulgación científica.

Carece de todo sentido la afirmación tradicional de que el cuerpo humano soporta una fuerza de 200 kN por parte de la atmósfera. Vamos a ver, de dónde aparecen los 200 kN.

Se suele hacer el cálculo de la manera siguiente: cada centímetro cuadrado de la superficie del cuerpo está expuesto a la presión de 10 N; toda la superficie del cuerpo humano mide 20.000 cm, « por consiguiente, la fuerza total vale 200.000 N = 200 kN ».

En este caso se prescinde del hecho de que las fuerzas aplicadas a diferentes puntos del cuerpo tienen sentidos diferentes; sería ilógico sumar las fuerzas «aritméticas» dirigidas bajo cierto ángulo unas respecto a otras. Por supuesto, es posible sumarlas, pero siempre ateniéndose a la regla de adición vectorial y obteniendo un dato muy distinto del anunciado al plantear el problema. Se obtendría una resultante equivalente al peso del aire comprendido en el volumen del cuerpo. Si quisiéramos determinar la magnitud de la presión ejercida sobre la superficie del cuerpo humano en vez de la referida resultante, sólo podríamos afirmar que éste está expuesto a una presión de 10 N/cm. Hasta aquí lo que se podría decir acerca de la presión ejercida sobre nuestro cuerpo por la atmósfera terrestre.

Resistimos fácilmente esta presión porque la equilibra una presión equivalente dirigida desde dentro del cuerpo; su valor absoluto no es muy elevado, de 0,1 N/mm. Esta magnitud relativamente

pequeña de la presión explica el hecho de por qué las paredes de las células de los tejidos del organismo no se destruyen por la presión bilateral.

Obtendríamos valores impresionantes de la presión formulando esta pregunta de un modo distinto, por ejemplo:

- 1) ¿Con qué fuerza la atmósfera terrestre oprime la parte superior de nuestro cuerpo contra la inferior?
- 2) ¿Con qué fuerza la atmósfera aprieta la parte izquierda y la derecha de nuestro cuerpo entre sí?

Para responder a la primera pregunta habría que calcular la fuerza de presión correspondiente al área de la sección transversal de nuestro cuerpo, o a la de su proyección horizontal (de unos 1000 cm²); se obtendría una fuerza de 10 kN.

En el segundo caso tendríamos que determinar la presión ejercida sobre la proyección vertical del cuerpo (de cerca de 5000 cm²); el resultado sería 5 kN.

Mas, estos datos espectaculares nos dicen lo mismo que sabíamos al empezar el cálculo, es decir, que a cada centímetro cuadrado de nuestro cuerpo corresponde una fuerza de 10 N. Éstas no son sino dos formas de expresar una misma idea.

81. La fuerza del aliento.

¿Cuál es la fuerza del aliento de la persona? ¿Es menor o mayor que 1 atmósfera la presión del aire despedido con violencia por la boca?

El aire que expiramos tranquilamente tiene un exceso de presión de cerca de 0,001 at con respecto al ambiente.

Al despedirlo con fuerza, lo comprimimos mucho más, elevando el exceso de presión hasta 0,1 at respecto al ambiente. Esta magnitud corresponde a 76 mm de mercurio. Dicha fuerza se

manifiesta evidentemente cuando una persona sopla aire en un extremo del tubo de manómetro de mercurio abierto, elevando el nivel de líquido en la otra rama: hay que hacer un esfuerzo considerable con los músculos pectorales para que la diferencia de niveles sea de 7 u 8 cm. (Los sopladores de vidrio experimentados son capaces de elevar el mercurio hasta 30 cm o más.)

82. La presión de los gases de la pólvora.

¿Qué presión tienen los gases de la pólvora que despiden el proyectil por la boca del cañón?

En las piezas de artillería modernas, los gases de la pólvora expulsan los proyectiles creando una presión de hasta 4000 at, lo cual corresponde a la presión de una columna de agua de 40 km.

83. Unidad de medida de la presión atmosférica.

¿Qué unidades sirven para medir la presión del aire?

Hoy en día se dan por anticuadas las unidades de medida de la presión atmosférica en milímetros de mercurio o en kg/cm. En la meteorología se suele emplear otra unidad, fuera del sistema de unidades, denominada «milibar».

El milibar, según indica su nombre (mili), es una milésima del bar. El bar es la unidad de la presión atmosférica equivalente a cien mil pascales. En el Sistema Internacional de unidades (SI), que se utiliza fundamentalmente hoy en día, por unidad de presión está adoptado el pascal (Pa), equivalente a la presión creada por una fuerza de 1 N distribuida uniformemente por una superficie de 1 m normal a ella. Para traducir el pascal a otras unidades se emplean las relaciones siguientes:

$$1 \text{ mm Hg} = 133 \text{ Pa}; 1 \text{ Kpounds/cm} = 1 \text{ at} = 9,81 \approx 10 \text{ Pa}; 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}.$$

84. El agua contenida en un vaso boca abajo.

Es harto conocido el experimento con una hoja de papel que no se separa de los bordes de un vaso con agua puesto boca abajo. Su descripción aparece en muchos libros de texto escolares y de divulgación científica. Por lo general, este fenómeno se explica de la siguiente manera: la hoja de papel experimenta una presión de una atmósfera por abajo, en tanto que desde arriba sólo la empuja el agua cuya fuerza es mucho menor (tantas veces menor como la columna de agua de 10 m de altura, correspondiente a la presión atmosférica, es mayor que el vaso); el exceso de presión aprieta el papel a los bordes del recipiente.



¿Por qué la hoja de papel no se desprende del vaso?

Si esta explicación es correcta, la hoja de papel estará apretada a los bordes de la vasija con una fuerza de casi una atmósfera (0,99 at). El diámetro de la boca del vaso es de 7 cm, por consiguiente, la hoja de papel estará sujeta a una fuerza de casi. No obstante, consta que para desprender la hoja de papel en este caso no se necesita tanta fuerza, sino que basta aplicar un esfuerzo insignificante. Una lámina metálica o de vidrio, que pese unas decenas de gramos, también aplicada a la boca de un vaso invertido, se desprende bajo la acción de la fuerza de la gravedad. Es evidente que esta explicación corriente del experimento no sirve. ¿Cómo explicaría usted este fenómeno?

Sería erróneo creer que el vaso sólo contiene agua y no contiene aire, pues la hoja de papel está muy pegada al líquido. Por supuesto, en este recipiente hay aire. Si entre dos superficies planas que están en contacto, no hubiera una capa de aire, sería imposible levantar ningún objeto colocado sobre la mesa, apoyado sobre ella con su base plana: habría que vencer la presión atmosférica. Al cubrir la superficie de agua con una hoja de papel, siempre dejamos una delgada capa de aire entre ellas.

Vamos a examinar lo que ocurre en el vaso al invertirlo. La hoja de papel se comba un poco bajo el peso del líquido, y si en vez de papel se utiliza una lámina, ésta se apartará un poco de los bordes de la pieza.

Sea lo que fuere, debajo del fondo del recipiente se desocupa un espacio para el aire que había entre el agua y el papel (o la lámina); este espacio es mayor que el inicial, por lo cual el aire se rarifica y su presión disminuye.

Ahora la hoja de papel sufre la acción de toda la presión atmosférica (desde afuera) y parte de la presión atmosférica más el peso del agua (desde dentro). Ambas magnitudes, la interna y la externa, están equilibradas. Por tanto, basta aplicar un esfuerzo muy pequeño, superior a la fuerza de adhesión (o sea, a la tensión superficial de la película de líquido) para desprender el papel de los bordes del vaso.

La deformación de la hoja de papel bajo el peso del agua debe ser insignificante. Cuando el espacio de aire aumenta en 0,01 parte de su volumen, en la misma magnitud disminuirá la presión del gas dentro del vaso. La centésima parte de la presión atmosférica que falta, se compensa con el peso de los 10 cm de la columna de agua. Si inicialmente el espacio de aire entre el agua y la

hoja de papel era de 0,1 mm, basta que su espesor aumente en 0,01 X 0,1, es decir, en 0,001 mm (en 1 micra) para explicar por qué la hoja de papel queda adherida a la boca del vaso invertido. Por eso no vale la pena tratar de advertir a simple vista el pandeo de la hoja.

En los libros, donde se describe este experimento, se exige a veces que el vaso esté lleno hasta los bordes, pues de otra manera será imposible obtener el efecto deseado, ya que habrá aire a ambos lados de la hoja, por lo cual la presión interna y externa del aire se equilibrará y la hoja se desprenderá bajo la acción del peso del agua. Después de realizar este experimento nos damos cuenta de que ésta es una advertencia gratuita: la hoja sigue adherida como si el vaso estuviera completamente lleno. Al apartarla un poco veremos burbujas que entran por la abertura. Este hecho comprueba que el aire contenido en el recipiente está enrarecido (en otro caso el aire ambiente no penetraría a través del agua).

Evidentemente, cuando el vaso se invierte, la capa de agua que se desplaza hacia abajo, desaloja parte del aire, en tanto que el gas que se queda, se rarifica ocupando un volumen mayor. El enrarecimiento del aire es más notable que en el caso del vaso completamente lleno: lo comprueban fehacientemente las burbujas de aire que se cuelan en el vaso si la hoja se aparta un poco. Cuanto mayor es el enrarecimiento, tanto más estará adherida la hoja al cristal.

Para terminar de describir este experimento, que no es tan sencillo como parecía a primera vista, advertimos que la hoja de papel podrá seguir pegada al vaso a pesar de que encima de ella no haya líquido: para ello hace falta que el cristal esté mojado y la hoja no pese demasiado. En semejante caso seguirá adherida debido a la fuerza de tensión superficial de la fina película de agua. Si la circunferencia del borde del vaso mide 25 cm de longitud, la película de agua tendrá una fuerza de tensión superficial (el coeficiente de tensión superficial del agua es de $74 \cdot 10^{-5}$ N/cm) igual a

$$74 \cdot 10^{-5} \cdot 25 \cdot 2 = 3700 \cdot 10^{-5} \text{ N.}$$

Esta fuerza puede sostener un peso de unos 4 g.

Por consiguiente, si la masa de la hoja de papel no supera los 4 g, ésta seguirá adherida a los bordes mojados del vaso

85. El huracán y el vapor.

Compare la presión de un huracán y la presión de trabajo que se genera en el cilindro de una máquina de vapor. ¿Cuántas veces, aproximadamente, la primera supera la segunda?

El huracán más devastador que desprende de la tierra robles seculares y destruye muros de fábrica, ejerce una presión mucho menor que la generada dentro del cilindro de una máquina de vapor. Su presión es de unos 3000 N/m, lo cual constituye cerca de 0,03 de la presión atmosférica normal. Este dato es muy modesto: la presión del vapor en el cilindro de la máquina asciende a decenas de atmósferas aun cuando no sea una máquina con presión de trabajo muy alta. Por consiguiente, podemos afirmar que el huracán más fuerte tiene una presión cientos de veces menor que el vapor que realiza trabajo en el cilindro de una máquina de vapor.

86. La fuerza de tiro de una chimenea.

Compare el empuje del aire que una persona despide con fuerza por la boca y la intensidad de tiro de una chimenea de 40 m de alto. Si expresamos estas dos magnitudes en milímetros de mercurio, ¿cuál será la razón?



Al contemplar la chimenea de una fábrica, surge la idea de que su fuerza de tiro es enorme. Pero en realidad la fuerza de tiro de semejantes obras es muy pequeña: cuando una persona despidió aire por la boca, la presión es mucho más alta.

Es muy fácil cerciorarse de esto haciendo un cálculo sencillo. La fuerza de tiro equivale a la diferencia del peso de dos columnas de aire, del exterior y del interior contenido en la chimenea (siendo iguales sus alturas y áreas de las bases). El aire interior se calienta hasta una temperatura no mayor de 300 °C, por lo cual se puede considerar que en este caso su peso se reduce aproximadamente a la mitad; luego el peso de un metro cúbico de aire interior será dos veces menor que el del mismo volumen de aire exterior. Como la chimenea mide 40 m de altura, la diferencia de peso de las dos columnas de aire, caliente y frío, equivale al peso de una columna de aire exterior de 20 m de altura. Consta que el aire atmosférico es 10.000 veces más ligero que el mercurio, por ello, la columna de aire de 20 m de altura pesará lo mismo que una de mercurio de

$$20.000 : 10.000 = 2 \text{ mm.}$$

Así pues, acabamos de determinar que la fuerza de tiro de la chimenea sólo es de 2 mm de mercurio. La fuerza que empuja el aire por tal conducto es inferior a 30 N/cm. El exceso de presión que una persona crea al despedir violentamente aire por la boca, equivale a unos 70 mm de mercurio, o sea, es 35 veces mayor que dicha fuerza. Al soplar el aire, le imprimimos una velocidad mayor que la del movimiento de gases por la chimenea más alta.

Estos resultados algo inesperados pueden dar lugar a dudas. ¿Cómo es posible que una fuerza insignificante pueda provocar una afluencia tan enérgica de aire al hogar? Pero no olvidemos que en este caso la fuerza, no muy elevada, pone en movimiento una masa bastante pequeña (un litro de aire caliente que fluye por el conducto tiene una masa de 0,65 g); por ello, la aceleración es considerable.

Por otro lado, se podría hacer la siguiente pregunta: ¿por qué hace falta levantar obras tan altas, como la chimenea de una fábrica, para crear un tiro de 2 mm de mercurio? ya que un ventilador ordinario crea un tiro mucho más eficiente. Este razonamiento viene muy al caso. Pero si no hubiera chimeneas tan altas, ¿adónde irían los gases de combustión, tan perjudiciales para la persona, los animales y las plantas? Éstos deben ser disipados en la atmósfera, lo más alto que se pueda.

87. Dónde hay más oxígeno?

¿Qué aire contiene más oxígeno, el que respiramos nosotros o el que respiran los peces?

El aire respirable contiene el 21% de oxígeno. Se sabe que en un litro de agua se disuelve dos veces más oxígeno que nitrógeno. A esto se debe el elevado contenido de oxígeno -el 34 %- en el aire disuelto en el agua. (A su vez, el aire atmosférico contiene el 0,04 % de bióxido carbónico, mientras que el agua, el 2 %.)

88. Las burbujas.

En un vaso lleno de agua de grifo, que se encuentra en un ambiente cálido, aparecen burbujas. Trate de explicar este fenómeno.

Las burbujas que se forman en el agua fría al empezar a calentarla, son de aire: de esa manera se desprende parte del aire disuelto en ella. A diferencia de la solubilidad de los sólidos, la de los gases disminuye al elevar su temperatura. Por ello, durante el calentamiento el agua ya no puede contener disuelta la misma cantidad de aire que antes, y el exceso de gas se desprende en forma de burbujas.

He aquí algunos datos numéricos. Un litro de agua contiene 19 cm de aire a 10 °C (agua del grifo) y 17 cm de aire a 20 °C (temperatura ambiente).

De cada litro de líquido se desprenden 2 cm de aire. Como un vaso contiene un cuarto de litro de agua, en las condiciones indicadas del vaso lleno hasta los bordes se desprenden 500 mm de aire. Dado que el diámetro medio de una burbuja es de 1 mm, de esta cantidad de gas se formarán mil burbujas.

89. Las nubes.

¿Por qué las nubes no se precipitan hacia la tierra?

A esta pregunta se suele responder frecuentemente de la siguiente manera: «Porque el vapor de agua es más ligero que el aire». Por cierto, no hay quien dude de este hecho; sin embargo, las nubes no constan únicamente de vapor de agua. Éste es invisible; si las nubes sólo consistieran en él, serían perfectamente transparentes. Las nubes y la niebla (son lo mismo) constan de agua en estado líquido y no gaseoso. En este caso el asunto queda mucho más embrollado: ¿por qué, pues, las nubes flotan en el aire en vez de precipitarse a la tierra?

En cierta época predominó el criterio de que las nubes se componen de diminutas ampollas de película de agua llenas de vapor de agua. Hoy en día todo el mundo sabe que tanto las nubes como la niebla no son ampollas de agua, sino gotitas de agua de 0,01 a 0,02 mm de diámetro, e incluso de 0,001 mm. Desde luego, tales corpúsculos pesan 800 veces más que el aire seco. No obstante, a pesar de que tienen una superficie considerable en comparación con su masa, descienden con gran lentitud, puesto que el aire les opone una resistencia considerable durante la caída. Por ejemplo, las gotitas de líquido de 0,01 mm de radio caen uniformemente con una velocidad de 1 cm/s. Quiere decir que las nubes no flotan en el aire, sino que están cayendo muy lentamente; basta un flujo de aire ascendente para que una nube deje de caer y ascienda.

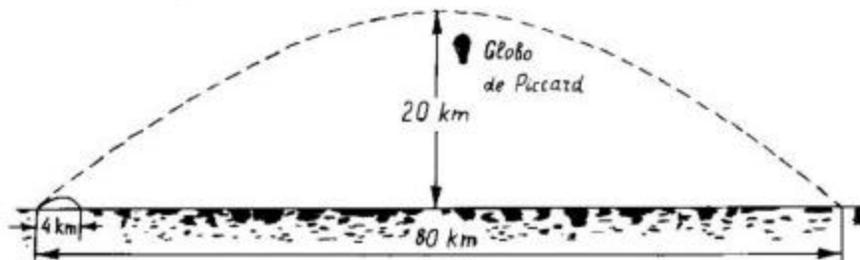
Conque, de hecho las nubes tienden a descender, pero su descenso es tan lento que no se advierte a simple vista o bien es contrarrestado por flujos de aire ascendentes.

Por esta misma razón están flotando en el aire las partículas de polvo, aunque la masa de muchas de ellas (por ejemplo, de las de diversos metales) supera miles de veces la del aire.

90. La bala y el balón

¿A qué objeto el aire opone mayor resistencia, a una bala o a un balón?

Sería ingenuo creer que un medio tan poco consistente como el aire no oponga resistencia más o menos notable a una bala disparada. Al contrario, precisamente la gran velocidad de movimiento de ese proyectil condiciona una considerable resistencia por parte del aire. Se sabe que una escopeta tiene un alcance de 4 km. ¿Cuál sería éste si el aire no opusiera resistencia a la bala? Pues, ¡sería 20 veces más largo! Este hecho parece increíble; para cerciorarnos de ello, hagamos el cálculo siguiente.



Como resultado de la resistencia del aire el alcance de la bala es de 4 km en vez de 80 km

La bala sale por la boca del cañón de la escopeta con una velocidad de unos 900 m/s. Según la mecánica, en el vacío un proyectil tiene la velocidad máxima si se arroja con un ángulo de 45° respecto al horizonte; en este caso el alcance se determina haciendo uso de la fórmula siguiente:

$$L = \frac{v^2}{g}$$

donde v es la velocidad inicial y g , la aceleración de la fuerza de la gravedad. En el caso que estamos analizando, $v = 900$ m/s y $g \sim 10$ m/s. Al sustituir v y g en la fórmula por sus valores correspondientes obtenemos el dato siguiente:

$$L = 900^2 / 10 = 81.000 \text{ m} = 81 \text{ km.}$$

Esta influencia tan notable del aire en el movimiento de la bala se debe a que la magnitud de la resistencia del medio crece en razón directamente proporcional a la velocidad elevada a la segunda (y algo más que a la segunda) potencia, y no a la primera potencia. Por esta razón, el aire opone una resistencia tan insignificante a una pelota arrojada con una velocidad de sólo 20 m/s, que prácticamente podemos despreciarla, aplicando al movimiento de este proyectil las fórmulas de mecánica sin restricción alguna. Una pelota lanzada en el vacío bajo un ángulo de 45° al horizonte y con una velocidad inicial de 20 m/s tendría un alcance de 40 m ($20^2 : 10$); en condiciones reales su alcance es casi el mismo.



Debido a la resistencia del aire la pelota sigue una curva balística señalada con línea continua en vez de describir la parábola representada por la línea de trazos

Los profesores de mecánica harían muy bien si en sus ejercicios de cálculo analizaran el movimiento de una pelota en vez del desplazamiento de balas y obuses: los resultados estarían más de acuerdo con la realidad que aquellos números fantásticos que se obtienen cuando se menosprecia la resistencia que el aire ofrece a estos últimos.

91. Por qué es posible pesar un gas?

La física afirma que las moléculas de los gases están en constante movimiento. ¿De qué manera las moléculas que se mueven a gran velocidad en el vacío ejercen presión sobre el fondo del recipiente?

¿Por qué solemos considerar que el peso de un gas equivale a la suma de los pesos de las moléculas que lo componen?

Los libros de texto y los cursos de física no prestan atención a este problema tan sencillo que puede surgir en la mente de cualquier alumno y puede dejarlo perplejo. No obstante, este problema es muy fácil de resolver.

Independientemente de la dirección que sigue una molécula -hacia abajo, hacia arriba, hacia un lado o bajo un ángulo-, su movimiento «térmico» se suma a la caída a plomo provocada por la fuerza de la gravedad. Sólo estas componentes estrictamente verticales influyen en el peso de un gas; las demás velocidades puramente «térmicas» condicionan una presión igual de las moléculas de gas sobre las paredes del recipiente y no les comunican movimiento progresivo. Como dichas velocidades en modo alguno influyen en el peso del gas, para resolver este problema, con toda razón podemos abstraernos de ellas y darlas por inexistentes.

¿Qué fenómenos y magnitudes tendremos que analizar? Tendremos una lluvia de moléculas que caen a plomo rebotando del fondo e intercambiando sus velocidades durante las colisiones¹. El intercambio de velocidades equivale al hecho de que una molécula atraviese a otra al chocar con ella. Por ello, podemos considerar que todas las moléculas alcanzan el fondo del recipiente sin encontrar resistencia alguna. Este cuadro simplificado facilita mucho el análisis.

Así pues, observemos cómo se comporta una molécula. Al chocar contra el fondo, rebota con la misma velocidad y asciende a la altura desde la cual había caído. Desde esta misma altura la

¹ Con arreglo a las leyes del choque de cuerpos completamente elásticos de masas iguales

molécula cae por segunda vez, por tercera, etc. Si el tiempo de caída es t , durante un segundo la molécula chocará con el fondo

$$n = 1/2t \text{ veces}$$

($2t$ porque entre dos choques seguidos la molécula debe recorrer un trecho dos veces, una vez hacia abajo y otra hacia arriba, invirtiendo el mismo tiempo en ambos casos). El valor de t se determina utilizando la fórmula siguiente:

$$h = \frac{gt^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}}, n = \frac{1}{2t} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{2h}}$$

donde h es la altura de caída. La velocidad que la molécula tiene al chocar con el fondo, es igual a

$$v = \sqrt{2gh}$$

El impulso p de cada choque equivale a la diferencia de cantidades de movimiento antes y después del choque:

$$p = m * v - m * (-v) = 2 * m * v$$

mientras que el impulso total P de los n choques vale

$$P = np = 2m * n * v = 2m * \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{2h}} * \sqrt{2gh} = mg$$

Así pues, cada segundo una molécula comunica al fondo un impulso igual a mg . Además,

$$P = F * t_o = F * l = F.$$

Por consiguiente, $F = mg$, o sea, la fuerza de choque es igual al peso de la molécula.

Queda claro que si la fuerza de choque de una molécula es igual a su peso, y todas las moléculas contenidas en el recipiente alcanzan el fondo, este último recibirá un impulso equivalente al peso total de las moléculas de gas.

Recordemos que hemos sustituido el recipiente con moléculas en movimiento caótico por otro, en el cual las moléculas siguen la línea de plomada. Como dichos recipientes son iguales en lo que se refiere al peso de las moléculas, la conclusión sacada para uno de ellos también será válida para el otro.

Tal vez, el lector desee saber, de qué modo las moléculas transfieren su peso al fondo del recipiente. Las que siguen la línea de plomada, le comunican su fuerza de choque directamente o mediante otras moléculas chocando e intercambiando velocidades con ellas (recordemos que sólo se trata de la transferencia de la componente generada por la fuerza de la gravedad). Las moléculas que chocan oblicuamente con las paredes laterales rebotando hacia abajo, transmiten su fuerza de choque a través de ellas. A su vez, las que dan con la tapa o con las paredes laterales

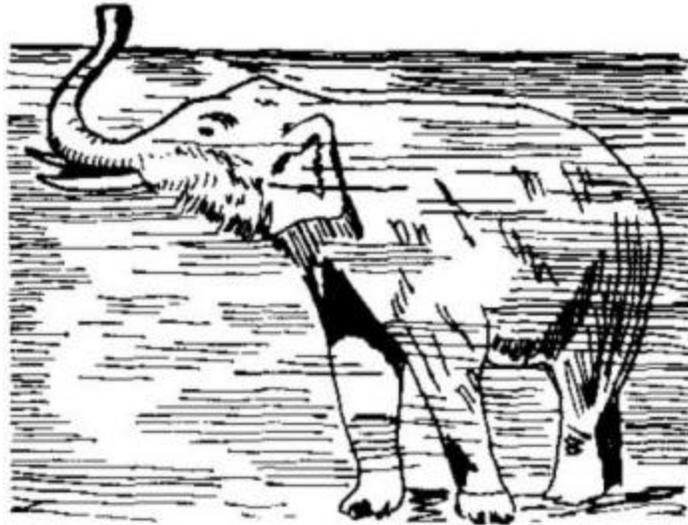
bajo un ángulo rebotando hacia arriba, le comunican un impulso menor, puesto que su velocidad disminuye a consecuencia de la acción de la fuerza de la gravedad; además, la atenuación del golpe dado hacia arriba aumenta el impulso que las moléculas comunican al fondo.

Nos queda examinar el caso de las moléculas que chocan con las paredes del recipiente bajo ángulo recto. Una molécula sujeta a la fuerza de la gravedad choca a escuadra con la pared del recipiente, mientras que si no lo estuviera, lo haría rebotando hacia arriba disminuyendo de esa manera la presión sobre el plato de la balanza que sostiene el recipiente. La gravedad anula esta disminución de presión, es decir, aumenta el peso del recipiente.

Hemos planteado el problema de la transmisión del peso refiriéndonos a los gases. Mas, de hecho, también podríamos examinar el caso de los líquidos y los sólidos, puesto que todos los cuerpos constan de moléculas que se mueven caóticamente (menos los cristales que se componen de átomos) sin asociarse unas con otras. Según vemos, en principio, las condiciones son las mismas que en el caso de los gases. Las moléculas que componen diversos cuerpos, siempre transmiten su peso al soporte mediante numerosos golpes aislados; al cambiar el estado del cuerpo, sólo se modifica el mecanismo de transmisión.

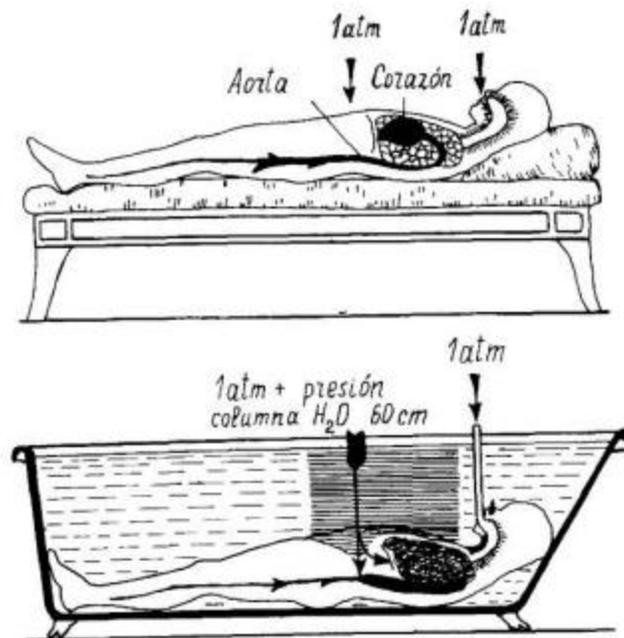
92. El ejemplo de los elefantes.

Los elefantes pueden permanecer bajo agua respirando mediante la trompa asomada a la superficie. Cuando las personas trataban de seguir este ejemplo valiéndose de un tubo, padecían de hemorragia por la boca, la nariz y los oídos; semejante práctica causaba graves enfermedades y aun la muerte de los buzos. ¿Por qué?



¿Por qué el hombre no puede seguir el ejemplo del elefante?

La causa de las alteraciones que se observan cuando una persona permanece bajo agua respirando mediante un tubo, reside en la diferencia de presión fuera y dentro del cuerpo humano.



El efecto que la presión atmosférica produce en el organismo humano rodeado de aire (arriba) y sumergido en agua (abajo). La figura explica por qué el hombre es incapaz de respirar bajo agua como el elefante de la figura anterior

Desde dentro del tórax, por parte de los pulmones, el aire «normal» presiona con la fuerza de 1 at, mientras que la presión ejercida desde afuera es de 1 at + la columna de agua de altura equivalente a la profundidad de inmersión. Si se sumerge a una profundidad de 50 cm, el tórax sufre una presión excesiva desde afuera, equivalente a 50 cm de agua, o a 50 pnds/cm (5 kponds/dm). Esta circunstancia no puede menos que dificultar notablemente la respiración: se tiene que respirar soportando un peso de 15 a 20 kg aplicado al pecho. Sin embargo, el problema no sólo consiste en esto; además se altera gravemente la circulación sanguínea. La sangre se desplaza de aquellas partes del cuerpo donde la presión es más alta (las piernas y el abdomen) a las zonas de presión menor, o sea, al tórax y a la cabeza. Como los vasos de estas zonas están repletos de sangre, se dificulta la circulación de la sangre procedente del corazón y la aorta, por lo cual estos últimos se dilatan desmedidamente, a consecuencia de lo cual la persona puede morir o enfermar gravemente.

El médico austríaco R. Stiegler comprobó este efecto en una serie de experimentos y los describió en uno de sus libros. Los realizó consigo mismo, sumergiéndose enteramente en el agua y respirando mediante un tubo. R. Stiegler se dio cuenta de que cuando su pecho se encontraba a la profundidad de un metro, era imposible respirar. Sumergido a la profundidad de 60 cm, podía permanecer bajo agua durante 3,75 min, a la profundidad de 90 cm, 1 min, y a la de 1,5 m, no más de 6 s. Pero cuando se arriesgó a zambullirse a 2 m, al cabo de unos segundos su corazón se dilató tanto que el experimentador tuvo que guardar cama durante tres meses para normalizar su circulación sanguínea.

Posiblemente, el lector pregunte, ¿por qué nos zambullimos a gran profundidad y permanecemos allí durante cierto tiempo sin que nos pase algo grave? Es que durante la zambullida las condiciones son muy distintas. Antes de lanzarse al agua, la persona llena de aire el pulmón; a medida que se sumerge en el agua, este aire se comprime cada vez más por la presión del líquido,

ejerciendo en cada instante una presión equivalente a la de este último. Por eso, el corazón no se rellena de sangre. En la misma situación se encuentra el buzo que lleva puesta una escafandra (la presión del aire suministrado al casco es igual a la del agua), así como los operarios que se sumergen en cajones neumáticos.

Nos queda por contestar la pregunta siguiente: ¿por qué el elefante no muere cuando se sumerge en el agua asomando su trompa a la superficie? No muere porque es elefante: si nuestro organismo fuera tan resistente como el de este animal, y tuviéramos músculos tan fuertes, también podríamos sumergirnos a gran profundidad sin consecuencia alguna.

93. La presión creada en la barquilla del globo estratosférico.

El Prof. Piccard realizaba sus ascensiones a la estratosfera en una cápsula esférica de aluminio de 2,1 m de diámetro y de 3,5 mm de grosor de las paredes. En el interior de esta cápsula absolutamente hermética se mantenía la presión atmosférica normal, mientras que a la altura a que ascendía el globo la presión exterior era de 0,1 at aproximadamente.

Cada centímetro cuadrado de superficie de aquella cabina esférica experimentaba un exceso de presión de 0,9 kg (9 N/cm) desde dentro de ésta. Es fácil calcular que sus hemisferios sufrían la acción de una fuerza de 35 t (350.000 N) que tendía a separarlos. ¿Por qué, pues, la cabina resistió aquella presión tan fuerte y no se destruyó?

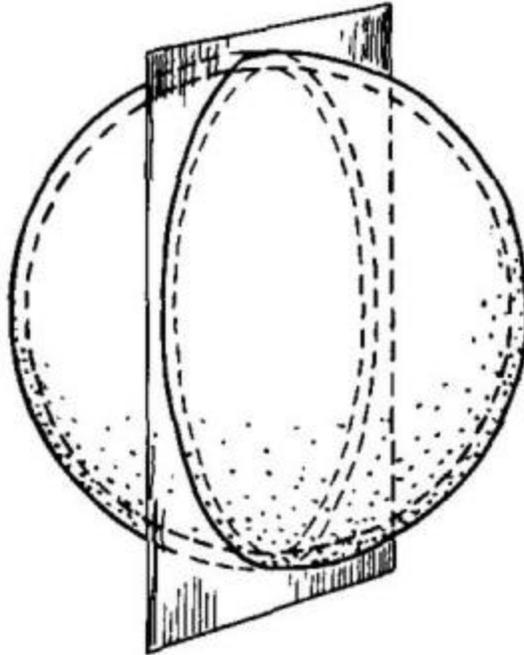


El profesor Piccard y su compañero de viaje, junto a la cápsula de aluminio

Es cierto que la fuerza que tiende a destruir la cápsula de Piccard es muy grande, pero esto no quiere decir que el artefacto debe reventar. Calculemos el esfuerzo de desgarre que corresponde a cada centímetro cuadrado de la sección de la envoltura. La fuerza que tiende a desgarrar la cápsula en dos hemisferios es igual a

$$0.9 * 10^5 * \frac{P}{4} * 2 * 1^2 = 350.000 N$$

(no hay que partir de la superficie del hemisferio, sino de su proyección sobre el plano, es decir, del área del círculo máximo).



. Sección de la cápsula esférica de Piccard según el círculo máximo

Dicha fuerza está aplicada al área acotada por la línea de empalme de los dos hemisferios. La pared de la cápsula esférica mide 3,5 mm = 0,35 cm de espesor, por lo cual la referida área es de unos

$$\pi * 210 * 0.35 = 230 \text{ cm}^2$$

A cada centímetro cuadrado le corresponde una presión de

$$350.000 : 230 = 1500 \text{ N/cm}^2$$

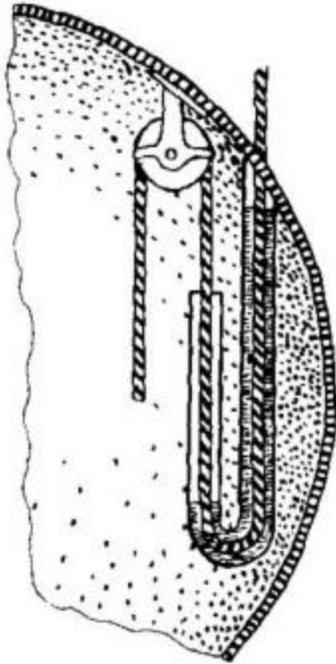
El aluminio se destruye bajo la carga de 10.000 N/cm² si es fundido, y de 25.000 N/cm² si es laminado. De modo que queda claro que el margen de seguridad del artefacto superaba de ocho a veinte veces la mencionada carga límite.

94. La cuerda de la válvula.

Un extremo de la cuerda que permitía manipular la válvula del globo de Piccard debía entrar en la barquilla. ¿Cómo había que asegurar el orificio por el que entraba la cuerda para que el aire no saliera de la cabina al medio ambiente enrarecido?

Para introducir una cuerda que permitiera manejar la válvula desde la barquilla hermética del globo estratostático, el Prof. Piccard inventó un dispositivo muy sencillo que posteriormente fue utilizado en semejantes globos construidos en Rusia.

En el interior de la barquilla colocó un tubo de sifón cuya rama larga se comunicaba con el espacio exterior. El tubo contenía mercurio.

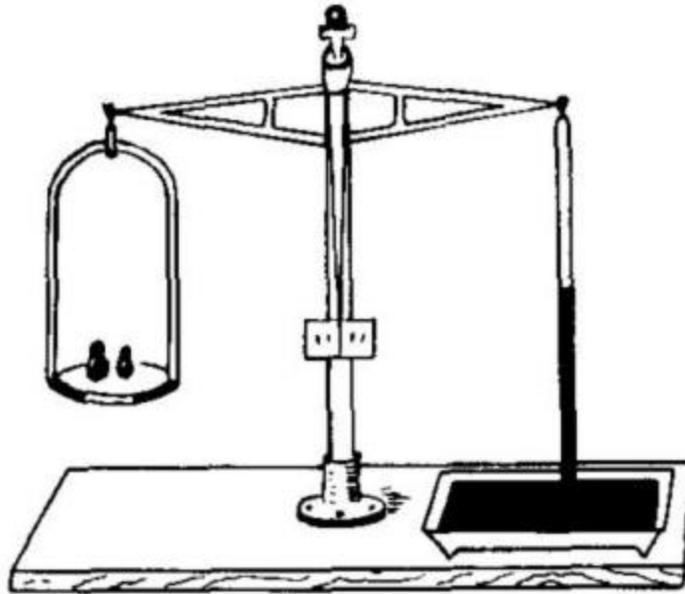


La solución de Piccard al problema de la cuerda para manejar la válvula

La presión interna de la cápsula no debía superar la externa más que en 1 at, por lo cual el nivel de mercurio de la rama larga del tubo no superaba el de la parte corta más que en 76 cm. Por el interior del tubo pasaba la cuerda de la válvula, cuyo desplazamiento no alteraba la diferencia de niveles de líquido. Se podía tirar de la cuerda sin temer que escapase aire de la barquilla, puesto que el mercurio cerraba el conducto por el cual se desplazaba la cuerda.

95. Un barómetro suspendido de una balanza.

El extremo superior del tubo de un barómetro de cubeta está sujeto a un plato de la balanza, mientras que el otro plato sostiene unas pesas que la equilibran . ¿Se alterará el equilibrio si varía la presión barométrica?



¿Oscilará la balanza si varía la presión atmosférica?

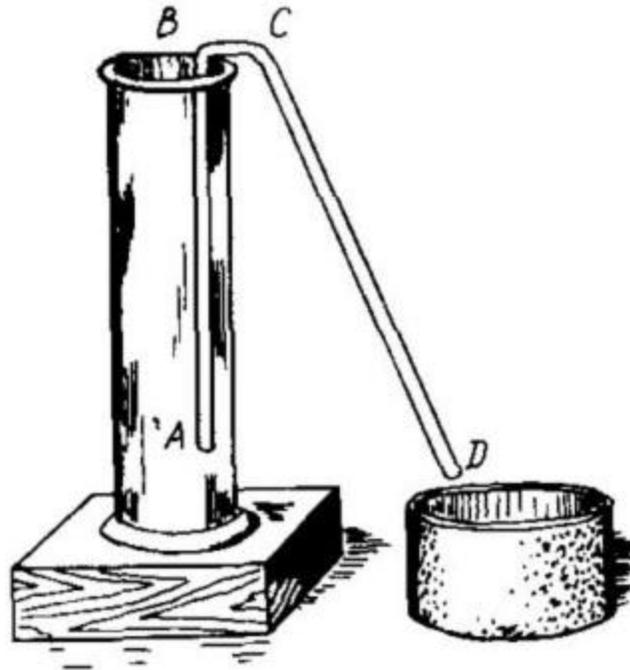
Al contemplar el tubo barométrico suspendido de la balanza, se diría que la variación del nivel de mercurio que éste contiene no debería afectar el equilibrio de los platos, puesto que la columna de líquido está apoyada sobre el mercurio contenido en la cubeta y no influye de manera alguna en el punto de suspensión. Esto es cierto; no obstante, toda variación de la presión barométrica afectará el equilibrio del artefacto.

Vamos a explicar, por qué. La atmósfera presiona sobre el tubo por arriba, sin que este último le oponga resistencia alguna, ya que encima del mercurio hay un vacío. Por consiguiente, las pesas colocadas en el otro plato equilibran el tubo de cristal del barómetro y la presión que la atmósfera ejerce sobre él; como la presión atmosférica sobre la sección del tubo es exactamente igual al peso de la columna de mercurio que éste contiene, resulta que las pesas equilibran todo el barómetro de mercurio. Por ello, al variar la presión barométrica (es decir, al fluctuar el nivel del mercurio que hay en el tubo) se verá afectado el equilibrio de los platos.

Sobre este principio están basados los llamados barómetros de balanza, a los cuales se acopla fácilmente un mecanismo para registrar sus indicaciones (por ejemplo, un barógrafo).

96. El sifón en el aire.

¿Cómo hay que poner a funcionar el sifón sin inclinar el recipiente y sin emplear ningún procedimiento tradicional (succionando líquido o sumergiendo el sifón en un líquido)? El recipiente está lleno casi hasta los bordes.



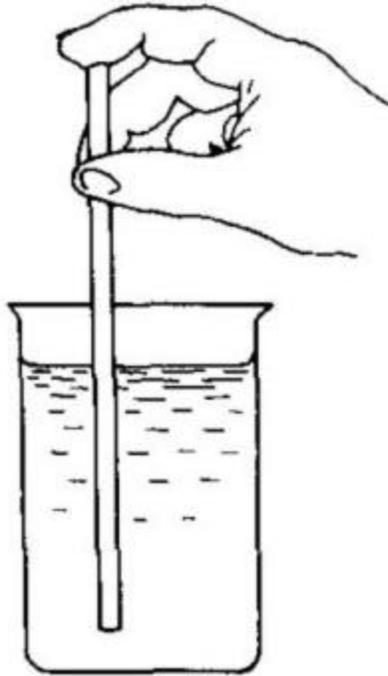
¿Existe algún procedimiento fácil para poner a funcionar este sifón?

El problema consiste en obligar al líquido a elevarse por el tubo de sifón por encima de su nivel en el recipiente y alcanzar el codo del dispositivo. Cuando el líquido pase el codo, el sifón empezará a funcionar. Esto no costará trabajo si se aprovecha la siguiente propiedad de los líquidos, muy poco conocida, de la cual vamos a hablar.

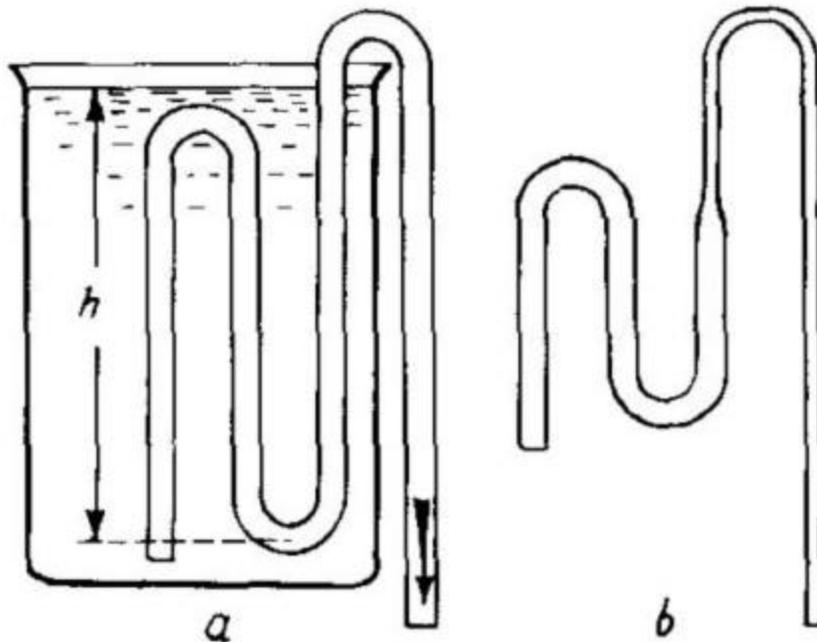
Tomemos un tubo de vidrio de un diámetro tal que se pueda tapar muy bien con un dedo.

Tapándolo de esa manera vamos a sumergir su extremo abierto en el agua. Por supuesto, el agua no podrá entrar en el tubo, mas, si se aparta el dedo, entrará de inmediato, y nos daremos cuenta de que en un primer instante su nivel estará por encima del nivel del líquido del recipiente; acto seguido los niveles de líquido se igualarán.

Vamos a explicar, por qué en un primer instante el nivel de líquido en el tubo supera el del recipiente. Cuando se aparta el dedo, la velocidad del líquido en el punto inferior del tubo es $v = \sqrt{2gH}$ (con arreglo a la fórmula de Torricelli), donde g es la aceleración de la gravedad y H , la profundidad a que está sumergido el extremo del tubo respecto al nivel de líquido del recipiente.



Mientras el líquido está subiendo por el tubo, su velocidad no disminuye por efecto de la fuerza de la gravedad, puesto que la porción que se desplaza, siempre sigue apoyada sobre sus capas inferiores en el tubo. En semejante caso no se observa lo que tiene lugar cuando arrojamos un balón hacia arriba. El balón lanzado hacia arriba participa en dos movimientos, uno ascendente, con velocidad (inicial) constante, y otro descendente, uniformemente acelerado (provocado por la fuerza de la gravedad). En nuestro tubo no tiene lugar ese segundo movimiento, ya que el agua que se eleva sigue siendo empujada por otras porciones de líquido que están subiendo.



No se necesita succionar estos sifones para ponerlos a funcionar

En suma, el agua que entra en el tubo, alcanza el nivel de líquido del recipiente con una velocidad inicial $v = \sqrt{2gH}$. Es fácil comprender que, teóricamente, debería elevarse rápidamente a otro tanto de altura H . El rozamiento disminuye notablemente su altura de elevación. Por otro lado, también se puede aumentarla reduciendo el diámetro de la parte superior del tubo.

Por cierto, a la vista está cómo podemos aprovechar el fenómeno descrito para poner a funcionar el sifón. Tapando muy bien un extremo del sifón, el otro se sumerge en el líquido a la profundidad máxima posible (para aumentar la velocidad inicial, pues cuanto mayor es H , tanto mayor será $v = \sqrt{2gH}$). Acto seguido hay que retirar rápidamente el dedo del tubo: el agua subirá por éste superando el nivel de líquido de fuera, pasará por el punto más alto del codo y empezará a descender por otra rama; de esa manera el sifón empezará a funcionar.

En la práctica es muy cómodo aplicar el procedimiento descrito si el sifón tiene forma adecuada. En la figura, a se aprecia un sifón de este tipo que funciona por sí mismo. Las explicaciones que acabamos de exponer permiten comprender cómo funciona. Para elevar el segundo codo, la parte correspondiente del tubo debe tener un diámetro algo menor, por lo cual el líquido que pasa del tubo ancho al estrecho, subirá a una altura mayor.

97. El sifón en el vacío.

¿Funcionaría el sifón en el vacío?

A la pregunta de «¿Es posible el trasiego de líquido en el vacío mediante un sifón?» se suele responder terminantemente: « ¡No, es imposible! ».

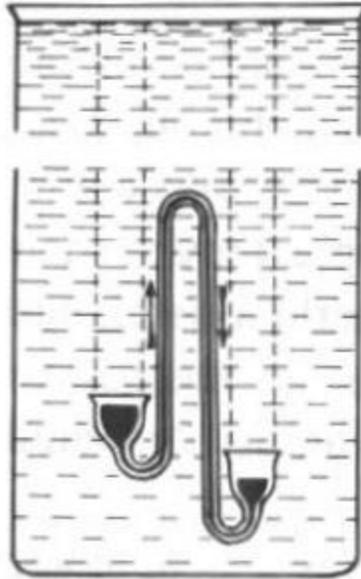
Por regla general, la circulación del líquido en el sifón se atribuye únicamente a la presión del aire. Pero esta suposición es un prejuicio «físico». «En un sifón rodeado de vacío el líquido fluye libremente. En principio, el sifón con líquido funciona perfectamente aunque no exista presión del aire» -dice el Prof. R.V. Pol en su libro *Introducción a la mecánica y la acústica*.

¿Cómo se explicaría, pues, el funcionamiento del sifón sin atribuirlo a la acción de la atmósfera? Para explicarlo, ofrecemos el siguiente razonamiento: la parte derecha del «hilo» de líquido contenido en el sifón es más larga y, por ende, es más pesada, por lo cual arrastra el resto de líquido hacia el extremo largo; una cuerda sostenida mediante una polea ilustra muy bien este hecho.



Explicación evidente de cómo funciona el sifón.

Ahora vamos a examinar el papel que la presión del aire desempeña en el fenómeno descrito. Ésta sólo asegura que el «hilo» de líquido sea continuo y no salga del sifón. Pero en determinadas condiciones dicho «hilo» puede mantenerse continuo únicamente merced a la adhesión entre sus moléculas, sin que intervengan fuerzas externas.



Trasiego del mercurio mediante un sifón sumergido en aceite. La continuidad del “hilo” de mercurio en el tubo se asegura con la presión del aceite; esta última hace las veces de la presión atmosférica e impide la formación de burbujas de aire en el agua

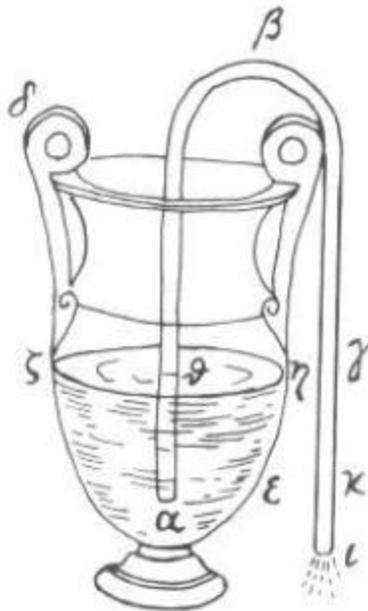
«Por lo general, el sifón deja de funcionar en el vacío, sobre todo cuando en su punto más alto hay burbujas de aire. Pero si en las paredes del tubo no hay restos de aire, al igual que en el agua contenida en el recipiente, y se maneja con cuidado el artefacto, es posible ponerlo a funcionar en el vacío. En este caso la adhesión entre las moléculas de agua garantiza la continuidad de la columna de líquido» (E. Grimsel, Curso de física).

El Prof. R. Pol en su libro, citado más arriba, le apoya de una manera muy categórica diciendo lo siguiente: «Durante la enseñanza de la física elemental se suele muy a menudo atribuir el funcionamiento del sifón a la presión del aire. No obstante, esta afirmación sólo es válida con muchas restricciones. De hecho, el principio de funcionamiento del sifón no tiene nada que ver con la presión del aire.» A continuación, este autor pone el ejemplo de una cuerda sostenida mediante una polea, mencionado más arriba, y prosigue: «Lo mismo también es válido para los líquidos, que se resisten a la «rotura», igual que los sólidos². Por ello, el fluido no debe contener burbujas» ... A continuación este autor describe una experiencia consistente en el trasiego de líquidos mediante un sifón, además, el papel de presión atmosférica lo desempeñan dos émbolos con carga, o la presión de otro líquido de densidad más baja: ésta no deja que el «hilo» de líquido se rompa aunque contenga glóbulos de aire³

² 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.

³ 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

Es cierto que no hay nada nuevo debajo de la luna. Es que la explicación correcta del funcionamiento del sifón, que se ajusta muy bien a lo que acabamos de exponer, data de hace más de dos milenios y se remonta a Herón, mecánico y matemático de Alejandría, siglo I a.C. Este sabio ni siquiera sospechaba que el aire tiene peso, por lo cual no incurrió -a diferencia de los físicos de nuestra época- en el error que acabamos de analizar.



Representación del sifón tomada del tratado de Herón de Alejandría

He aquí lo que dice: «Si el orificio libre del sifón se encuentra a la misma altura que el nivel de líquido del recipiente, no saldrá agua del sifón, aunque esté repleto... En este caso el agua estará en equilibrio. Pero si el orificio libre se encuentra por debajo del nivel de líquido, éste saldrá del sifón, puesto que la cantidad de agua del tramo kB pesa más que la del tramo B,9 y la arrastra hacia abajo.»

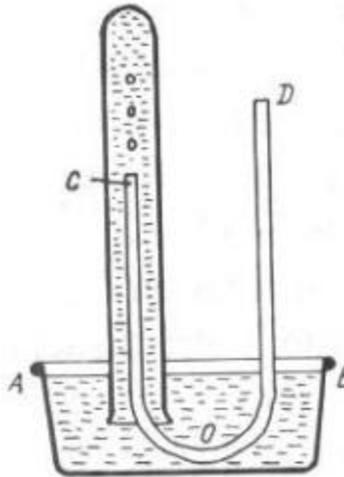
98. El sifón para los gases.

¿Sería posible trasvasar gases utilizando un sifón?

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.)

Es posible trasegar gases mediante un sifón. Para ello es necesario que intervenga la presión atmosférica, puesto que las moléculas de los fluidos no están adheridas unas a otras. Los gases más pesados que el aire, por ejemplo, el gas carbónico, se trasvasan mediante el sifón de la misma manera que los líquidos si el recipiente del que sale gas está colocado por encima del otro. Además, también es posible trasegar aire mediante el sifón siempre que se aseguren las condiciones siguientes.



El brazo corto del sifón se introduce en una probeta ancha, llena de agua, e invertida sobre un recipiente con agua, de modo que su boca se encuentra por debajo del nivel del líquido de este último. El otro extremo D del sifón se tapa muy bien con un dedo para que en el tubo no entre agua al introducirlo en la probeta. Cuando se destapa el orificio D, a través del sifón empiezan a entrar glóbulos de aire en la probeta, lo cual significa que este aparato comienza a funcionar. Para explicar, por qué el sifón introduce aire exterior en la probeta, fijémonos en que a nivel del punto C el líquido experimenta la presión de 1 at, dirigida desde abajo, mientras que desde arriba presiona una atmósfera menos el peso de la columna de agua comprendida entre los niveles C y AB. Precisamente este exceso de presión empuja el aire exterior hacia dentro de la probeta.

99. Elevación del agua mediante una bomba.

¿A qué altura eleva agua una bomba de aspiración ordinaria?



¿A qué altura elevará el agua, semejante bomba?

La mayoría de los libros de texto afirman que es posible elevar agua mediante una bomba de aspiración a una altura no mayor de 10,3 m sobre su nivel fuera de la bomba. Mas, muy raras veces se añade que la altura de 10,3 m es una magnitud puramente teórica y es imposible de alcanzar en la práctica, ya que durante el funcionamiento de la bomba entre su émbolo y las paredes de la tubería inevitablemente se cuela aire. Además, hay que tener en cuenta que en condiciones normales el agua contiene aire disuelto (un 2 % de su volumen; véase la respuesta a la pregunta 88). Este aire se desprende al espacio vacío que se forma debajo del émbolo mientras la bomba funciona, creando cierta presión e impidiendo de esa manera que el agua suba a la altura teórica de 10,3 m. Por lo general, dicha magnitud suele ser 3 m menor, por lo que semejantes bombas de pozo nunca elevan agua a una altura mayor de 7 m.

En la práctica, el sifón tiene casi la misma altura límite cuando se emplea para transportar agua por encima de presas o colinas.

100. La salida del gas.

Bajo la campana de una bomba de aire se encuentra una botella cerrada con gas a presión normal. Si se abre la válvula de la botella, el gas saldrá al vacío con una velocidad de 400 m/s. ¿Con qué velocidad saldría el gas si su presión inicial en la botella fuera de 4 at?

Parecería que un gas comprimido con una fuerza cuatro veces mayor debería salir con mayor velocidad. No obstante, cuando el gas sale al vacío, su velocidad de salida casi no depende de su presión. Un gas muy comprimido sale con la misma velocidad que otro, que lo esté menos. Esta paradoja física se explica por el hecho de que el gas comprimido se encuentra bajo presión alta; a su vez, la densidad del fluido que se pone en movimiento por efecto de dicha presión, también aumenta en la misma proporción (ley de Mariotte). En otras palabras, al elevar la presión, aumenta la masa del gas que se impele, además, tantas veces como crece la fuerza impulsora.

Se sabe que la aceleración de un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza aplicada e inversamente proporcional a la masa de dicho cuerpo. Por esta razón, la aceleración de salida del gas (y la velocidad que ella condiciona) no debe depender de su presión.

101. Un proyecto de motor que no consume energía.

La bomba de aspiración eleva agua porque debajo de su émbolo se crea vacío. Con el vacío máximo que se realiza en la práctica, el agua sube a 7 m. Pero si durante este proceso sólo se crea vacío, para elevar agua a 1 m y a 7 m se necesitarán iguales cantidades de energía. ¿Sería posible aprovechar esta propiedad de la bomba de agua para crear un motor que no consumirá energía? ¿De qué manera?

El supuesto de que el trabajo invertido en elevar agua mediante una bomba de aspiración no depende de su altura de elevación, es erróneo. De hecho, en este caso sólo se invierte trabajo en practicar vacío debajo del émbolo; pero para ello se requieren diferentes cantidades de energía, según la altura de la columna de agua elevada por la bomba.

Vamos a comparar el trabajo que el émbolo realiza en una carrera para elevar agua a 7 m y a 1 m. En el primer caso el émbolo sufre la presión de 1 at dirigida desde arriba, o sea, soporta el peso de una columna de agua de 10 m de altura (vamos a utilizar números enteros). Por abajo lo empuja la presión atmosférica (de 10 m H₂O), disminuida en el peso de la columna de agua de 7 m de altura y la elasticidad del aire desprendido del líquido y acumulado debajo de dicho elemento; por lo visto, la elasticidad del gas equivale a 3 m de la columna de agua, puesto que la altura de 7 m es límite. Luego para elevar agua se necesita vencer la presión de una columna de agua de

$$10 - (10 - 7 - 3) = 10 \text{ m}$$

de altura, es decir, la presión atmosférica normal.

En el segundo caso, cuando se eleva agua a 1 m, por arriba el émbolo también sufre la presión de 1 at, mientras que la presión ejercida desde abajo es de

$$10 - 1 - 3 = 6 \text{ m.}$$

De modo que se necesita superar la presión de una columna de agua de $10 - 6 = 4$ m. Como en ambos casos la carrera del émbolo es la misma, el trabajo invertido en elevar agua a 7 m de altura es

$$10 : 4 = 2,5 \text{ veces}$$

mayor que el requerido para elevarla a 1 m.

Así pues, se disipan las esperanzas de obtener un motor que no consume energía.

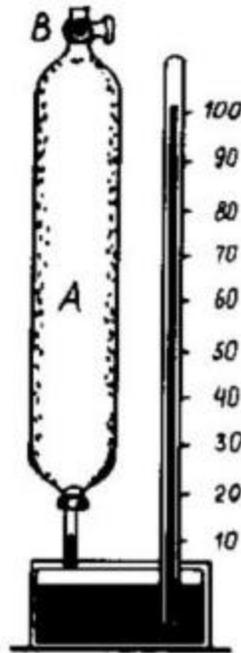
102. Sofocar incendios con agua hirviendo.

El agua hirviendo sofoca un incendio más rápido que el agua fría, pues absorbe el calor de vaporización de las llamas y las envuelve en vapor, impidiendo de esa manera el acceso de aire. ¿Sería mejor que los bomberos siempre tengan preparadas cisternas de agua hirviendo para sofocar incendios?

La bomba de incendios no podrá aspirar agua hirviendo, ya que debajo de su émbolo habrá vapor de 1 at de tensión en vez de aire enrarecido.

103. Un gas contenido en un recipiente.

El recipiente A contiene aire comprimido a una presión superior a 1 at a temperatura ambiente. La columna de mercurio del manómetro indica la presión del gas comprimido. Al abrir la válvula B, ha salido cierta cantidad de gas, y la columna de mercurio del tubo manométrico ha bajado hasta la altura correspondiente a la presión normal. Cierta tiempo después se advirtió que a pesar de que la llave permaneció cerrada, el mercurio volvió a subir. ¿Por qué?



Por supuesto, la elevación de la columna de mercurio en el manómetro comprueba que ha aumentado la presión del gas contenido en el recipiente. Es fácil comprender por qué ha crecido: al abrir la llave, el aire del recipiente se ha enfriado a consecuencia del enrarecimiento rápido, y su temperatura ha descendido por debajo de la del ambiente. Poco rato después, cuando la temperatura del gas ha vuelto a aumentar, también ha crecido su presión (con arreglo a la ley de Gay-Lussac).

104. Una burbuja en el fondo de un océano.

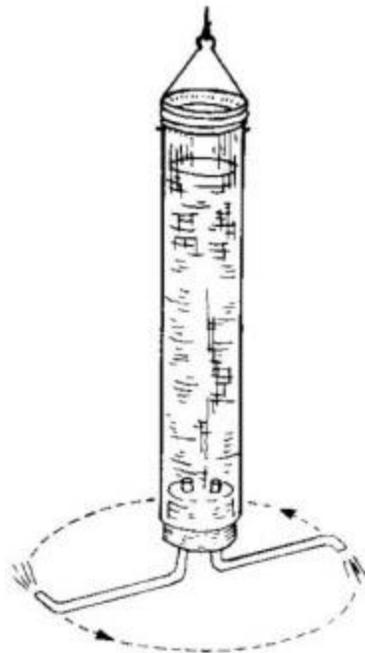
Si cerca del fondo de un océano, a una profundidad de 8 km, se formara una burbuja, ¿subiría ésta a la superficie?

Una burbuja situada a la profundidad de 8000 m debe de sufrir una presión de unas 800 at, pues cada 10 m de la columna de agua equivalen aproximadamente (según el peso) a una atmósfera. La ley de Mariotte afirma que la densidad del gas es inversamente proporcional a la presión. Aplicando esta ley al caso que estamos analizando, podemos concluir que la densidad del aire a la presión de 800 at será 800 veces mayor que a presión normal. El aire que nos rodea es 770 veces menos denso que el agua. Por esta razón, el aire de la burbuja que se encuentra en el fondo de un océano debe ser más denso que el agua, por consiguiente, no podrá emerger.

No obstante, esta conclusión deriva del supuesto equivocado de que la ley de Mariotte sigue siendo válida a la presión de 800 at. Ya a la presión de 200 at el aire se comprime 190 veces en vez de 200; a la presión de 400 at, 315 veces. Cuanto mayor es la presión, tanto más notable es la diferencia respecto de la magnitud establecida por la ley de Mariotte. A la presión de 600 at el aire se comprime 387 veces. Si ésta sube hasta 1500 at, este gas se comprime 510 veces, y si la presión sigue aumentando, se comprimirá muy poco, como si fuera un líquido. Por ejemplo, a la presión de 2000 at la densidad del aire sólo aumenta 584 veces en comparación con la normal, o sea, alcanza $\frac{3}{4}$ de la densidad del agua⁴.

105. La rueda de Segner en el vacío.

¿Giraría la rueda de Segner en el vacío?



¿Giraría la rueda de Segner en el vacío?

Los que consideran que la rueda de Segner gira a consecuencia de que el chorro de agua empuja al aire, estarán seguros de que en el vacío no girará. No obstante, dicho artefacto gira por otra causa. Su movimiento es provocado por una fuerza interna, a saber, por la diferencia de la presión que el agua ejerce sobre el extremo abierto y cerrado del tubo. Este exceso de presión no depende en absoluto del medio, dentro del cual se encuentra el dispositivo, bien sea el vacío o el aire. Por ello, en el vacío la rueda de Segner girará mejor que en el aire, pues el medio ambiente no le opondrá ninguna resistencia.

El físico norteamericano H. Goddard realizó con éxito un experimento similar, en el cual la fuerza de retroceso de una pistola que dispara bajo la campana de una bomba de vacío pone a funcionar un diminuto tiiovivo.

⁴ La densidad del aire sería mayor que la del agua sólo a la presión de 5000 at, o sea, ¡a la profundidad de 50 km!

Los cohetes vuelan en el espacio cósmico empujados por la misma fuerza de retroceso que se crea durante la salida de los gases.

106. El peso del aire seco y húmedo.

¿Qué pesa más, un kilómetro cúbico de aire seco u otro de aire húmedo si las temperatura y presión son las mismas?

Es sabido que un metro cúbico de aire húmedo es una mezcla de un metro cúbico de aire seco con otro de vapor de agua. Por ello, a primera vista parece que un metro cúbico de aire húmedo pesa más que otro de aire seco y que la diferencia es igual al peso del vapor contenido en el primero. Sin embargo, esta conclusión es errónea: el aire húmedo es más ligero que el seco.

La causa consiste en que la presión de cada uno de los componentes es menor que la de toda la mezcla (el aire seco y húmedo tienen presión igual); al disminuir la presión, también se reduce el peso de cada unidad de volumen del gas.

Expliquémoslo con más detalle. Designemos con f a la presión del vapor contenido en el aire húmedo ($f < 1$). En este caso la presión del aire seco en un metro cúbico de mezcla será de $1 - f$. Si designamos con r el peso de un metro cúbico de vapor a cierta temperatura y presión atmosférica, y con q el de un metro cúbico de aire seco, entonces, a la presión de f atmósferas

1 m³ de vapor pesará fr y

1 m³ de aire, $(1 - f)q$.

El peso total de un metro cúbico de mezcla será igual a

$fr + (1 - f)q$.

Es obvio que si $r < q$ (de hecho lo es, puesto que el vapor de agua es más ligero que el aire), entonces

$fr + (1 - f)q < q$,

es decir, un metro cúbico de mezcla de aire y vapor será más ligero que otro de aire seco. En efecto, como $r < q$, serán válidas las desigualdades siguientes:

$$\begin{aligned} fr < fq, & \Rightarrow fr + q < fq + q, \\ fr + q - fq < q, & \Rightarrow fr + (1 - f)q < q. \end{aligned}$$

Conque, a una misma temperatura y presión un metro cúbico de aire húmedo tiene un peso menor que otro de aire seco.

107. El vacío máximo.

¿Hasta qué grado rarifican el aire las bombas modernas más eficientes?

Las bombas de vacío modernas permiten practicar un vacío de 10^{-10} at, lo cual equivale a una cienmilmillonésima de atmósfera.

En las bombillas eléctricas de vacío que funcionan largo tiempo, el grado de rarefacción del aire es similar a éste; cuanto más funcionan, tanto más se rarifica el gas que contienen: al cabo de 250 horas de estar encendidas, el aire se enrarece unas 1000 veces (debido al hecho de que las paredes y demás elementos de la ampolla atraen los iones que se forman mientras la bombilla está encendida).

108. ¿Qué es lo que se entiende por «vacío»?

¿Cuántas moléculas, aproximadamente, se quedarán en un recipiente de 1 litro de capacidad, del cual ha sido evacuado el aire mediante la bomba moderna más eficiente?

Los lectores que nunca han tratado de calcular cuántas moléculas de aire se quedan en un recipiente de 1 cm de capacidad al disminuir 100.000.000.000 de veces la presión del aire que éste contiene, a duras penas podrán responder de alguna manera a esta pregunta. Vamos a hacer el cálculo.

A la presión de 1 at un centímetro cúbico de aire contiene

$$27.000.000.000.000.000.000 = 27 * 10^{18} \text{ moléculas}$$

(éste es el número de Loschmidt). Un decímetro cúbico tiene 1000 veces más: $27*10^{21}$. Al disminuir la presión 100.000.000.000 (10^{11}) veces más, deberán quedar

$$27*10^{21} / 10^{11} = 27*10^{10} = 270.000.000.000$$

moléculas. He aquí su composición química:

200.000.000.000 moléculas de nitrógeno
 65.000.000.000 moléculas de oxígeno
 3.000.000.000 moléculas de argón
 450.000.000 moléculas de gas carbónico
 3.000.000 moléculas de neón
 20.000 moléculas de criptón
 3.000 moléculas de xenón.

109. ¿Por qué existe la atmósfera?

¿A qué se debe la existencia de la atmósfera?

Las moléculas de aire están o no están sujetas a la fuerza gravitatoria. Si no lo están, ¿por qué no se dispersan en el espacio vacío que rodea la Tierra? Si lo están, ¿por qué, lejos de precipitarse a la superficie terrestre, se mantienen encima de ella?

Por cierto, las moléculas de aire están sujetas a la fuerza de la gravedad a pesar de que se mueven constantemente y con gran rapidez (con la velocidad de la bala disparada). La atracción terrestre disminuye la componente de su velocidad dirigida desde la superficie terrestre, impidiendo de esa manera que las moléculas que integran la atmósfera escapen del planeta.

A la pregunta de ¿por qué las moléculas que componen la atmósfera no se precipitan a la tierra? hay que contestar del modo siguiente: es que no dejan de precipitarse hacia la superficie terrestre,

pero, al ser absolutamente elásticas, rebotan de sus «congéneres» que les vienen al encuentro, y de la tierra, manteniéndose siempre a cierta altura.

La altitud del límite superior de la atmósfera terrestre depende de la velocidad de las moléculas más rápidas. Si bien la velocidad media de las moléculas que forman la atmósfera es de unos 500 m/s, algunas de ellas pueden moverse con mucha mayor velocidad. Son muy pocas las moléculas que tienen una velocidad siete veces mayor (de 3500 m/s), la cual les permite subir hasta una altura de

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{3500^2}{2 \cdot 9.8} \approx 600 \text{ km}$$

Este hecho explica la presencia de «huellas» de atmósfera a la altura de 600 km de la superficie terrestre.

110. Un gas fue no llena todo el recipiente.

¿Llenarían siempre los gases todo el espacio en que se encuentran?

¿Sería posible que un gas ocupe parte del recipiente dejando desocupada la otra?

Estamos acostumbrados a considerar que el gas siempre ocupa todo el volumen del recipiente que lo contiene. Por eso cuesta trabajo suponer, en qué condiciones un gas puede ocupar parte del recipiente, dejando libre la otra parte. Sería, pues, una absurdidad «física».

Pero no cuesta ningún trabajo «crear» mentalmente tales condiciones para que tenga lugar este fenómeno paradójico. Supongamos que disponemos de un tubo de 1000 km de longitud colocado verticalmente respecto de la superficie terrestre, cuyo interior se comunica con el medio ambiente. La columna de aire dentro del tubo tendrá una altura de 500 a 700 km, mientras que el resto del mismo, a lo largo de cientos de kilómetros, no contendrá ningún gas, sin importar que el tubo esté abierto o cerrado. Por ello, el gas no siempre sale del recipiente abierto al espacio vacío que lo rodea. Se podría observar semejante fenómeno en un recipiente de altura mucho menor, por ejemplo, de unas cuantas decenas de metros, que contiene poco gas, en particular, pesado y a una temperatura bastante baja.