Y. PERELMAN

FISICA RECREATIVA

libro 2

EDITORIAL MIR MOSCU

EDITORIAL MIR

Я. ПЕРЕЛЬМАН • ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

КНИГА II

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» МОСКВА

YAKOV PERELMAN • FISICA RECREATIVA

LIBRO II

TRADUCIDO DEL RUSO POR EL INGENIERO ANTONIO MOLINA GARCIA

Tercera edición

EDITORIAL MIR • MOSCU

Impreso en la URSS. 1975

Traducción al español. Editorial Mir, 1975

На испанском языке

Indice

CAPITULO OCTAVO. MAGNETISMO. ELECTRICIDAD

CAPITULO NOVENO. REFLEXION Y REFRACCION DE LA LUZ. LA VISTA

CAPITULO DECIMO. SONIDO. MOVIMIENTO ONDULATORIO

Prólogo de la redacción

La presente versión española de la "Física Recreativa" de Y.I. Perelmán corresponde a la decimoséptima edición rusa.

El éxito obtenido por esta obra entre el público soviético es extraordinario y se debe al gran talento de su autor, que supo captar una serie de hechos y fenómenos de la vida ordinaria, que tienen un profundo sentido físico, y seleccionarlos acertadamente. La forma clara y el carácter ameno que da a la exposición han hecho que este libro sea muy popular.

El propósito del autor al concebir la obra fue claro y concreto: enseñar al lector a pensar con "espíritu científico". Por eso cuando expone conceptos o leyes conocidos parte de los fundamentos en que descansa la Física moderna.

Desde este punto de vista se comprende fácilmente por qué el autor no recoge en su libro los últimos adelantos de la radioelectrónica, de la Física atómica y otros problemas actuales.

Aunque este libro hace ya cerca de medio siglo que fue escrito, su autor se preocupó mucho de corregirlo y aumentarlo antes de cada una de sus muchas ediciones. Yakov Perelmán falleció en el ano 1942 durante el bloqueo de Leningrado por el ejército fascista alemán. Por eso las ediciones posteriores fueron preparadas sin el autor.

Al reeditar "Física Recreativa" no ha sido propósito de la redacción rehacer radicalmente un libro que goza de gran prestigio, sino limitarse o modificar en el texto original las cifras y tesis anticuadas, excluir algunos proyectos faltos de justificación, renovar y corregir parte de las figuras, completar ciertas partes del texto y hacer algunas observaciones.

Prólogo del autor a la décimotercera edición

Este libro no es continuación directa del primero de "Física Recreativa", sino una recopilación absolutamente independiente. El éxito alcanzado por el primer libro estimuló al autor a elaborar el material que tenía acumulado, con el cual compuso un nuevo libro que abarca las mismas partes de la Física que el primero.

En el presente libro, lo mismo que en el primero, el autor tiende más a remozar y dar vida a los conocimientos elementales de Física, que el lector ya posee, que a ofrecer otros nuevos. Porque el objeto de este libro es despertar la fantasía científica, enseñar a pensar con espíritu físico y acostumbrar al lector a aplicar sus conocimientos en todos los sentidos. He aquí por qué en la "Física Recreativa" se reserva a la descripción de experimentos espectaculares un lugar secundario, mientras que figuran en primer plano rompecabezas físicos, problemas interesantes, paradojas instructivas, preguntas difíciles de responder, comparaciones inesperadas en el campo de los fenómenos físicos, etc. El autor buscó este material entre los casos que ocurren en la vida ordinaria, en la técnica, en la naturaleza o en las páginas de las novelas de ciencia ficción.

En general, por el carácter del material recogido en él, este libro se destina a un lector algo más preparado que el del primer libro de "Física Recreativa", aunque la diferencia entre ambos es tan pequeña que pueden leerse en cualquier orden.

1936 *Y. Perelmán*

Capítulo 1

LEYES FUNDAMENTALES DE LA MECANICA

EL PROCEDIMIENTO MAS BARATO DE VIAJAR

El ingenioso escritor francés del siglo XVII Cyrano de Bergerac cuenta en su "Historia Cómica de los Estados e Imperios de la Luna" (1652), entre otras cosas, un caso sorprendente que, según dice, le ocurrió a él mismo. Un día, cuando estaba haciendo experimentos de Física, fue elevado por el aire de una forma incomprensible con sus frascos y todo. Cuando al cabo de varias horas consiguió volver a tierra quedó sorprendido al ver que no estaba ni en Francia, ni en Europa, sino en América del Norte, ¡en el Canadá! No obstante, el escritor francés consideró que este vuelo transatlántico era completamente natural. Para explicarlo dice que mientras el "viajero a la fuerza" estuvo separado de la superficie terrestre, nuestro planeta siguió girando, como siempre, hacia oriente, y que por eso al descender sentó sus pies no en Francia, sino en América.

¡Que medio de viajar más fácil y económico! No hay más que elevarse sobre la superficie de la Tierra y mantenerse en el aire unos cuantos minutos para que al descender nos encontremos en otro lugar, lejos hacia occidente. ¿Para qué emprender pesados viajes por tierra o por mar, cuando podemos esperar colgando en el aire hasta que la misma Tierra nos ponga debajo el sitio a donde queremos ir?

Desgraciadamente este magnífico procedimiento es pura fantasía. En primer lugar, porque al elevarnos en el aire seguimos sin separarnos de la esfera terrestre; continuamos ligados a su capa gaseosa, es decir, estaremos como colgados en la atmósfera, la cual también toma parte en el movimiento de rotación de la Tierra alrededor de su eje. El aire (o mejor dicho, su capa inferior y más densa) gira junto con la Tierra y arrastra consigo todo lo que en él se encuentra: las nubes, los aeroplanos, los pájaros en vuelo, los insectos, etc., etc. Si el aire no tomara parte en el movimiento de rotación de la Tierra sentiríamos siempre un viento tan fuerte, que los huracanes más terribles parecerían

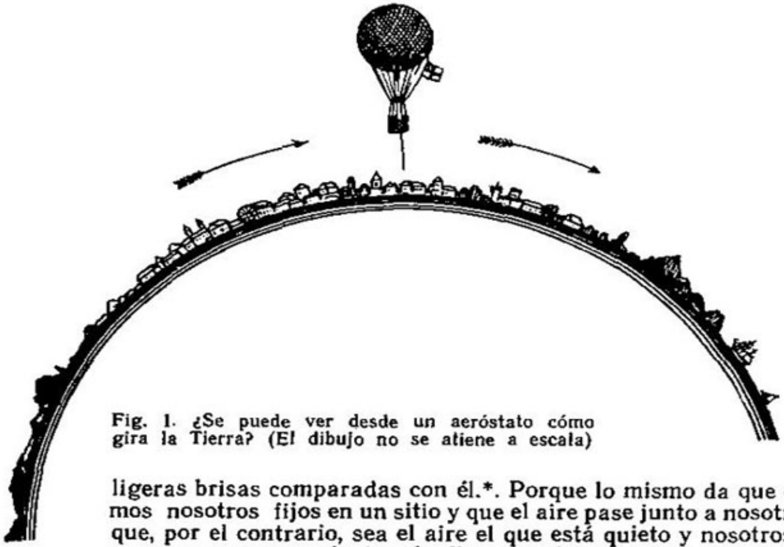


Fig. 1. ¿Se puede ver desde un aeróstato cómo gira la Tierra? (El dibujo no se atiene a escala)

ligeras brisas comparadas con él.*. Porque lo mismo da que estemos nosotros fijos en un sitio y que el aire pase junto a nosotros o que, por el contrario, sea el aire el que está quieto y nosotros los que nos movemos dentro de él; en ambos casos el viento sera igual de fuerte. Por ejemplo, un motociclista que avance a una velocidad de 100 km por hora sentirá un viento fuerte de frente aunque el aire esté en calma.

En segundo lugar, aunque pudiéramos remontarnos hasta las capas superiores de la atmósfera o la Tierra no estuviera rodeada de aire, el procedimiento de viajar económicamente ideado por el satírico francés sería también irrealizable. Efectivamente, al separarnos de la superficie de la Tierra en rotación *continuaríamos por inercia moviéndonos con la misma velocidad que antes,* es decir, con la misma velocidad a que se movería la Tierra debajo de nosotros. En estas condiciones, al volver a la Tierra nos encontraríamos en el mismo sitio de donde partimos, de igual manera que cuando damos saltos dentro de un vagón de ferrocarril en marcha caemos en el mismo sitio. Es verdad que por inercia nos moveremos en línea recta (tangencialmente a la

* La velocidad del huracán es de 40 m por segundo o 144 km por hora. Pero la Tierra, en una latitud como la de Leningrado, por ejemplo, nos arrastraría a través del aire con una velocidad de 240 m por segundo, es decir, de 828 km por hora, y en la región ecuatorial, por ejemplo, en Ecuador, esta velocidad sería de 465 m por segundo, o de 1 674 km por hora.

superficie terrestre), mientras que la Tierra seguiría un arco debajo de nosotros; pero tratándose de lapsos de tiempo pequeños esta diferencia no se nota.

"¡DETENTE, TIERRA!"

El popular escritor inglés Herbert Wells tiene un relato fantástico sobre cómo un oficinista hacía prodigios. Este era un joven de no mucha inteligencia, pero que por un capricho de la suerte tenía la virtud sorprendente de que en cuanto expresaba cualquier deseo, éste se cumplía en el acto. Sin embargo esta virtud, tan seductora al parecer, no le trajo a su poseedor ni a sus semejantes más que disgustos. Para nosotros es bastante instructivo el final de esta historia.

Después de una prolongada juerga, el oficinista de los prodigios, que temía llegar a su casa de madrugada, pensó aprovechar su poder para alargar la noche. Pero, ¿cómo hacerlo? Había que mandar a los astros que se parasen en el firmamento. El oficinista no se decidió a realizar esta hazaña de golpe. Entonces su amigo le aconsejó detener la Luna. El la miró atentamente, lo pensó y dijo:

— Me parece que está demasiado lejos para esto..., ¿qué piensa?

— Por probar nada se pierde — insistió Mading (que así se llamaba el amigo. *Y.P.*). — Si no se para, haga usted que deje de girar la Tierra. No creo que esto perjudique a nadie.

— Verdaderamente — dijo Fotheringay (el oficinista. *Y.P.*) —. Puedo probar.

Adoptó una postura imperativa, alzó los brazos sobre el mundo y dijo solemnemente:

— ¡Detente, Tierra! ¡Deja de girar!

No llegó a terminar la frase, cuando él y su amigo volaban ya en el espacio a una velocidad de varias docenas de millas por minuto.

Esto no le impedía seguir pensando. En menos de un segundo razonó y se dijo a sí mismo:

— Pase lo que pase, lo que hace falta es que yo salga vivo y sano.

Hay que reconocer que este deseo fue expresado a tiempo, porque unos segundos después cayó sobre tierra recién removida y junto a él, sin causarle daño, pasaban piedras, trozos de casas, objetos metálicos ...; pasó volando hasta una pobre vaca que se destrozó después al chocar contra la tierra. El viento soplaba con una fuerza terrible; él no podía ni levantar la cabeza para mirar a su alrededor.

— No comprendo — exclamó Fotheringay con voz entrecortada —, ¿qué habrá ocurrido? ¿Una tempestad? Por lo visto he debido hacer algo mal.

Después de mirar lo que el viento y los batientes faldones de su chaqueta le dejaron, continuó:

— En el cielo me parece que todo está en orden. Allí está la Luna. Lo demás también está. Pero, ¿dónde está la ciudad?; ¿dónde las calles y las casas?; ¿de dónde viene este viento? Yo no he mandado que haga viento.

Fotheringay intentó ponerse en pie, pero no pudo: por eso iba andando a gatas, sujetándose a las piedras y a los salientes del terreno. La verdad es que no había a dónde ir, puesto que todo lo que se podía ver por debajo de los faldones de la chaqueta, que el viento la había puesto por montera, era un cuadro de completa desolación.

"En el mundo algo se ha descompuesto, pensó, pero no sé ni lo que es".

Y efectivamente, algo se había descompuesto. No se veían casas, ni árboles, ni seres vivientes, no se veía nada. Sólo ruinas deformes y restos heterogéneos yacían por doquier y apenas se podían distinguir en medio del huracán de polvo.

El culpable de todo esto no podía comprender lo ocurrido, aunque todo tenía una explicación bien sencilla. Al parar la Tierra de improviso, Fotheringay no pensó en la inercia, que fue precisamente la que al cesar la rotación del planeta lanzó fuera de su superficie todo cuanto sobre ella había. Por eso las casas, la gente, los árboles, los animales y todo aquello que no estaba unido de forma inquebrantable con la masa fundamental de la esfera terrestre, salió volando tangencialmente a su superficie con la velocidad de un proyectil. Después todo volvió a caer sobre la Tierra haciéndose mil pedazos.

Fotheringay comprendió que el prodigio que acababa de hacer le había salido mal. Sintió una profunda repulsión por todo hecho semejante y se prometió a sí mismo no hacer más prodigios en su vida. Pero antes tenía que reparar el mal que había causado, y que no era pequeño. La tempestad seguía desencadenada, nubes de polvo eclipsaban la Luna y se oía ruido de agua que se acercaba. Brilló relámpago y a su luz pudo ver Fotheringay cómo un muro de agua avanzaba hacia él vertiginosamente.

Cobró valor, y dirigiéndose al agua gritó:

— ¡Alto! ¡Ni un paso más!

Después repitió órdenes semejantes a los truenos, a los relámpagos y al viento.

Fig. 2. ¿Qué ocurriría si la Tierra dejara de repente de girar alrededor de su eje?

Por fin se hizo la calma.

Fotheringay se puso en cuclillas y pensó: "Hay que obrar con cuidado, no vayamos a hacer otro desaguisado". Siguió meditando un poco y luego dijo: "Es mi deseo que, en cuanto se realice lo que ahora voy a ordenar, pierda yo el poder de hacer prodigios que hasta ahora he tenido y me convierta en un hombre como todos los demás. ¡Basta de prodigios! No quiero jugar más con cosas tan peligrosas. Ahora, mi última orden: que todo vuelva a ser como antes, que sean lo mismo las ciudades, las gentes, las casas, todo, y que yo también sea igual que antes".

UNA CARTA DESDE UN AVION

Figurémonos que vamos viajando en un avión que vuela rápido sobre la tierra. Abajo se ven lugares conocidos. Ahora vamos a pasar por encima de la casa de un amigo nuestro. "No estaría mal mandarle un saludo" — pensamos de repente. Escribimos apresuradamente unas cuantas palabras en una hoja de papel, la atamos a cualquier objeto pesado (que en adelante llamaremos "peso") y, en cuanto nos encontramos exactamente encima de la casa, lo dejamos caer.

¿Caerá la carta en casa de nuestro amigo? No, no caerá, aunque su huerto y su casa estaban exactamente debajo cuando soltamos el peso.

Si hubiéramos podido observar su caída desde el avión hubiésemos visto un fenómeno extraño: el peso cae, pero *sigue encontrándose durante todo el tiempo debajo del avión,* lo mismo que si fuera resbalando por un hilo invisible. Por eso, cuando el peso llega a tierra, el sitio donde cae está mucho más adelante que el que elegimos al soltarlo.

Aquí volvemos a encontrarnos con la ley de la inercia que nos impidió viajar por el método de Bergerac. Mientras el peso estaba en el avión se movía a la misma velocidad que él. Al soltarlo, comenzó a caer y a separarse del avión, pero como no perdió la velocidad que tenía, siguió avanzando en el aire en la misma dirección que antes. En estas condiciones el peso tenía dos movimientos, uno hacia abajo y otro horizontal hacia adelante. Estos dos movimientos se suman y, como resultado, el peso cae siguiendo una curva y permaneciendo siempre debajo del avión (si este último no cambia de dirección o de velocidad).

El peso se comporta en este caso lo mismo que cualquier objeto lanzado horizontalmente, por ejemplo, como una bala disparada con un fusil en posición horizontal: el objeto describe una trayectoria en forma de arco que acaba en la superficie de la tierra.

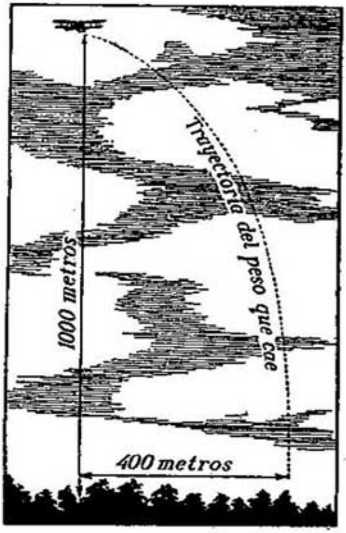


Fig. 3. Un peso dejado caer desde un avión en vuelo no cae verticalmente, sino siguiendo una curva.

Todo lo que acabamos de decir sería completamente justo si no existiera la resistencia del aire. Pero en realidad esta resistencia frena tanto el movimiento vertical del peso como el horizontal, por lo que en vez de encontrarse, durante todo el tiempo que dura la caída debajo del avión, se retrasa un poco con respecto a él.

La desviación de la vertical de lanzamiento puede ser muy considerable, sobre todo si el avión vuela alto y a gran velocidad. Si no hace viento, un peso soltado desde un avión que se halle a 1 000 m de altura y que vuele con una velocidad de 100 km por hora, caerá 400 metros más allá del sitio que se encontraba exactamente debajo del avión cuando se dejó caer (fig. 3).

Si se desprecia la resistencia de aire el cálculo no es difícil. Por la fórmula del camino recorrido con movimiento uniformemente acelerado $S=\frac{gt^2}{2}$ de donde tenemos que el tiempo que tarda en caer el peso $t=\sqrt{\frac{2S}{g}}$, siendo g la aceleración de la gravedad, igual a 9,8 m/seg². Por lo tanto, si el objeto cae desde 1 000 m de altura, tardará en llegar al suelo $\sqrt{\frac{2\times 1\,000}{9{,}8}}$, es decir, 14 seg.

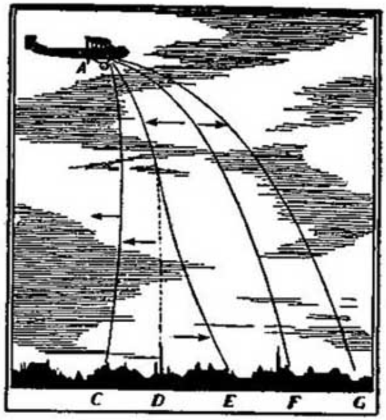
Durante este tiempo avanzará en dirección horizontal

$$\frac{100\,000}{3\,600}\times 14 = 390 \text{ m}.$$

LANZAMIENTO DE BOMBAS

Después de lo que acabamos de decir está claro que cuando un piloto ha de lanzar una bomba en un sitio determinado, tiene que resolver un problema difícil, puesto que ha de tener en

Fig. 4. Trayectorias que siguen las bombas lanzadas desde un avión: *AF*, cuando no hace viento; *AG*, con viento favorable (de cola); *AD*, *AC* con viento contrario (de proa); *EA*, con viento contrario arriba y favorable abajo.



cuenta la velocidad del avión, la resistencia del aire y la velocidad del viento.

En la fig. 4 se representan esquemáticamente las trayectorias que describe una bomba según las condiciones en que se realice el lanzamiento. Si no hace viento, la bomba seguirá la curva *AF*; en el ejemplo anterior dijimos ya por qué esta curva precisamente. Si hace viento favorable (de cola arrastrará la bomba hacia adelante y ésta describirá la curva *AG*. Si el viento es contrario (de proa) y de poca fuerza, la bomba caerá siguiendo la curva *AD* (si el viento sopla con la misma fuerza y en la misma dirección en las capas superiores y en las inferiores); si el viento, como suele ocurrir, tiene abajo una dirección y arriba otra (por ejemplo, arriba en contra y abajo a favor), la trayectoria de caída cambiará de forma y tomará el aspecto representado por la curva *AE*.

UN FERROCARRIL SIN PARADAS

Cuando estamos en el andén de una estación y junto a nosotros pasa un tren expreso, a nadie se le ocurre montarse en uno de sus vagones en marcha. Pero figurémonos que la plataforma del andén se mueve en el mismo sentido y con la misma velocidad que el tren, ¿sería difícil entrar en un vagón en marcha en estas condiciones?

En absoluto; entraríamos en él con la misma tranquilidad que si estuviera parado. Porque si el tren y nosotros nos movemos en el mismo sentido y con la misma velocidad resultará que *dicho tren se encontrará en reposo con respecto a nosotros*. Es verdad que sus ruedas continuarán girando, pero nos parecerá que lo hacen sin moverse del sitio. Hablando estrictamente, todos

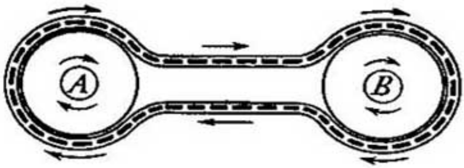


Fig. 5. Esquema de un ferrocarril sin paradas entre dos estaciones A y B. El esquema de las estaciones se muestra en la figura siguiente.

los objetos que generalmente consideramos inmóviles, por ejemplo, un tren parado en la estación, se mueven al mismo tiempo que nosotros alrededor del eje de la Tierra y en torno al Sol; pero podemos considerar que este movimiento no existe prácticamente, puesto que no nos molesta en absoluto.

Por consiguiente, es perfectamente realizable la idea de que los pasajeros tomen el tren y se apeen de él a toda marcha, sin necesidad de que se pare.

Dispositivos de este género se instalan frecuentemente en las exposiciones, para que el público pueda contemplar cómoda y rápidamente todas las curiosidades que se muestran en sus grandes territorios. Los puntos extremos del territorio de la exposición se unen entre sí por medio de un ferrocarril que tiene la forma de cinta sin fin; los pasajeros pueden entrar y salir de los vagones en cualquier otro sitio y en plena marcha.

Un ingenio de este tipo se muestra esquemáticamente en las figuras que insertamos. En la fig. 5 las estaciones finales se señalan con las letras A y B. En cada una de estas estaciones existe una *plataforma circular fija,* alrededor de la cual gira otra en forma de disco. Rodeando los discos giratorios de ambas estaciones pasa el cable a que se enganchen los vagones. Cuando los discos giran, los vagones se mueven en torno a ellos con

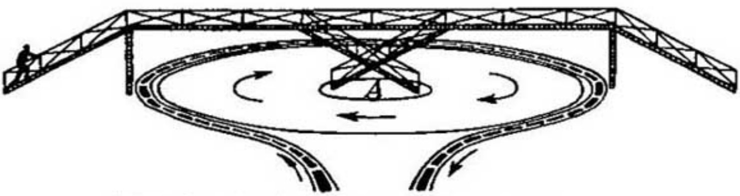


Fig. 6. Estación de un ferrocarril sin paradas.

una velocidad igual a la que tienen los bordes exteriores de las plataformas en rotación; por consiguiente, los pasajeros, sin el menor peligro, pueden pasar desde los discos a los vagones y viceversa. Al bajarse del vagón el pasajero se dirige al centro de la plataforma giratoria. Cuando llega a la plataforma fija que hay en dicho centro, pasa a ella desde el borde interior de la giratoria sin la menor dificultad, puesto que aquí, como el radio de la circunferencia es pequeño, la velocidad circular también es pequeña*. Una vez que se encuentra en la plataforma interior fija, el pasajero sale del ferrocarril pasando por un puente (fig. 6).

La supresión de las paradas frecuentes reporta una gran economía de tiempo y de energía. En los tranvías urbanos, por ejemplo, una gran parte del tiempo y casi las dos terceras partes de la energía se gastan en la aceleración paulatina del movimiento al salir de las paradas y en retardar dicho movimiento al llegar a ellas**.

En las estaciones de ferrocarril se podría incluso prescindir de las plataformas móviles especiales para tomar y apearse de los trenes en marcha. Supongamos que por una estación ordinaria pasa un tren expreso y que queremos que sin pararse recoja nuevos pasajeros. Para esto no hay más que hacer que dichos pasajeros se monten en otro tren que se encuentre parado en una vía de reserva paralela y que este tren se ponga en marcha y alcance la misma velocidad que el expreso. Cuando ambos trenes marchen el uno junto al otro *estarán en reposo relativo entre sí*. Entonces, entre ellos se pueden tender unas pasarelas por las que los viajeros podrán pasar tranquilamente desde el tren auxiliar al expreso. De esta forma se pueden suprimir las paradas.

ACERAS MOVILES

En el principio del movimiento relativo se basa también otro dispositivo que hasta ahora se utiliza únicamente en las exposiciones; nos referimos a las llamadas "aceras móviles". Por primera vez se emplearon en la exposición de Chicago del año 1893 y después en la Exposición Universal de París del año 1900.

* No es difícil comprender que los puntos que se encuentran en el borde interior del disco se mueven mucho más despacio que los del exterior, puesto que en el mismo tiempo recorren un camino circular mucho menor.

** Las pérdidas de energía al frenar pueden evitarse conmutando los motores eléctricos del tranvía de forma que funcionen como dínamos y devuelvan corriente a la red. En Charlottenburg, (distrito de Berlín) por este procedimiento se consiguió reducir en un 30% el gasto de energía en las líneas de tranvías. Este mismo procedimiento se utiliza en los ferrocarriles eléctricos de la URSS entre ellos en la línea electrificada Moscú—Vladivostok.

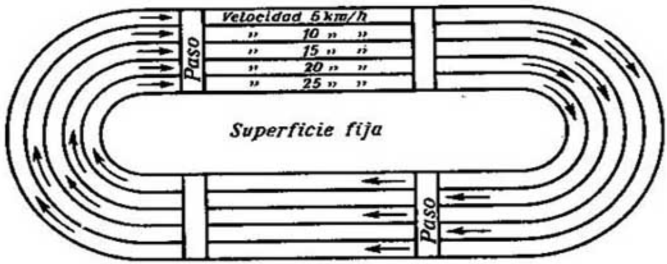


Fig. 7. Aceras móviles.

En la fig. 7 se representa un esquema de este dispositivo. En este esquema se pueden ver cinco bandas-aceras cerradas que se mueven unas dentro de otras, a diferentes velocidades, por medio de un mecanismo especial. La banda exterior se mueve bastante despacio, a 5 km por hora: ésta es la velocidad ordinaria de un peatón y, por consiguiente, no es difícil subirse a ella. Junto a ésta se mueve una segunda banda a 10 km por hora. Poner el pie directamente en ella desde el suelo fijo de la calle sería peligroso, pero pasar desde la primera banda no cuesta ningún trabajo. En realidad, con respecto a la primera banda, cuya velocidad es de 5 km, la *segunda*, que marcha a 10 km por hora, solamente tiene una velocidad relativa de 5 km por hora; por lo tanto, pasar desde la primera a la segunda banda es tan sencillo como pasar desde el suelo fijo a la primera. La *tercera* banda se mueve a 15 km por hora, pero el paso a ella desde la *segunda* no presenta dificultad. Con la misma facilidad se puede pasar desde la tercera a la *cuarta*, cuya velocidad es de 20 km por hora, y desde ésta a la *quinta*, que se desliza a 25 km por hora. Esta última banda es la que transporta a los viajeros hasta el punto que deseen, donde para salir a tierra firme irán pasando sucesivamente y en sentido contrario de banda en banda.

UNA LEY DIFICIL DE COMPRENDER

Ninguna de las tres leyes fundamentales de la Mecánica da lugar a tantas incomprensiones como la "tercera ley de Newton", es decir, *la ley de la acción y reacción*. Todo el mundo conoce esta ley y hasta sabe aplicarla en algunos casos, pero son raros los que pueden considerarse exentos de ciertas dudas. Es posible que nuestro lector haya tenido la suerte de comprender perfectamente esta ley desde el primer momento, pero yo tengo que reconocer que sólo llegué a conseguirlo diez años después de estudiarla por vez primera.

En mis conversaciones con diversas personas he podido convencerme de que la mayoría de ellas estaban dispuestas a reconocer esta ley como cierta, pero haciendo algunas objeciones substanciales. Todo el mundo admite que esta ley es justa cuando se trata de cuerpos en reposo, pero, por lo general, no comprende cómo es posible aplicarla a las relaciones entre los cuerpos en movimiento. La acción, dice la ley, es siempre igual y contraria a la reacción. Esto quiere decir, que si un caballo tira de un carro, el carro tira del caballo hacia atrás con la misma fuerza. Pero en este caso, ¿por qué se mueve el carro? Si las fuerzas son iguales, ¿por qué no se equilibran entre sí?

Estas son las dudas que suele despertar la ley a que nos referimos. ¿Quiere esto decir que la ley no es justa? No, la ley es justa indudablemente, lo que ocurre es que la comprendemos mal. Las fuerzas no se equilibran entre sí porque están aplicadas a *diferentes* cuerpos: una de ellas al caballo y la otra al carro. Las fuerzas son efectivamente iguales, pero, ¿acaso las fuerzas iguales producen siempre los mismos efectos? ¿es que las fuerzas iguales comunican la misma aceleración a todos los cuerpos?; la acción de una fuerza sobre un cuerpo, ¿no depende acaso del propio cuerpo y de la "resistencia" que opone a la fuerza?

Si se recapacita sobre todo esto queda claro por qué el caballo arrastra al carro a pesar de que éste tire de él hacia atrás con la misma fuerza. Las fuerzas que actúan sobre el carro y sobre el caballo son iguales entre sí en cada momento; pero como el carro se mueve libremente sobre sus ruedas, mientras que el caballo se apoya en el suelo, está claro por qué aquél avanza hacia éste. Si el carro no opusiera reacción a la acción de la fuerza motriz del caballo ... se podría prescindir del caballo, puesto que cualquier fuerza, por pequeña que fuera, bastaría para hacer que el carro se moviese. El caballo hace falta precisamente para eso, para vencer la reacción del carro.

Todo esto se comprendería mucho mejor y daría lugar a menos dudas si la ley se formulara, no de la forma abreviada de costumbre: "la acción es igual a la reacción", sino así, por ejemplo: "siempre que un cuerpo ejerce sobre otro una fuerza (acción), éste ejerce sobre él otra fuerza igual y directamente opuesta a la primera (reacción)". Porque las únicas que son iguales son las fuerzas, ya que los efectos que producen (sobre todo si éstos se miden, como de ordinario, por la traslación de un cuerpo) son, por regla general, diferentes, debido a que cada una de las fuerzas está aplicada a un cuerpo *distinto*.

De la misma forma, cuando los hielos polares presionaban sobre el casco del "Cheliuskin"* las bordas de éste presionaban a su vez sobre el hielo con igual fuerza. La catástrofe ocurrió porque el hielo pudo aguantar esta presión sin romperse, mientras que el casco del buque, que aunque de acero no era macizo, cedió a esta fuerza y fue aplastado (en la pag. 49 trataremos más detenidamente de las causas físicas que motivaron la catástrofe del "Cheliuskin").

La caída de los cuerpos también cumple la ley de la acción y reacción, aunque no es fácil distinguir las dos fuerzas. Cuando una manzana se cae al suelo es porque la atrae la Tierra, pero *esta última es atraída a su vez, con la misma fuerza, por la manzana*. Hablando estrictamente, la manzana cae en la Tierra y la Tierra en la manzana, pero las velocidades con que caen una y otra son distintas. Las fuerzas de atracción, siendo iguales, comunican a la manzana una aceleración de 10 m/seg^2, mientras que la que le comunican a la Tierra es tantas veces menor como la masa de esta última es mayor que la de la manzana. Y como la masa de la Tierra es enormemente mayor que la de la manzana, la aceleración que recibe es tan insignificante que puede considerarse igual a cero. Por esto decimos que la manzana cae en la Tierra, en lugar de decir que caen mutuamente la una en la otra.

COMO MURIO EL BOGATIR SVIATOGOR

Entre los cantares épicos rusos existe uno en que se relata la hazaña del bogatir** Sviatogor, que quiso levantar la Tierra. Arquímedes, según cuenta la tradición, también estaba dispuesto a hacer lo mismo si le daban un punto de apoyo para su palanca. Pero Sviatogor era fuerte y sin palanca. A él sólo le hacía falta encontrar un sitio de donde cogerse, algo donde poder aferrar sus manos poderosas. "Si yo encontrara un tirante levantaría la Tierra". Y se presentó el caso: el bogatir encontró en el suelo unas "alforjas" que "ni se inclinaban, ni se movían, ni se podían levantar"

* El barco soviético "Cheliuskin" fue aprisionado por los hielos árticos en el estrecho de Bering, arrastrado hacia el norte y finalmente aplastado en febrero del año 1934. (*N. del T.*)

** Personaje dotado de fuerza y valor extraordinarios, héroe de las canciones épicas rusas. (*N. del T.*)

Sviatogor se bajó del caballo
Y aferrándose con brío a las alforjas
De un tirón las subió hasta las rodillas,
Pero en tierra clavóse hasta las corvas.
No lágrimas bañaron su semblante,
Sino, sangre, intensamente roja.
Y se hundió el bogatir, sin repararlo,
Y acabóse su vida valerosa.

Si Sviatogor hubiera conocido la ley de la acción y reacción habría comprendido que su colosal fuerza aplicada a la Tierra tenía que provocar otra fuerza igual y, por lo tanto también colosal, opuesta a la suya, capaz de hundir a él mismo en la tierra.

En todo caso, por la canción épica se ve que el pueblo, con su capacidad para observar y analizar los hechos, había descubierto hacía ya mucho tiempo la reacción que presenta la tierra cuando sobre ella se apoyan. Las gentes aplicaban de manera inconsciente la ley de la reacción millares de años antes de que el gran físico inglés del siglo XVII, Isaac Newton, la enunciara por vez primera en su libro inmortal "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" (Principios matemáticos de la filosofía natural, es decir, Física).

¿PUEDE HABER MOVIMIENTO SIN APOYO?

Al andar tomamos impulso empujando el suelo con los pies; si este último es demasiado liso o está cubierto de hielo, el pie no encuentra apoyo y no podemos andar. Cuando se mueve una locomotora empuja hacia atrás los raíles con sus ruedas "motrices". Si los raíles se engrasan con aceite, la locomotora "patinará" y no podrá moverse. A veces (cuando hay escarcha) para que los trenes puedan arrancar del sitio en que están parados se echa arena en los raíles, delante de las ruedas motrices, con un dispositivo especial. En los ferrocarriles primitivos las ruedas y los raíles tenían dientes, para que al engranar pudieran empujar las ruedas y recibir a su vez el empuje de los raíles. Los barcos reciben el empuje necesario para avanzar apoyando las palas de sus hélices en el agua. Los aviones hacen lo mismo, pero apoyándolas en el aire. Es decir, cualquiera que sea el medio en que se mueve un objeto, se apoya en él para moverse. Pero, ¿puede un cuerpo moverse *si carece de todo apoyo fuera de sí?*

Pretender conseguir este movimiento parece algo así como querer levantarse a sí mismo tirándose de los pelos. No obstante, que sepamos, esto último sólo pudo realizarlo el fabuloso barón Münchhausen. Y sin embargo este tipo de movimiento, al parecer imposible, se produce frecuentemente ante nuestros ojos. Es verdad que un cuerpo, con sólo sus fuerzas internas, no puede ponerse *totalmente* a sí mismo en movimiento, pero puede hacer que una parte de su materia se mueva en un sentido y la restante en el opuesto. Cuántas veces hemos visto volar cohetes. Pero, ¿por qué vuelan? Los cohetes son un ejemplo gráfico del tipo de movimiento que ahora nos interesa.

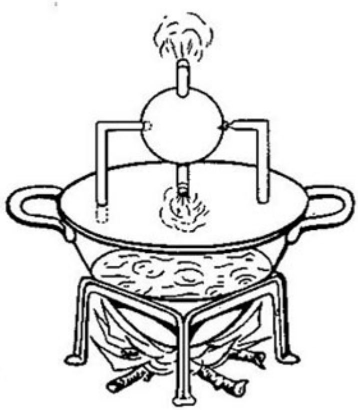
¿POR QUE VUELAN LOS COHETES?

Incluso entre personas que han estudiado Física es frecuente oir explicaciones completamente falsas del vuelo de los cohetes, como ésta, por ejemplo: vuelan porque los gases que se forman dentro de ellos al quemarse la pólvora *empujan al aire*. Así se pensaba antiguamente (los cohetes son un invento antiquísimo) y hasta ahora hay muchos que siguen pensando igual. Pero si un cohete se lanza en el vacío volará aún más de prisa que en el aire. La causa verdadera del movimiento de los cohetes es otra totalmente distinta. El revolucionario ruso Kibalchich describió esta causa con mucha claridad y sencillez en unas notas escritas antes de ser ejecutado, en las cuales daba a conocer una máquina volante inventada por él. He aquí cómo explicaba Kibalchich la forma y manera de funcionar del motor cohete que debía servir de propulsión al aparato, capaz de transportar pasajeros y carga:

"Dentro de un cilindro de hojalata, cerrado por una de sus bases y abierto por la otra, se coloca una carga cilíndrica de pólvora prensada en cuya parte central, a lo largo de su eje, hay un canal hueco. La combustión de la pólvora comienza por la superficie de este canal y se propaga durante un tiempo determinado, hasta que llega a la superficie exterior de la pólvora prensada. Los gases producidos por la combustión presionan en todas las direcciones; pero mientras las presiones laterales de estos gases se equilibran entre sí, la presión sobre el fondo de la envoltura de hojalata en que se encuentra la pólvora no tiene presión contraria que la equilibre (puesto que por este lado los gases pueden salir libremente) y empuja al cohete hacia adelante, en la dirección en que éste se colocó en el banco de lanzamiento antes del encendido".

Aquí ocurre lo mismo que cuando dispara un cañón: el proyectil sale disparado hacia adelante, mientras que el cañón sufre un empuje hacia atrás. Este es el conocido retroceso o "culatazo" de las escopetas y de todas las armas de fuego. Si el cañón estuviera colgado en el aire, sin apoyarse en el suelo, después del disparo se movería hacia atrás con cierta velocidad, que sería

Fig. 8. La máquina (turbina) de vapor más antigua, llamada "eolípila", que se atribuye a Herón de Alejandría.



tantas veces menor que la del proyectil como la masa de este último es menor que la del cañón. Julio Verne, en su novela fantástica "Boca Abajo", cuenta cómo los norteamericanos proyectaron aprovechar la fuerza del retroceso de un cañón colosal para realizar una empresa grandiosa, la de "enderezar el eje de la Tierra".

Un cohete también es un cañón, con la única diferencia de que en vez de proyectiles lanza los gases de la combustión de la pólvora. Este mismo principio es el que se aplica en la "rueda china" o rueda de los fuegos artificiales, en la cual, cuando arde la pólvora contenida en unos tubos sujetos a la rueda, los gases escapan hacia atrás y los tubos (junto con la rueda) se mueven hacia adelante. En realidad esto no es más que una variante del aparato físico que todos conocen con el nombre de rueda de Segner.

Es interesante señalar que antes de la invención del barco de vapor existió un proyecto de barco mecánico basado en el principio de la reacción. Según este proyecto el barco estaría provisto de una potente bomba impelente que

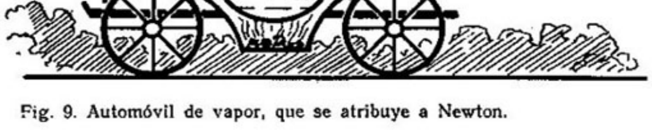


Fig. 9. Automóvil de vapor, que se atribuye a Newton.

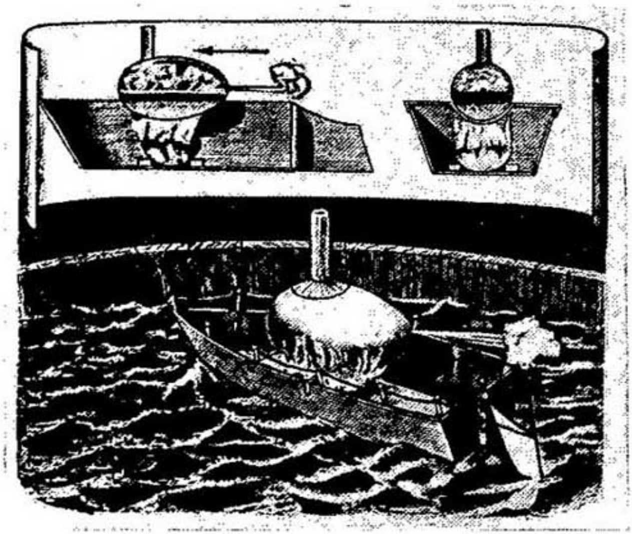


Fig. 10. Barquito de papel con "caldera de vapor" La caldera es el cascarón de un huevo vacío. Para calentarla se emplea un trocito de algodón empapado en alcohol que se coloca en un dedal. El vapor que sale por el orificio de la "caldera" hace que el barquito se mueva en sentido contrario.

expulsaría el agua por la popa, como resultado de lo cual el barco debería moverse hacia adelante, lo mismo que las latas flotantes que en los gabinetes de Física de las escuelas sirven para demostrar este principio. El proyecto no llegó a realizarse, pero desempeñó un papel importante en la invención del barco de vapor, puesto que sugirió esta idea a Fulton.

También sabemos que la máquina de vapor más antigua, es decir, la eolípila de Herón de Alejandría, construida en el siglo II, funcionaba por el mismo principio, es decir, el vapor de una caldera (fig. 8) llegaba a una esfera hueca, sujeta a un eje horizontal, y desde ella salía por unos tubos acodados, con lo cual empujaba a estos tubos en sentido contrario y la esfera comenzaba a girar. La turbina de vapor de Herón no sirvió en la antigüedad más que como juguete ingenioso, ya que el trabajo de los esclavos era tan barato que nadie se preocupó de encontrarle una aplicación práctica a la máquina. Pero el principio en que se funda no fue olvidado por la técnica. En nuestros días este principio se utiliza en las turbinas a reacción.

A Newton, autor de la ley de la acción y reacción, se le atribuye uno de los proyectos más antiguos de automóvil de vapor (fig. 9). Este automóvil debía constar de una caldera, montada sobre ruedas, de la que el vapor salía por una tobera posterior, mientras que la propia caldera, debido a la fuerza de retroceso, avanzaba sobre las ruedas en sentido contrario.

Los automóviles cohete son una variante moderna del carro de Newton.

A continuación ofrecemos a los aficionados a construir modelos el dibujo de un barquito de papel muy parecido al carricoche de Newton. En la caldera del barquito, que se hace con un cascarón de huevo vacío, se calienta agua. Para esto se emplea un trozo de algodón empapado en alcohol, que se coloca sobre un dedal. El vapor que se forma sale por el agujero de la base del huevo, hacia atrás, y hace que el barquito se mueva hacia adelante.

¿COMO SE MUEVE LA JIBIA?

Quizá parezca extraño oir que hay muchos animales para los que el presunto "levantarse a sí mismos tirándose de los pelos" es el procedimiento ordinario de trasladarse en el agua.

La jibia, lo mismo que la mayoría de los *moluscos cefalópodos,* se mueve en el agua de la forma siguiente: el agua entra en su cavidad branquial, a través de una abertura lateral y de un embudo especial que tienen en la parte delantera del cuerpo, y después es expulsada enérgicamente, en forma de chorro, a través de este mismo embudo (sifón). Al ocurrir esto, debido a la ley de la reacción, el animal recibe un empuje en sentido contrario que es suficiente para que pueda "nadar" bastante de prisa hacia atrás, es decir, con la parte posterior del cuerpo hacia adelante. La jibia puede también dirigir el sifón hacia un lado o hacia atrás, en cuyo caso, al expeler rápidamente el agua, se mueve en cualquier dirección.

En esto mismo se basa el movimiento de las medusas. Estas últimas contraen sus músculos y de esta forma expulsan de su cuerpo acampanado el agua, con lo que reciben el empuje en di-

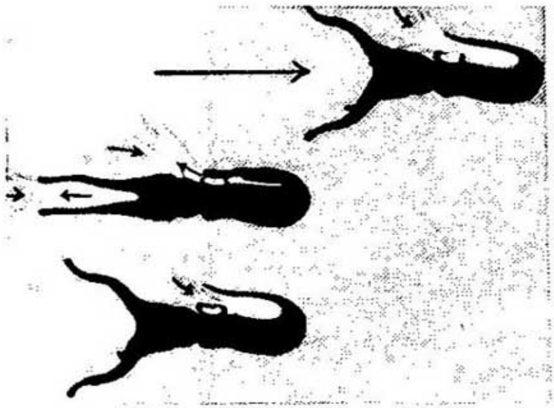


Fig. 11. Así nada la jibia.

rección contraria. Procedimientos análogos emplean para trasladarse las *salpas*, las larvas de las *libélulas* (caballitos del diablo) y otros animales acuáticos.

¡Y nosotros dudábamos de que fuera posible moverse así!

EN COHETE HACIA LAS ESTRELLAS

¿Qué puede haber más seductor que salir de nuestro planeta y viajar por la inmensidad del universo, desde la Tierra a la Luna, desde un planeta a otro? ¡Cuántas novelas fantásticas se han escrito sobre este tema! ¡Quién de nosotros no ha sentido la atracción de un viaje imaginario por los astros! Voltaire en "Micromegas", Julio Verne en "De la Tierra a la Luna" y "Hector Servadac", Wells en "Los primeros hombres en la Luna", como muchos de sus imitadores, realizaron viajes interesantísimos por otros planetas, aunque, claro está, en sueños. En realidad, por ahora seguimos siendo prisioneros de la Tierra.

Pero, ¿es verdaderamente imposible llevar a la práctica esta ilusión tan antigua? Todos estos proyectos, tan ingeniosa y seductoramente descritos como si fueran verdaderos, ¿son irrealizables?

Más adelante volveremos a hablar de proyectos fantásticos de viajes interplanetarios; pero ahora queremos dar a conocer al lector un proyecto real de viajes de este tipo, propuesto por vez primera por el fundador de la cosmonáutica (o astronáutica) K. E. Tsiolkovski.

¿Se puede llegar a la Luna en un avión? Claro que no. Los aviones y los dirigibles se mueven porque repelen el aire en que se apoyan, pero entre la Tierra y la Luna no hay aire. El espacio universal carece en general de un medio suficientemente denso en que pueda apoyarse un "dirigible interplanetario". Por consiguiente, hay que inventar un aparato capaz de moverse y ser dirigido sin apoyarse en nada.

Nosotros ya conocemos proyectiles de este tipo en forma de juguetes, es decir, los clásicos cohetes. ¿Por qué no construir un cohete grandioso, con departamentos especiales para poder transportar pasajeros, reservas de comestibles, balones de aire, etc.? Imaginémonos que los tripulantes del cohete llevan consigo una gran cantidad de combustible y que pueden dirigir el chorro de los gases de explosión en cualquier sentido. Tendremos una verdadera nave espacial dirigible, capaz de navegar por el inmenso océano del Universo y de llevarnos a la Luna, a los planetas, ... Los tripulantes, controlando las explosiones, podrán aumentar la velocidad de este dirigible interplanetario de manera paulatina, para que este aumento no sea perjudicial para el organismo humano. Si quieren bajar a algún planeta podrán orientar su nave, disminuir poco a poco su velocidad y de esta forma suavizar la caída. Finalmente, los tripulantes podrán por un procedimiento análogo regresar a la Tierra.

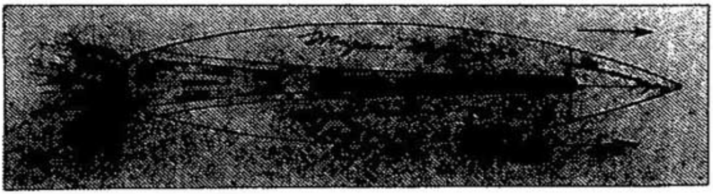


Fig. 12 Proyecto de cohete interplanetario. Dibujo de K. E. Tsiolkovski (1903).

Recordemos cómo hace relativamente poco la aviación conseguía sus primeros éxitos. Ahora los aviones cruzan las zonas más altas de la atmósfera y sobrevuelan montañas, desiertos, continentes y océanos.

Es posible que la astronáutica experimente un florecimiento semejante dentro de dos o tres decenas de años. Entonces el hombre romperá las cadenas invisibles que le sujetan a su planeta natal y se lanzará al espacio sin límites del Universo*.

* El 2 de enero de 1959 el primer cohete cósmico soviético abandonó la Tierra. Tras él, en septiembre y octubre de 1959, otras dos naves espaciales se dirigieron a la Luna, la primera "alunizó" felizmente y la segunda fotografió la parte de la Luna invisible desde la Tierra. El camino del cosmos quedó abierto para el hombre. (*N. de la R.*)

Capítulo 2

FUERZA. TRABAJO. ROZAMIENTO

EL PROBLEMA DEL CISNE, EL CANGREJO Y EL LUCIO

Una de las fábulas más conocidas de I. A. Krilov es "El cisne, el cangrejo y el lucio"*. En ella se cuenta como un cisne, un cangrejo y un lucio se pusieron de acuerdo para tirar de un carro cargado. Pero lo más probable es que a nadie se le haya ocurrido estudiar esta fábula desde el punto de vista de la Mecánica. Y sin embargo el resultado que se obtiene no coincide con el que piensa Krilov.

Se nos plantea un problema de Mecánica en el que hay que componer varias fuerzas que actúan formando determinados ángulos entre sí. Las direcciones de estas fuerzas vienen definidas por la propia fábula:

> ... El cisne tira hacia las nubes,
> El cangrejo hacia atrás, y el lucio al agua.

Esto quiere decir (fig. 13) que una fuerza, es decir, la del cisne, está dirigida hacia arriba; otra, la del lucio (*OB*), hacia un lado, y la tercera, la del cangrejo (*OC*), hacia atrás. Pero no podemos olvidar que existe otra fuerza, el peso del carro cargado, que está dirigida verticalmente hacia abajo. Según la fábula "el carro hasta ahora está en el mismo sitio", es decir, que la resultante de todas las fuerzas aplicadas a él es igual a cero.

Veamos si esto es así. El cisne, al tirar hacia las nubes, no estorba el trabajo que realizan el cangrejo y el lucio; al contrario, lo hace más fácil, puesto que su fuerza está dirigida en sentido contrario al de la gravedad y, por consiguiente, disminuye el rozamiento de las ruedas con la tierra y con sus ejes y alivia el peso del carro o lo equilibra por completo (puesto que la fábula dice que "para ellos liviana parecía la carga"). Admitiendo, para simplificar, este último caso, vemos que quedan únicamente dos fuer-

* I. A. Krilov, el gran fabulista ruso de finales del siglo XVIII y principios del XIX, plantea en esta fábula que el desacuerdo al realizar una empresa hace que resulten estériles todos los esfuerzos. Esto es lo que ocurre con el cisne, el lucio y el cangrejo, que puestos a arrastrar un carro, no pesado para sus fuerzas, no consiguen moverlo del sitio porque cada cual tira para un lado. (*N. del T.*)

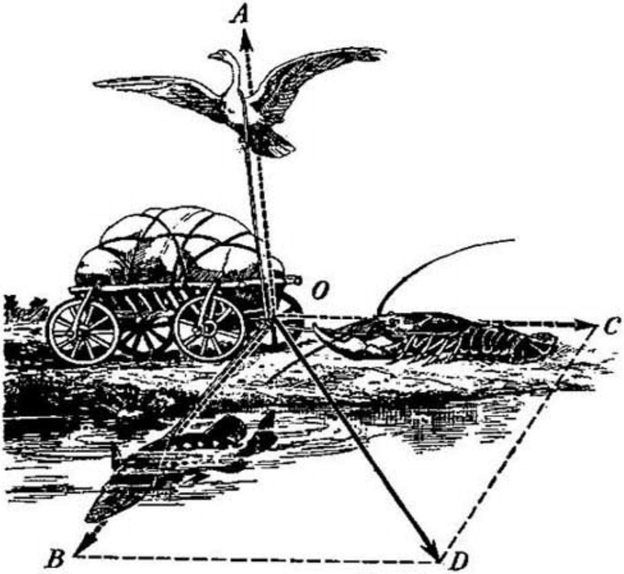


Fig. 13. El problema del cisne, el cangrejo y el lucio resuelto por las reglas de la Mecánica. La resultante *(OD)* debe hacer que el carro vaya hacia el río.

zas: la del cangrejo y la del lucio. Sobre las direcciones de estas dos fuerzas sabemos que "el cangrejo tira hacia atrás, y el lucio al agua". Está claro que el agua no puede estar delante del carro, sino a uno de sus lados (puesto que los "trabajadores" de Krilov no se proponían tirarlo al agua). Por lo tanto, las fuerzas del cangrejo y del lucio forman un ángulo entre sí. Pero si dos fuerzas aplicadas a un cuerpo no están en línea recta su resultante no puede ser igual a cero.

Procediendo de acuerdo con las reglas de la Mecánica, construyamos sobre las fuerzas *OB* y *OC* el paralelogramo, cuya diagonal *OD* nos da la dirección y la magnitud de la resultante. Es evidente que esta resultante debe hacer que se mueva el carro, sobre todo si su peso ha sido equilibrado en todo o en parte por el cisne. Nos queda por determinar hacia dónde se mueve el carro: hacia adelante, hacia atrás o de costado. Esto depende de la relación que exista entre las fuerzas y de las magnitudes que tengan los ángulos que forman entre sí.

Los lectores que tengan cierta práctica en la composición y descomposición de fuerzas pueden analizar fácilmente el caso en que el cisne no equilibra por completo el peso del carro; después de hacerlo quedarán convencidos de que en este caso tampoco puede permanecer inmóvil el carro. Solamente existe un caso en que el carro no se movería al ser solicitado por estas tres fuerzas: cuando el rozamiento de las ruedas con sus ejes o con la carretera es mayor que la resultante de las fuerzas aplicadas. Pero esto se contradice con la afirmación de que "para ellos liviana parecía la carga".

En todo caso Krilov no tenía motivo para asegurar que "el carro sigue sin moverse" y que "... hasta ahora está en el mismo sitio". Sin embargo la moraleja de la fábula sigue siendo cierta.

A PESAR DE LO QUE DICE KRILOV

Como acabamos de ver, la regla mundológica de Krilov que dice que "cuando entre amigos no hay acuerdo, sus obras éxito no tienen", no siempre concuerda con la Mecánica, puesto que las fuerzas pueden estar dirigidas en distintas direcciones y a pesar de ello producir cierta resultante.

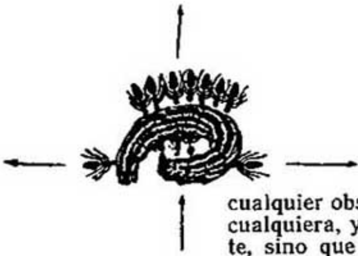
Un ejemplo de esto, que pocas personas sospechan, es el que nos ofrece el trabajo concienzudo de las hormigas (que Krilov alabó como trabajadoras ejemplares). Las hormigas realizan su trabajo colectivo precisamente por el procedimiento que el mismo fabulista como hemos visto criticaba antes. Y a pesar de esto sus esfuerzos dan resultados positivos ... gracias, otra vez, a la ley de la composición de las fuerzas. Si observamos con atención como trabajan las hormigas no tardaremos en darnos cuenta de que la colaboración racional entre ellas es sólo aparente. En realidad cada una trabaja por su cuenta y no se preocupa de ayudar a las demás.

He aquí como describe el trabajo de las hormigas un zoólogo*.

"Cuando diez hormigas arrastran una presa grande por un sitio llano todas actúan por igual y, aparentemente, colaboran entre sí. Pero si la presa (por ejemplo, un gusano) se engancha en

* E. Elachich, "*Instinto*".

Fig. 14. Esquema de cómo arrastran las hormigas un gusano.

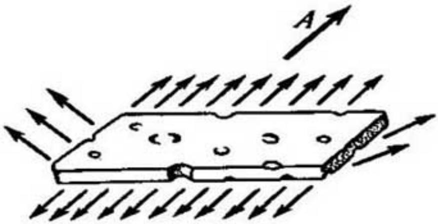


cualquier obstáculo, sea un tallo de hierba o una piedrecilla cualquiera, y no se puede seguir arrastrando hacia adelante, sino que hay que rodear dicho obstáculo, se descubre con toda claridad que cada una de las hormigas procura salvar el obstáculo sin ponerse de acuerdo con ninguna de sus compañeras (fig. 14 y 15). Unas tiran hacia la derecha, otras hacia la izquierda; éstas empujan, aquéllas tiran hacia atrás. Se trasladan de una parte a otra, agarran la presa por otro sitio, pero cada una empuja o tira por su cuenta. Cuando por casualidad las fuerzas de todas las que trabajan se componen de manera que 4 hormigas procuran mover el gusano hacia un lado, mientras que 6 procuran hacerlo en otro sentido, la presa se desplaza hacia el lado de las seis, a pesar de la reacción que oponen las otras cuatro".

Veamos otro ejemplo muy instructivo que ilustra perfectamente la aparente colaboración entre las hormigas. En la fig. 16 se representa un pedacito de queso de forma rectangular al que se agarran 25 hormigas. El queso se desliza despacito en la dirección que indica la flecha *A* y puede pensarse que la fila delantera de hormigas va tirando de él, la trasera va empujando y las hormigas laterales ayudan a las demás. Pero si cogemos un cuchillo y separamos con él la fila de hormigas trasera veremos que ... ¡el queso se mueve más de prisa! Está claro que las 11 hormigas traseras tiraban hacia atrás. Cada una de ellas procuraba volver la carga de manera que, andando hacia atrás, le fuera posible llevarla hasta el hormiguero. Es decir, las hormigas traseras no sólo no ayudaban a las delanteras, sino que

Fig. 15. Esquema de cómo arrastran las hormigas un gusano. Las flechas indican las direcciones aproximadas de los esfuerzos que hacen las hormigas.

Fig. 16. Esquema de cómo las hormigas intentan arrastrar hasta el hormiguero (que se encuentra en la dirección *A*) un trocito de queso.



les estorbaban celosamente y anulaban sus esfuerzos. Para arrastrar este pedacito de queso hubiera sido suficiente el esfuerzo de cuatro hormigas, pero el desacuerdo reinante entre ellas hace que sean 25 las que tiran de él.

Esta peculiaridad de las acciones mancomunadas de las hormigas fue observada hace mucho tiempo por el célebre escritor humorista norteamericano Mark Twain, quien cuenta cómo dos hormigas pretendían arrastrar a una pata de grillo: "Cada una coge la carga por uno de sus extremos y tira de ella con todas sus fuerzas en sentido contrario al de la otra. Ambas se dan cuenta de que ocurre algo anormal, pero no comprenden de qué se trata. Comienza un altercado entre ellas: la discusión se transforma en pelea ... Al fin hacen las paces y vuelven a empezar el absurdo trabajo común, con la particularidad de que la hormiga que resultó herida en la lucha sigue siendo un estorbo. Pero la hormiga sana, haciendo un supremo esfuerzo, arrastra la carga y a su compañera, la cual, en lugar de soltar la presa, sigue colgada a ella". Twain dice en broma y con razón que "las hormigas trabajan bien cuando el naturalista que las observa es poco ducho y saca conclusiones falsas".

¿ES FACIL ROMPER EL CASCARON DE UN HUEVO?

Uno de los "problemas filosóficos" en que solía romperse la cabeza el pensador Kifa Mokiévich de "Almas Muertas"* era el siguiente: "Si el elefante naciera de un huevo, el cascarón ya tendría que ser gordo; ni con un cañón se podría atravesar. Habría que inventar algún arma de fuego nueva".

Este "filósofo" de Gógol se quedaría asombrado si supiera que tampoco es cosa delicada el *cascarón de un huevo* ordinario, a pesar de su delgadez. Romper un huevo entre las palmas de las

* Obra inmortal del escritor ruso Nicolái Vasílievich Gógol. (*N. del T.*)

manos, apretando sus extremos, no es cosa fácil; el esfuerzo que hay que hacer para romper el cascarón en estas condiciones no es pequeño*.

La extraordinaria fortaleza del cascarón del huevo se debe exclusivamente a su forma convexa y tiene la misma explicación que la resistencia de cualquier tipo de bóvedas y arcos.

En la fig. 18 se representa un pequeño arco de piedra de una ventana. El peso S (es decir, el peso de la parte de pared que se encuentra más arriba), que presiona sobre la piedra en forma de cuña que hay en la parte central del arco, aprieta hacia abajo con la fuerza que se representa en la figura por medio de la flecha A. Pero esta piedra, como es cuneiforme, no puede desplazarse hacia abajo y lo único que hace es presionar sobre las piedras contiguas. La fuerza A se descompone, de acuerdo con la regla del paralelogramo, en dos fuerzas C y B que se equilibran con la resistencia de las piedras vecinas. Estas últimas quedan sujetas a su vez entre las otras contiguas. De esta forma, cuando una fuerza exterior actúa sobre el arco no puede destruirlo. Pero si la fuerza actúa por la parte interior del arco lo derrumba fácilmente. Esto es comprensible, puesto que la forma de cuña que impide que las piedras puedan *descender* no es obstáculo para que puedan ser *levantadas*.

El cascarón del huevo también es un arco, pero continuo, es decir, una bóveda cerrada. Cuando sobre él actúa una presión *exterior* no se rompe tan fácilmente como sería de esperar teniendo en cuenta la fragilidad del material. Sobre cuatro huevos crudos se puede poner una mesa bastante pesada sin que sus patas los aplasten (para que los huevos se mantengan de pie hay que ensanchar sus extremos con un poco de escayola; esta última se pega muy bien al cascarón).

Ahora comprenderá el lector por qué la clueca no teme aplastar los huevos cuando se echa sobre ellos. No obstante, cuando el débil pollito necesita salir de su prisión natural, rompe

* Este experimento debe hacerse con precaución, ya que los fragmentos del cascarón pueden hincarse en las manos.

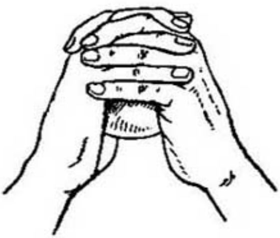
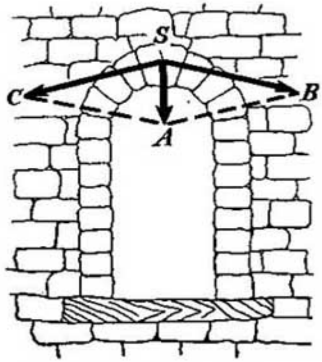


Fig. 17. Para romper un huevo en estas condiciones hace falta un gran esfuerzo.

Fig. 18. Explicación de por qué son tan resistentes los arcos.



desde dentro el cascarón con su pico, sin que esto le cueste gran trabajo.

Al romper el cascarón de un huevo, golpeándolo lateralmente con una cucharilla, no sospechamos lo fuerte que es cuando la presión actúa sobre él en condiciones naturales, ni lo seguro que es el blindaje con que la naturaleza ha protegido al ser que se desarrolla en su interior.

El secreto de que sean tan resistentes los globos de las lámparas eléctricas, que parecen tan frágiles y delicados, se explica de la misma manera que la resistencia del cascarón del huevo. Su fortaleza se hace más digna de admiración si recordamos que muchas de ellas (las de vacío, es decir, las que no están llenas de gas) están casi *totalmente vacías* y, por consiguiente, no tienen nada *dentro* que pueda ofrecer reacción a la presión del aire exterior. Sin embargo esta presión del aire exterior sobre la lámpara eléctrica no es pequeña. Suponiendo que el diámetro de dicha lámpara mida 10 cm, la presión que soporta por ambos lados será mayor de 75 kg (¡el peso de un hombre!). La experiencia demuestra que las lámparas eléctricas de vacío pueden soportar presiones dos veces y media mayores que ésta.

A VELA CONTRA EL VIENTO

Una cosa difícil de comprender es cómo pueden los barcos de vela navegar "contra el viento", o como dicen los marineros navegar "ciñendo o de bolina". Es verdad que cualquier marino puede decir que directamente contra el viento no se puede navegar a vela, pero sí se puede avanzar formando un ángulo agudo con su dirección. Este ángulo puede ser pequeño (de cerca de la cuarta parte de un ángulo recto) y, por consiguiente, parece igual de incomprensible navegar directamente contra el viento o hacerlo formando un ángulo de 22° con su dirección.

No obstante, en realidad no es lo mismo. Ahora veremos cómo la fuerza del viento se puede aprovechar para navegar a su

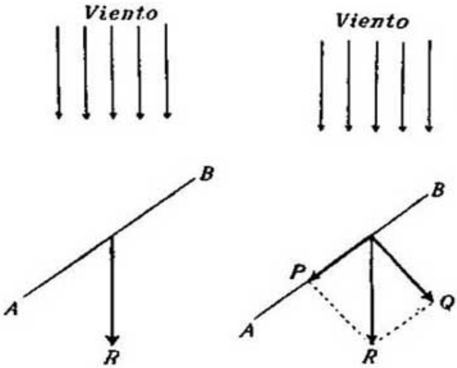


Fig. 19. El viento siempre le empuja a la vela formando un ángulo recto con su plano.

encuentro formando un ángulo pequeño. Comencemos por analizar cómo el viento, en general, ejerce su acción sobre la vela, es decir, hacia donde empuja el viento a la vela cuando sopla sobre ella. El lector pensará probablemente que el viento siempre empuja a la vela en el mismo sentido que él sopla. Pero esto no es así; cualquiera que sea la dirección en que sople el viento siempre le empujará a la vela perpendicularmente a su superficie. En efecto, supongamos que la dirección del viento es la que indican las flechas de la fig. 19 y que la recta *AB* representa la vela. Como el viento presiona por igual sobre toda la superficie

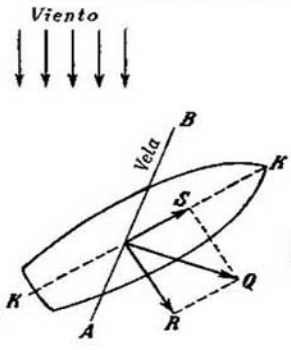
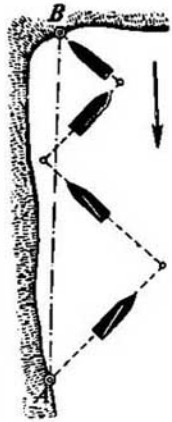


Fig. 20. Así se puede navegar a vela en contra del viento.

Fig. 21. Voltajeo de un barco de vela.



de esta última, podemos sustituir esta presión por la fuerza *R*, aplicada al centro de la vela. Esta fuerza se puede descomponer en dos: una, la fuerza *Q*, perpendicular a la vela, y otra, la fuerza *P*, dirigida a lo largo de ella (fig. 18, a la derecha). Esta última fuerza no le empuja a la vela, puesto que el rozamiento del aire con el lienzo es insignificante. Por lo tanto, queda solamente la fuerza *Q*, que empuja a la vela formando un ángulo recto con ella.

Una vez sabido esto, podemos comprender sin dificultad cómo puede un barco de vela navegar formando con la dirección del viento en contra un ángulo agudo. Supongamos que la recta *KK* (fig. 20) representa la línea de la quilla del barco. El viento sopla, formando un ángulo agudo con esta línea, en la dirección que indica la serie de flechas. La recta *AB* representa la vela, que se coloca de manera que su superficie divida por la mitad al ángulo que forma la dirección de la quilla con la del viento. Veamos cómo se descomponen las fuerzas en estas condiciones (fig. 19). La presión del viento sobre la vela la representamos por medio de la fuerza *Q*, que como sabemos tiene que ser perpendicular a dicha vela. Esta fuerza se puede dividir en dos: una, la fuerza *R*, perpendicular a la quilla, y otra, la fuerza *S*, dirigida hacia adelante a lo largo de la línea de la quilla del barco. Como el barco no se puede mover en la dirección *R*, puesto que encuentra una gran resistencia en el agua (la quilla de los barcos de vela suele ser muy profunda), la fuerza *R* se equilibra casi totalmente con esta resistencia. Queda, pues, una sola fuerza, la *S*, que como puede verse está dirigida hacia adelante y, por consiguiente, hace que el barco avance formando un ángulo agudo con la dirección del viento, como si fuera en contra de él*. Este movimiento se realiza generalmente en forma de zig-zag, como se muestra en la fig. 21. En lenguaje marinero este movimiento se llama "voltajear".

* Se puede demostrar que la fuerza *S* tiene su valor máximo cuando la superficie de la vela divide por la mitad el ángulo que forma la dirección de la quilla con la del viento.

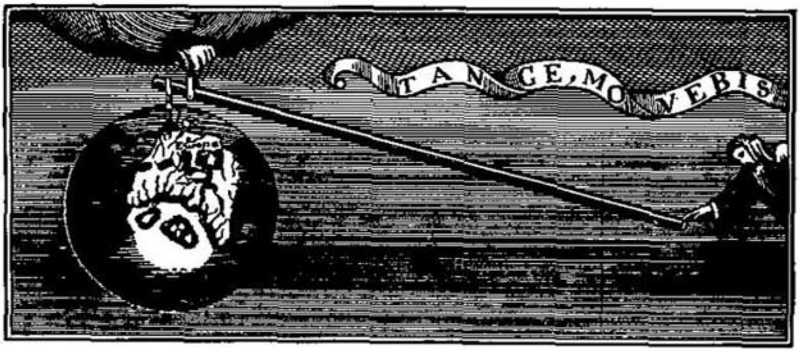


Fig. 22. "Arquímedes levantando la Tierra con la palanca". Grabado de libro de Varignon (1787) sobre Mecánica.

¿HUBIERA PODIDO ARQUIMEDES LEVANTAR LA TIERRA?

¡Dadme un punto de apoyo y levantaré la Tierra!, dice la leyenda que exclamó Arquímedes, el genial mecánico de la antigüedad, descubridor de las leyes de la palanca. "En una ocasión Arquímedes — leemos en un libro de Plutarco — escribió a Hierón, tirano de Siracusa, de quien era pariente y amigo, que con una fuerza dada se puede mover cualquier peso. Arrastrado por la fuerza de sus argumentos añadió, que si existiera otra Tierra, y él pudiera trasladarse a ella, haría que la nuestra se moviera de su sitio".

Arquímedes sabía que no existe peso imposible de levantar con la fuerza más débil, si para ello se utiliza una palanca. No hay más que aplicar esta fuerza a un brazo de palanca muy largo, mientras que sobre el peso se hace que actúe el brazo más corto. Por esto pensaba que presionando sobre un brazo de palanca extraordinariamente largo la fuerza de sus manos bastaría para levantar un peso cuya masa fuera igual a la de nuestro planeta*.

Pero si este gran mecánico de la antigüedad hubiera sabido lo grandiosa que es la masa de la Tierra, lo más probable es que se hubiera abstenido de hacer su presuntuosa exclamación.

* Para concretar el problema entenderemos que la expresión "levantar la Tierra" quiere decir levantar sobre la *superficie de la Tierra* un peso cuya masa sea igual a la de nuestro planeta.

Para convencernos de esto, supongamos por un momento que Arquímedes consiguío la "otra Tierra", es decir, el punto de apoyo que buscaba; supongamos también que logró hacer una palanca de suficiente longitud. Cuánto tiempo tardaría en levantar un peso de masa igual a la de la Tierra un solo centimetro? *Por lo menos ... ¡treinta billones de años!*

En efecto, los astrónomos saben hoy la masa que tiene la Tierra*; un cuerpo que tuviera esta misma masa pesaría en la superficie de nuestro planeta (en números redondos),

6 000 000 000 000 000 000 000 t.

Si un hombre puede levantar directamente 60 kg, para "levantar la Tierra" tendría que aplicar sus manos a un brazo de palanca que fuera...

¡100 000 000 000 000 000 000 000 veces

mayor que el brazo menor!

Un cálculo sencillo basta para demostrar que mientras el extremo del brazo corto suba 1 cm, el otro extremo describirá en el espacio interplanetario un enorme arco de

1 000 000 000 000 000 000 km.

Este camino, cuya longitud es casi inconcebible, es el que hubiera tenido que recorrer la mano de Arquímedes que accionara la palanca para poder "levantar la Tierra" un solo centímetro. ¿Cuánto tiempo necesitaría la mano para recorrer este camino? Si suponemos que Arquímedes era capaz de levantar un peso de 60 kg a 1 m de altura en un segundo (es decir, si suponemos que tenía la capacidad de trabajo de un caballo de vapor), para "levantar la Tierra" 1 cm hubiera necesitado

1 000 000 000 000 000 000 000 segundos,

es decir, ¡treinta billones de años! Si Arquímedes hubiera empujado la palanca durante toda su larga vida no habría podido "levantar la Tierra" ni siquiera el espesor del más delgado de sus cabellos.

Ningún ardid del genial inventor le hubiera servido para reducir sensiblemente este plazo. Porque la "ley de oro de la Mecánica" dice que, en cualquier máquina, lo que se gana en fuerza se pierde en camino recorrido, es decir, en tiempo. Por eso, aunque Arquímedes hubiera conseguido que su mano alcanzara

*En la obra del mismo autor *"Astronomía recreativa"* se explica cómo fue determinada la masa de la Tierra. (*N. de la R.*)

la máxima velocidad posible en la naturaleza, es decir, la de 300 000 km por segundo (igual a la de la luz), habría "levantado la Tierra" un centímetro al cabo de *diez millones de años* de trabajo.

EL ATLETA DE JULIO VERNE Y LA FORMULA DE EULER

Julio Verne describe, en su novela "Mathias Sandorf", al atleta Matifou de la siguiente manera: "...su cabeza es hermosa, los hombros proporcionados, el pecho como un fuelle de fragua, las piernas como dos vástagos de doce años, los brazos como dos bielas de una máquina, las manos como cizallas." Entre las hazañas que el autor le atribuye a este atleta, la más asombrosa quizá sea la ocurrida con el "Trabacolo", barco cuya botadura fue frenada por las poderosas manos de nuestro gigante.

He aquí como relata el novelista este episodio:

«El "Trabacolo", libre ya de las escoras que le sostenían por los flancos, estaba listo para ser botado ... con el talón de su quilla apoyado sobre la corredera enjabonada, no estaba sujeto más que por el tope. Bastaba levantar este tope para que comenzara el deslizamiento ... Media docena de carpinteros armados de mazos golpeaban unas cuñas introducidas delante de la quilla del "Trabacolo" con el fin de levantarlo un poco y de esta manera producir la sacudida que le hiciera arrastrarse hacia el mar.

Todos los presentes seguían esta operación con el más vivo interés, en medio de un silencio general.

En este momento, de detrás del cabo apareció un yate de recreo ... La goleta se dirigía al puerto y tenía que pasar por delante de los astilleros en que se preparaba la botadura del "Trabacolo", por eso, en cuanto dio la señal, hubo que suspender la operación para de esta forma evitar cualquier accidente. Los trabajos debían reanudarse cuando el yate hubiera pasado el canal. Un abordaje entre los dos navíos, el uno de costado y el otro avanzando a gran velocidad, hubiera causado sin duda una gran catástrofe a bordo de la goleta.

Los obreros dejaron de golpear las cuñas con sus mazos ... Todas las miradas se concentraron en la graciosa embarcación cuyas blancas velas estaban doradas por los oblicuos rayos del Sol..; Pronto la goleta ... se encontraba enfrente de los astilleros.

De repente se oye un grito de terror. El "Trabacolo" empieza a moverse, en el preciso momento en que el yate comienza a presentarle su borda de estribor.

Los navíos parecían prontos a chocar. No había tiempo ni posibilidad de evitar el encuentro. El "Trabacolo" se deslizaba rápidamente por la corredera. Una nubecilla de humo blanco, producido por el rozamiento, se arremolinó ante su proa, mientras que la popa se hundía en las aguas de la bahía (la botadura se hacía de popa. *Y. P.*).

En este momento apareció un hombre. Cogió una de las amarras que pendían del "Trabacolo". Pero en vano intentó retenerla encorvándose contra el suelo, con riesgo de ser arrastrado. Hay un tubo de hierro que como puntal de amarre está hincado en la tierra. En un instante la amarra está enrollada a él y se va desenrollando poco a poco, mientras que el hombre, exponiédose a ser apresado por ella y estrujado, la sujeta, haciendo un esfuerzo sobrehumano, durante 10 segundos. Al fin se suelta la amarra. Pero estos diez segundos han sido suficientes. El "Trabacolo" se sumerge en las aguas de la bahía y es levantado por ellas como por un golpe de cabeceo. Después enfila en dirección al canal, pasa rasante a menos de un pie de la popa de la goleta.

La goleta está salvada. En cuanto al hombre, en cuya ayuda nadie tuvo tiempo de acudir, por lo inesperada y rápidamente que ocurrió todo, era Cap Matifou.»

Cómo se sorprendería el autor de esta novela si le dijesen que para realizar semejante hazaña no hacía falta ser un gigante ni tener, como Matifou, la "fuerza de un tigre". ¡Cualquier persona ingeniosa y decidida podría haber hecho lo mismo!

La Mecánica nos enseña que cuando una maroma está enrollada a un amarradero o noray la fuerza de rozamiento alcanza valores grandes. Cuanto mayor sea el número de vueltas que da la maroma en torno al amarradero tanto mayor será el rozamiento. La regla del aumento de este rozamiento dice que cuando el número de vueltas aumenta en proporción aritmética, el rozamiento crece en proporción geométrica. Por esto, incluso un débil niño puede equilibrar una fuerza enorme sujetando el extremo libre de una maroma arrollada 3 ó 4 vueltas en un eje fijo.

En los puertos fluviales muchachos jóvenes sujetan por este procedimiento los barcos que atracan, que a veces llevan centenares de pasajeros. Consiguen hacerlo no porque son muy fuertes, sino gracias al rozamiento de la maroma con el noray.

Euler, el insigne matemático del siglo XVIII, estableció el valor de la fuerza de rozamiento en función del número de vueltas con que se arrolla la cuerda al amarradero. A continuación ofrecemos la fórmula de Euler a aquellos que no se asustan del lenguaje concreto de las expresiones matemáticas:

$$F = fe^{k\alpha}.$$

F es la fuerza contra la cual oponemos nuestro esfuerzo f. La letra e representa el número 2,728 ... (base de los logaritmos naturales), k es el coeficiente de rozamiento entre la maroma y el amarradero. La letra α designa el "ángulo de arrollamiento", es decir, la relación que existe entre la longitud del arco abarcado por la maroma y el radio de este arco.

Si aplicamos esta fórmula al caso descrito por Julio Verne obtendremos un resultado sorprendente. En este caso la fuerza F será la tracción del barco que resbala por la grada. El peso del barco nos lo dice la novela: 50 t. Supongamos que la grada tiene una inclinación del 1/10. En este caso sobre la maroma no actúa todo el peso del barco, sino una décima parte de él, es decir, 5 t ó 5000 kg.

Consideremos que el valor de k — coeficiente de rozamiento entre la maroma y el amarradero de hierro — es igual a 1/3. La magnitud α es fácil de hallar suponiendo que Matifou arrolló tres veces solamente la maroma al amarradero. En estas condiciones

$$\alpha = \frac{3 \times 2\pi r}{r} = 6;$$

poniendo todos estos valores en la fórmula de Euler; obtenemos la ecuación

$$5\,000 = f \cdot 2{,}72^{6\pi \cdot \frac{1}{3}} = f \cdot 2{,}72^{2\pi}.$$

La incógnita f (es decir, la magnitud del esfuerzo que hay que realizar) se puede hallar por esta misma ecuación tomando logaritmos:

$$\lg 5\,000 = \lg f + 2\pi \lg 2{,}72,$$

de donde

$$f = 9{,}3 \text{ kg}.$$

Por lo tanto, el esfuerzo que tuvo que hacer el gigante para realizar su proeza y aguantar la amarra fue de 10 kg (!).

Podría pensarse que esta cifra (10 kg) es simplemente teórica, pero que en realidad se necesita un esfuerzo mucho mayor. Nada de eso, nuestro resultado peca por exceso. Si la amarra es *una maroma de cáñamo y el amarradero es de madera,* el coeficiente k es aún mayor y el esfuerzo necesario es irrisoriamente insignificante. Lo que hace falta es que la cuerda sea suficientemente resistente para aguantar la tensión; si esto es así, hasta un niño débil (arrollando 3 ó 4 veces la cuerda) no sólo puede repetir la hazaña del atleta de Julio Verne, sino superarla.

¿DE QUE DEPENDE LA SOLIDEZ DE LOS NUDOS?

En nuestra vida ordinaria, sin darnos cuenta de ello, utilizamos con frecuencia las ventajas que nos da la *fórmula de Euler*. Un nudo no es otra cosa que una cuerda arrollada a un eje, con la particularidad de que en este caso las veces de este último las hace otra parte de la misma cuerda. La solidez de cualquier clase de nudos (ordinarios, de ballestrinque, marineros, de tejedor, de lazada, etc.) depende exclusivamente del rozamiento, que en este caso aumenta mucho debido a que la cuerda se enrolla sobre sí misma, lo mismo que la maroma alrededor del amarradero. Esto es fácil de comprobar observando las vueltas que da la cuerda al formar el nudo. Cuanto más vueltas y cuanto mayor número de veces se enrolle la cuerda alrededor de sí misma, tanto mayor será el "ángulo de arrollamiento" y, por consiguiente, el nudo será más sólido.

Los sastres utilizan inconscientemente este mismo fenómeno cuando cosen los botones. Por eso hacen pasar el hilo multitud de veces entre los agujeros del botón y la tela y después lo cortan. Si el hilo es fuerte, el botón no se cae. En este caso se aplica la regla mencionada anteriormente: cuando el número de vueltas que da el hilo aumenta en proporción aritmética, la solidez de la costura (o pegadura del botón) crece en proporción geométrica.

Si no existiera rozamiento no podríamos utilizar botones, puesto que los hilos se desenrollarían por la acción de su peso y los botones se caerían.

SI NO EXISTIERA ROZAMIENTO

Ya hemos visto lo diversas e inesperadas que son las formas en que se manifiesta el rozamiento a nuestro alrededor. El rozamiento toma parte muy importante incluso allí donde nosotros ni lo sospechamos. Si el rozamiento desapareciera repentinamente, muchos de los fenómenos ordinarios se desarrollarían de formas completamente distintas.

El papel del rozamiento fue descrito de una manera muy pintoresca por el físico francés Guillaume:

"Todos hemos tenido ocasión de salir a la calle cuando ha helado. ¡Cuánto trabajo nos ha costado evitar las caídas! ¡Cuántos movimientos cómicos tuvimos que hacer para poder seguir en pie! Esto nos obliga a reconocer que, de ordinario, la tierra por que andamos posee una propiedad muy estimable, gracias a la cual podemos conservar el equilibrio sin gran esfuerzo. Esta misma idea se nos ocurre cuando vamos en bicicleta por un pavimento resbaladizo o cuando un caballo se escurre en el asfalto y se cae. Estudiando estos fenómenos llegamos a descubrir las consecuencias a que nos conduce el rozamiento. Los ingenieros procuran evitar el rozamiento en las máquinas, y hacen bien. En la Mecánica aplicada se habla del rozamiento como de un fenómeno muy pernicioso, y esto es cierto, pero solamente dentro de los límites de un estrecho campo especial. En todos los demás casos debemos estar agradecidos al rozamiento. El nos da la posibilidad de andar, de estar sentados y de trabajar sin temor a que los libros o el tintero se caigan al suelo o de que la mesa resbale hasta toparse con algún rincón o la pluma se nos escurra de entre los dedos.

El rozamiento es un fenómeno tan difundido que, salvo raras excepciones, no hay que pedirle ayuda; él mismo nos la ofrece.

El rozamiento da estabilidad. Los albañiles nivelan el suelo de manera que las mesas y las sillas se quedan allí donde las ponemos. Si sobre una mesa colocamos platos, vasos, etc., podemos estar tranquilos de que no se moverán de sus sitios, a no ser que esto ocurra en un barco cuando hay oleaje.

Imaginémonos que el rozamiento se puede eliminar por completo. En estas condiciones, los cuerpos, tengan las dimensiones de una peña o las de un pequeño granito de arena, no podrán apoyarse unos en otros: todos empezarán a resbalar o rodar y así continuarán hasta que se encuentren a un mismo nivel. Si no hubiera rozamiento, la Tierra sería una esfera sin rugosidades, lo mismo que una gota de agua."

A esto podemos añadir, que si no existiera el rozamiento los clavos y los tornillos se saldrían de las paredes, no podríamos sujetar nada con las manos, los torbellinos no cesarían nunca, los sonidos no dejarían de oírse jamás y producirían ecos sin fin, que se reflejarían en las paredes sin debilitarse.

Las heladas nos dan siempre buenas lecciones de la gran importancia que tiene el rozamiento. En cuanto nos sorprenden en la calle nos sentimos incapaces de dar un paso sin temor a caernos. Como muestra instructiva reproducimos las noticias que publicaba un periódico en una ocasión (en diciembre de 1927):

"Londres, 21. Debido a la fuerte helada, el tráfico urbano y tranviario se ha hecho muy difícil en Londres. Cerca de 1 400 personas han ingresado en los hospitales con fracturas de brazos y piernas".

"Cerca del Hyde Park chocaron tres automóviles y dos vagones del tranvía. Los automóviles resultaron totalmente destruidos por la explosión de la gasolina ..."

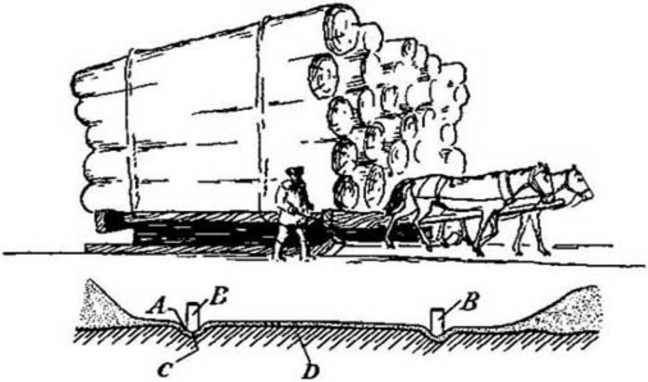


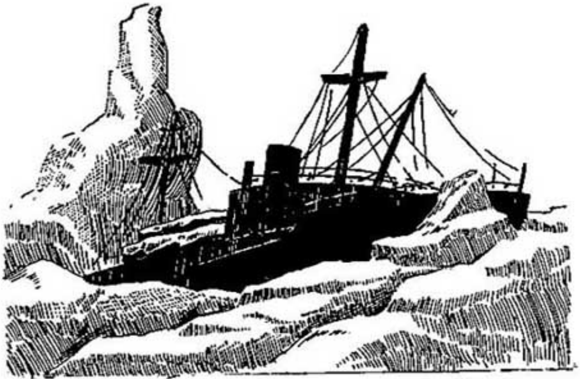
Fig. 23. Arriba, un trineo cargado sobre un camino de hielo; dos caballos arrastran una carga de 70 toneladas. Abajo, el camino de hielo; *A*, carril; *B*, deslizaderas del trineo; *C*, nieve apisonada; *D*, fundamento de tierra de la carretera.

"París, 21. La helada ha ocasionado en París y sus alrededores numerosos accidentes ..."

Y sin embargo, el hecho de que el hielo ofreza poco rozamiento puede ser útil para fines técnicos. Un ejemplo son los trineos ordinarios. Otra demostración aún más convincente son los llamados caminos de hielo, que se hacían para transportar los leños desde el lugar de la tala hasta el ferrocarril o hasta el punto de lanzamiento a un río para su transporte por flotación. Por estos caminos (fig. 23), que tienen una especie de raíles lisos helados, un par de caballos puede arrastrar un trineo cargado con 70 toneladas de troncos.

CAUSA FISICA DE LA CATASTROFE DEL "CHELIUSKIN"

De lo que acabamos de decir no debe sacarse la ligera conclusión de que el rozamiento que produce el hielo es siempre insignificante. Incluso cuando la temperatura está próxima a cero grados, el rozamiento suele ser bastante considerable. El funcionamiento de los rompehielos hizo necesario un estudio detenido



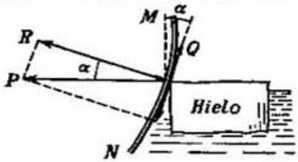


Fig. 24. El "Cheliuskin" aprisionado en los hielos. Abajo: fuerzas que actúan sobre el costado *MN* del buque cuando presiona el hielo.

del rozamiento que se produce entre los hielos polares y las planchas de acero que revisten los barcos. Este estudio puso de manifiesto que dicho rozamiento es mayor de lo que se esperaba y no menor que el del acero con el acero, es decir, el coeficiente de rozamiento entre chapas de acero de revestimiento nuevas y el hielo es igual a 0,2.

Para comprender lo que representa esta cifra para los barcos que navegan por los mares helados examinemos la fig. 24. En ella se representan las direcciones de las fuerzas que actúan sobre la borda *MN* del casco cuando presiona el hielo. La fuerza *P*, de la presión del hielo, se descompone en dos: una, la fuerza *R*, perpendicular a la superficie de la borda, y otra, la *F*, tangente a dicha borda. El ángulo comprendido entre *P* y *R* es igual al angulo α de inclinación de la borda con respecto a la vertical.

La fuerza Q, del rozamiento del hielo con la borda, es igual a R multiplicada por el coeficiente de rozamiento, es decir, por 0,2. Tenemos, pues, que $Q=0,2\ R$. Si la fuerza Q, del rozamiento, es menor que F, esta última hunde al hielo en el agua y éste se desliza a lo largo del casco sin causarle daño alguno. Pero si Q es mayor que F, el rozamiento impide que se hunda el hielo y éste, si la presión dura mucho, puede abollar y aplastar el casco.

¿Cuándo es $Q<F$?

Como puede verse, $F=R$ tgα, por consiguiente, deberá existir la desigualdad $Q<R$ tgα pero como $Q=0,2\ R$, la desigualdad $Q<F$ nos lleva a la siguiente:

$$0,2\ R > R \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

o sea

$$\operatorname{tg} \alpha > 0,2.$$

Buscando en las tablas encontramos que el ángulo cuya tangente es 0,2 es igual a 11°. Por to tanto, $Q<F$ cuando $\alpha>11°$. De esta forma se determina la inclinación que deben tener las bordas del barco, con respecto a la vertical, para que la navegación entre los hielos sea segura, es decir, esta inclinación deberá ser de 11 ° por lo menos.

Veamos ahora lo que ocurrió con el "Cheliuskin". Este barco, que no era rompehielos, recorrió felizmente toda la ruta del norte, pero en el estrecho de Bering fue apresado por los hielos. Estos arrastraron al "Cheliuskin" bastante hacia el norte y finalmente lo aplastaron (en febrero del año 1934). Los dos meses heroicos que permanecieron los tripulantes del "Cheliuskin" en el campo de hielo y su salvamento por los aviadores soviéticos son episodios que no pueden olvidarse. Estos aviadores fueron precisamente los primeros que recibieron el título de Héroes de la Unión Soviética.

La catástrofe ocurrió como sigue:

"El fuerte acero del casco resistió al principio — comunicó por radio el jefe de la expedición O. Y. Schmidt —. Se veía cómo el hielo iba abollando las bordas con su presión y cómo sobre él las chapas del revestimiento del casco empezaban a hincharse encorvándose hacia afuera. La ofensiva del hielo era lenta pero irrechazable. Las chapas de hierro del revestimiento del casco, después de hincharse, se desgarraron por la costura. Los remaches saltaron produciendo chasquidos. En un instante quedó arrancada la borda del barco desde la bodega de proa hasta el extremo de popa del puente ..."

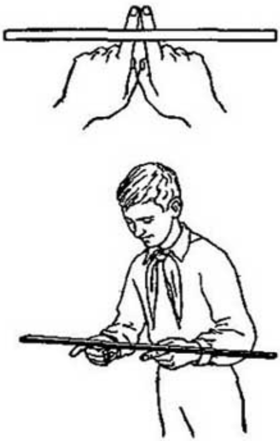


Fig. 25. Experimento con la regla. Arriba, fin del experimento.

Después de lo expuesto en este artículo, el lector deberá comprender cuál fue la causa física de esta catástrofe.

De aquí se deduce la conclusión práctica siguiente: cuando se construyen barcos que deben navegar entre hielos hay que dar a sus bordas una inclinación determinada, es decir, la inclinación mínima de 11 °.

UN PALO QUE SE AUTOEQUILIBRA

Sobre los dedos índices de ambas manos, separadas, coloquemos un palo liso de la manera que indica la fig. 25. Hecho esto, vayamos acercando entre sí dichos dedos hasta que se junten. ¡Qué cosa más rara! En esta posición el palo conserva el equilibrio y no se cae. Si repetimos este experimento muchas veces variando la posición inicial de los dedos, veremos que el resultado es siempre el mismo: cuando se juntan los dedos el palo está en equilibrio.

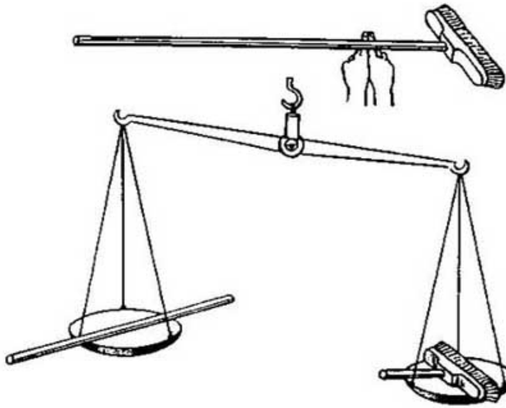
Si en lugar del palo empleamos una regla de dibujo, un bastón, un taco de billar o un cepillo de barrer, observaremos que ocurre lo mismo.

¿En qué consiste el secreto de este resultado tan inesperado?

En primer lugar está claro lo siguiente: como quiera que el palo se encuentra en equilibrio cuando los dedos están juntos, quiere decir que éstos se juntan debajo del centro de gravedad del palo (puesto que un cuerpo permanece en equilibrio si la vertical trazada por su centro de gravedad no se sale de los límites de la base en que se apoya).

Cuando los dedos están separados, soporta mayor carga el dedo que se encuentra más próximo al centro de gravedad del palo. Pero al aumentar la presión aumenta también el rozamiento; por lo tanto, el dedo que está más cerca del centro de gravedad experimenta mayor rozamiento que el que está más alejado. En estas condiciones el dedo más cercano al centro de gravedad no se deslizará por debajo del palo; el único que se mueve es el dedo que está más lejos de este punto. En cuanto este último dedo

Fig. 26. El mismo experimento con un cepillo de barrer. ¿Por qué no está en equilibrio la balanza?



resulta más próximo al centro de gravedad que el otro, los dedos cambian de papel. Estos cambios se suceden hasta que los dedos se juntan. Y como cada vez se mueve un solo dedo (el que está más lejos del centro de gravedad) es natural que al final ambos dedos se encuentren debajo de dicho centro.

Antes de dar por terminado este experimento repitámoslo con un cepillo de barrer (fig. 26, arriba) y planteémonos la siguiente pregunta: si cortamos el palo del cepillo por el sitio en que se apoya en los dedos y ponemos las dos partes así obtenidas en los platillos de una balanza (fig. 26, abajo), ¿cuál de los dos platillos bajará más, el del palo o el del cepillo?

Parece natural que, como las dos partes del cepillo se equilibran entre sí cuando descansan sobre los dedos, se encuentren en equilibrio los platillos de la balanza. Pero en realidad baja más el platillo en que se encuentra el cepillo. La causa de que esto ocurra no es difícil de comprender, si se tiene en cuenta que cuando el cepillo estaba en equilibrio sobre los dedos las fuerzas (pesos) correspondientes a sus dos partes estaban aplicadas a brazos de palanca diferentes, mientras que en la balanza estas mismas fuerzas (pesos) están aplicadas a los extremos de una palanca de brazos iguales.

Por encargo mío se fabricó, para el pabellón de ciencia recreativa del parque de Leningrado, un juego de palos cuyos centros de gravedad se encontraban en diferentes sitios. Estos palos podían dividirse en dos partes (por lo general desiguales) precisamente por el lugar en que estaba el centro de gravedad. Los visitantes se asombraban al ver que la parte más corta pesaba más que la larga.

Capítulo 3

MOVIMIENTO CIRCULAR

¿POR QUE NO SE CAE LA PEONZA MIENTRAS ESTA GIRANDO?

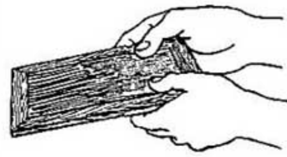
Millares de personas han jugado en su infancia a "bailar" la peonza o la perinola, pero pocas de ellas son las que pueden contestar bien a esta pregunta. Y en realidad, ¿qué explicación se le puede dar al hecho de que una peonza en rotación, situada en posición vertical o inclinada, no se caiga? ¿Qué fuerza la mantiene en esa posición aparentemente inestable? ¿A caso no actúa sobre ella la gravedad?

En este juguete se produce una interacción de fuerzas muy interesante. La teoría de la peonza es bastante compleja y no es nuestro propósito profundizar en ella, pero sí queremos dar a conocer la causa principal de que la peonza no se caiga mientras está girando.

En la fig. 27 se representa una perinola que gira en la dirección que indican las flechas. Prestemos atención a la parte A de su borde y a la parte B, opuesta a aquélla. La parte A tiende a moverse *alejándose de nosotros*; la B, por el contrario, tiende a *acercarse a nosotros*. Veamos ahora qué movimiento reciben estas partes si empujamos hacia abajo el borde de la perinola para que se incline *hacia nosotros*. Al hacer esto obligamos a la parte A a moverse hacia arriba y a la B a moverse hacia abajo; la dirección del empuje forma un ángulo recto con el movimiento propio de estas partes. Pero como la perinola gira rápidamente y la velocidad circular que tienen las partes del disco es muy grande, la nueva velocidad que le comunicamos al hacer que se

Fig. 27. ¿Por qué no se cae la perinola?

Fig. 28. Si se echa por alto una perinola en rotación, su eje conserva la dirección que tenia.



incline es insignificante en comparación con la que ya tenía, por eso se suma a ella, produciendo una velocidad resultante, que se aproxima mucho a la circular, y el movimiento de la perinola casi no varía. Esto explica por qué la perinola (o la peonza) parece que se resiste a que la vuelquen. Cuanto más pesada sea la peonza y más rápidamente gire, tanto más resistencia opone a ser volcada.

La esencia de esta explicación está relacionada directamente con la ley de la inercia. Cada una de las partículas de la peonza se mueve, describiendo una circunferencia, en un plano perpendicular al eje de giro. Por la ley de la inercia, cada una de estas partículas tiende en cada instante a salirse de la circunferencia siguiendo una línea recta tangente a aquélla. Pero cada una de estas tangentes se encuentra en el mismo plano que la circunferencia; por lo tanto, cada partícula tiende a moverse sin abandonar el plano perpendicular al eje de giro en que se halla. De aquí se deduce que todos los planos de la peonza, perpendicula res al eje de rotación, tienden a conservar su posición en el espacio y por esto, la perpendicular común a todos ellos, es decir, el propio eje de rotación, también tiende a conservar su dirección.

Los movimientos que pueden provocar en la peonza las fuerzas exteriores son muy variados y no vamos a examinarlos. Esto exigiría explicaciones demasiado detalladas que resultarían aburridas. Mi propósito se reducía a aclarar por qué todos los cuerpos que giran tienden a conservar invariable la dirección de su eje de rotación.

Esta propiedad tiene gran importancia en la técnica moderna En los barcos y aviones modernos se instalan aparatos giroscópicos (basados en las propiedades de la peonza), como son las brújulas, los autopilotos, los estabilizadores, etc. El efecto de giro sirve también para estabilizar las trayectorias de los proyectiles y de las balas. Este mismo efecto se utiliza para estabilizar el movimiento de los cohetes cósmicos y de los satélites artificiales. Todas éstas son aplicaciones prácticas de lo que parecía un simple juguete.

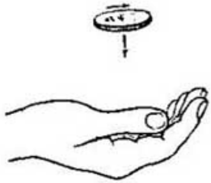


Fig. 29. Así cae una moneda si se echa hacia arriba girando alrededor de su eje.

EL ARTE DE LOS MALABARISTAS

Muchos de los espectaculares juegos de manos que incluyen en sus programas los malabaristas se basan también en la propiedad que tienen los cuerpos giratorios de mantener la dirección de su eje de rotación. A continuación me permito citar unos párrafos del ameno libro del físico y profesor inglés John Perry "La Peonza Giratoria":

"En una ocasión estaba yo demostrando algunos de mis experimentos ante un auditorio que tomaba café y fumaba plácidamente en el magnífico salón de conciertos "Victoria" de Londres. Yo hacía lo posible por interesar a mis oyentes explicándoles que si queremos echarle a alguien un sombrero, para que pueda recogerlo con su bastón, hay que lanzarlo de forma que vaya girando, de la misma manera que cuando tiramos una anilla para que caiga en un sitio determinado. Porque todo cuerpo giratorio opone una resistencia al cambio de dirección de su eje de rotación en la que se puede confiar siempre. Luego expliqué a mis oyentes que *por muy liso que sea el acabado* de un cañón de arma de fuego, no puede garantizar una buena puntería; por eso, las armas modernas tienen los cañones rayados, es decir, en el alma del cañón se hacen unas estrías helicoidales en las que encajan las bandas de forzamiento del proyectil, de forma que este último debe entrar en rotación cuando la fuerza de la explosión de la pólvora le obliga a avanzar por el ánima del cañón. A esto se debe que el proyectil salga del cañón con un movimiento de rotación perfectamente determinado.

Esto fue todo lo que yo pude hacer durante esta conferencia, puesto que no soy ducho en lanzar sombreros ni discos. Pero cuando terminó mi charla, empezaron a actuar

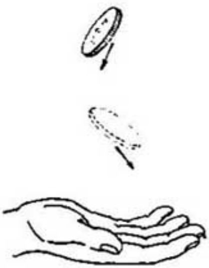
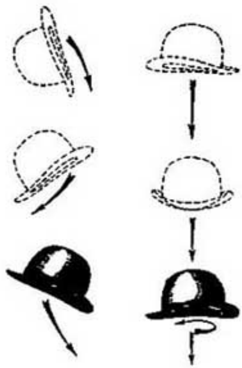


Fig. 30. Si la moneda se echa hacia arriba sin rotación puede caer de cualquier manera.

Fig. 31. Un sombrero es más fácil de coger cuando se tira dando vueltas alrededor de su eje.



dos malabaristas y yo, francamente, no hubiera podido desear una ilustración mejor para las leyes que acababa de explicar que la que ofrecía cada uno de los juegos que hacían estos artistas. Se echaban el uno al otro sombreros, anillos, platos, sombrillas, todo ... girando. Uno de los malabaristas echaba por alto toda una serie de cuchillos, los volvía a coger y otra vez los lanzaba hacia arriba con suma precisión: el público, que conocía ya el por qué de estos fenómenos, se regocijaba, se daba cuenta del movimiento giratorio que el malabarista comunicaba a cada cuchillo, soltándolo de manera que sabía con seguridad en qué posición volvería a sus manos. Yo me quedé admirado de ver que casi todos los números que presentaron los malabaristas servían de ilustración al principio enunciado anteriormente".

OTRA SOLUCION AL PROBLEMA DEL HUEVO DE COLON

Colón resolvió de una manera extraordinariamente fácil el problema de poner un huevo en pie: simplemente, chafó la punta del cascarón*.

Pero esta solución del problema no es justa, porque al chafar el cascarón varió la *forma* del huevo y, por consiguiente, no puso en pie un huevo, sino un cuerpo distinto, puesto que la esencia del problema está precisamente en la forma que tiene el huevo. Colón, pues, resolvió el problema para otro cuerpo, pero no para el que se buscaba.

Y no obstante el problema del huevo de Colón se puede resolver sin cambiar en absoluto la forma del huevo. Para esto no hay más que aprovechar la propiedad que tienen las peonzas, es decir, hacer que el huevo gire alrededor de su eje mayor. De esta forma el huevo se mantendrá en pie,

* La leyenda del huevo del Colón carece de base histórica. La tradición ha atribuido al gran navegante algo que mucho antes había realizado otro personaje y con motivo completamente distinto. Fue el arquitecto italiano F. Brunelleschi (1377—1446), autor de la enorme cupula de la catedral de Florencia, el que dijo: "Mi cúpula está tan segura como este huevo sobre su punta".

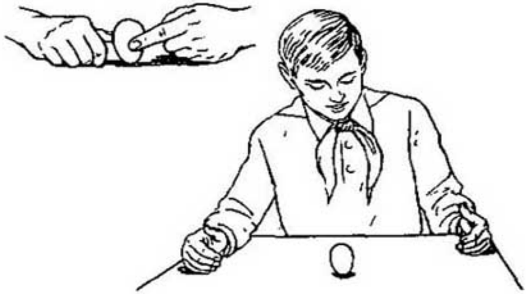


Fig. 32. Solución del problema del huevo de Colón: el huevo gira sobre su punta.

durante cierto tiempo, sobre su extremo romo o incluso sobre su punta. La manera de conseguir esto se puede ver en el dibujo. El huevo se hace girar con los dedos. Al separar las manos vemos que gira, durante algún tiempo, de pie sobre su punta; por lo tanto el problema está resuelto.

Para que el experimento salga bien hay que emplear un huevo duro. Esto no contradice las condiciones del problema de Colón, puesto que este último, al plantearlo, cogió un huevo de los que estaban en la mesa, y es de suponer que los huevos que habían servido no serían crudos.

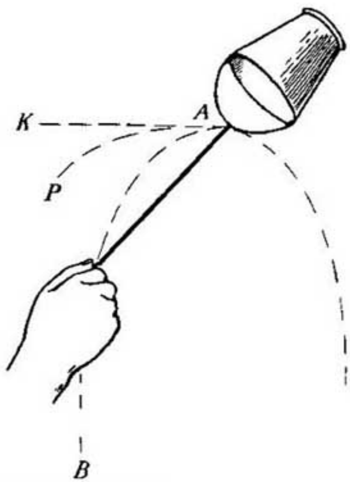
Los huevos crudos no se pueden hacer girar de pie, porque la masa líquida que tienen dentro hace las veces de freno. Esta peculiaridad sirve para distinguir con facilidad los huevos cocidos de los crudos. Este procedimiento lo emplean muchas amas de casa.

LA "ANULACION" DE LA GRAVEDAD

"El agua no se derrama de una vasija que gira, incluso cuando dicha vasija se encuentra boca abajo, porque se lo impide la rotación" — escribía hace dos mil años Aristóteles. En la fig. 33 se representa este experimento, que sin duda han hecho muchos. Procurando que el cubito con el agua gire con suficiente rapidez se consigue que esta última no se derrame ni siquiera en aquella parte de la trayectoria en que el cubo está boca abajo.

Generalmente se suele explicar este fenómeno por la acción de la "fuerza centrífuga", entendiendo por ésta una fuerza imaginaria que, al parecer, va aplicada al cuerpo y que hace que tienda a separarse del centro de rotación. Pero esta fuerza no

Fig. 33. ¿Por qué no se derrama el agua cuando le damos vueltas al cubo?



existe. La tendencia antedicha no es otra cosa que una manifestación de la *inercia,* y todo movimiento inercial se realiza sin que en él tome parte fuerza alguna. En Física se entiende por fuerza centrífuga otra cosa, es decir, la fuerza real con que el cuerpo en rotación tensa el hilo que lo sujeta o presiona sobre el camino circular que recorre. Pero esta fuerza no está aplicada al cuerpo que se mueve, sino al *obstáculo* que impide que este cuerpo se mueva en línea recta, es decir, al hilo, a los raíles en los trozos curvos de las vías, etc.

Volviendo al caso del cubito que gira, procuraremos esclarecer la causa de este fenómeno sin recurrir al concepto de la "fuerza centrífuga". Empezaremos por plantearnos la pregunta siguiente: ¿Hacia dónde se dirigiría el chorro de agua si hiciéramos un orificio en la pared del cubo? Si no existiera la gravedad, el chorro de agua seguiría por inercia, la dirección de la tangente *AK* a la circunferencia *AB* (fig. 33). Pero la gravedad hace que el chorro descienda y describa la curva *AP* (parábola). Si la velocidad circular es suficientemente grande esta curva será exterior a la circunferencia *AB*. Este chorro nos indica el camino que seguiría el agua (mientras gira el cubo) si las paredes que presionan sobre ella no se lo impidieran. Con esto queda claro por qué el agua no tiende en general a moverse verticalmente hacia abajo y por qué no se derrama del cubo. Para que se derramase sería necesario que la boca del cubo estuviera orientada en el sentido de su rotación.

Calculemos ahora con qué velocidad debe girar el cubo de este experimento para que el agua no se derrame. Esta velocidad deberá ser suficiente para que la aceleración centrípeta del cubo en rotación no sea menor que la aceleración de la gravedad; en estas condiciones el agua tenderá a seguir una trayectoria que se encontrará fuera del círculo descrito por el cubo y, por consiguiente, no podrá quedar rezagada con respecto a él. La fórmula para calcular la aceleración centrípeta W es la siguiente:

$$W=\frac{v^2}{R},$$

siendo v la velocidad circular y R el radio del camino que recorre el cubo. Como la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra es $g=9,8$ m/seg², tendremos la desigualdad

$$\frac{v^2}{R} \geqslant 9,8.$$

Si tomamos R igual a 70 cm,

$$\frac{v^2}{0,7} \geqslant 9,8, \text{ de donde } v \geqslant \sqrt{0,7 \times 9,8}; \; v \geqslant 2,6 \text{ m/seg.}$$

No es difícil calcular que para obtener esta velocidad es necesario que la mano dé cerca de vuelta y media por segundo. Esta velocidad de giro es fácil de conseguir y, por consiguiente, el experimento se puede realizar sin dificultad.

La propiedad que tienen los líquidos de apretarse contra las paredes del recipiente que los contiene, cuando éste gira alrededor de un eje horizontal (o vertical), se emplea en la técnica de la fundición en la llamada *colada centrífuga.* Este procedimiento tiene la ventaja de que si el líquido no es homogéneo se distribuye por capas según los pesos específicos de sus partes componentes, con la particularidad de que las partes más pesadas ocupan los puntos más alejados del eje de rotación, mientras que las más ligeras se sitúan próximas a dicho eje. Esto hace que los gases que contiene el metal fundido (que suelen ocasionar las llamadas "sopladuras") son expulsados de dicho metal hacia el centro, es decir, hacia la parte hueca de la fundición. Las piezas de fundición fabricadas por este procedimiento son compactas y no presentan sopladuras. La fundición por colada centrífuga resulta más barata que la colada a presión y tiene la ventaja de que para ella no se necesitan máquinas complicadas.

EN LUGAR DE GALILEO

Para los aficionados a las sensaciones fuertes se suelen organizar diversiones especiales, como, por ejemplo, el llamado "columpio del diablo". Aquí reproducimos la descripción de este artificio que se da en el libro de entretenimientos científicos de Fedaut:

"El columpio va colgado a una sólida barra horizontal que atraviesa toda la habitación, a una altura determinada sobre el suelo. Cuando todos ocupan sus asientos, un empleado cierra la puerta de la habitación, quita la tabla que sirve de pasarela de entrada, dice que el respetable público va a tener ahora ocasión de realizar un pequeño viaje aéreo y comienza a balancear ligeramente el columpio. Hecho esto, se monta en la parte posterior de este último, lo mismo que hacían los cocheros en el estribo trasero, o se marcha de la sala.

Entre tanto va aumentando el balanceo del columpio, éste llega hasta la altura de la barra, luego la sobrepasa cada vez más y finalmente describe un círculo completo. El movimiento se va acelerando de manera cada vez más sensible y las personas que se "columpian", aunque en la mayoría de los casos están advertidas, experimentan la sensación inconfundible del balanceo y del movimiento rápido; les parece que surcan el espacio cabeza abajo e instintivamente se agarran a los espaldares de los asientos para no caerse".

"La amplitud del balanceo comienza a disminuir; el columpio no sube ya hasta la altura de la barra, y al cabo de unos segundos se para por completo".

"En realidad, durante todo este tiempo *el columpio no se mueve de su sitio.* Lo que se mueve es la habitación, que por medio de un mecanismo bastante simple gira alrededor del eje horizontal y de los espectadores. Los muebles que hay en la habitación están sujetos al suelo y a las paredes de la sala; la lámpara que hay en la mesa está soldada a ella, pero de forma que al parecer puede caerse fácilmente. Esta lámpara consiste en una bombillita eléctrica tapada por una gran pantalla. El *empleado,* que parecía que empezaba a balancear el columpio dándole ligeros empujones, en realidad no hacía más que acompasar sus movimientos con las oscilaciones de la sala y fingir que balanceaba el columpio. De esta forma toda esta instalación contribuye a que el engaño sea perfecto".

El secreto de esta ilusión, como puede verse, es tan simple que hace reír. No obstante, si después de conocer este secreto se encontrara el lector en el "columpio del diablo", caería también en el engaño. ¡Tan grande es la ilusión que produce!

A propósito de esto, nos acordamos de unos versos que dicen:

Un sabio de larga barba,*
Seguro de su opinión,
Que el movimiento no existe
Afirmó en una ocasión.
Otro sabio allí presente,**
Palabra no respondió.

* Se refiere al filósofo griego Zenón de Elea (siglo V a de n. e.) que enseñaba que en el mundo todo es invariable y que el movimiento es una ilusión forjada por nuestros sentidos.

** Diógenes.

Pero a pasear se puso
Delante del anterior.
Réplica más convincente
A nadie se le ocurrió.
Y la gente, al alabarla,
Su ingenio reconoció.
Ahora recuerdo otro ejemplo,
Señores, ruego atención,
¿A caso sobre nosotros
no pasa a diario el Sol?
Claro está que nos movemos,
¡Galileo tenía razón!

Entre los pasajeros del "columpio" que no conocieran el secreto, el lector sería una especie de Galileo, pero al revés, puesto que éste demostraba que el sol y las estrellas están fijas y que la Tierra y nosotros nos movemos, a pesar de todo lo que parece evidente, mientras que el lector pretendería demostrar que los que estamos fijos somos nosotros y que la habitación es la que se mueve en torno a nosotros. Y no está descartado que tuviera que sufrir la triste suerte de Galileo, es decir, que lo miraran como a quien discute ... cosas evidentes.

MI DISCUSION CON EL LECTOR

Al lector no le sería tan fácil demostrar, como él seguramente piensa, que los razonamientos anteriores son justos. Supongamos que el lector se encuentra efectivamente en el "columpio del diablo" y que quiere convencer a sus vecinos de que están equivocados. Si uno de los vecinos soy yo, tendrá que discutir conmigo. Nos montamos en el "columpio", esperamos a que después de balancearse empiece a describir, aparentemente, circunferencias completas y empezamos a discutir sobre qué es lo que da vueltas, el columpio o la habitación. Pero ante todo, ruego al lector que tenga en cuenta que mientras dure la discusión no podremos abandonar el columpio; hay, pues, que prevenir todo lo que sea necesario y llevarlo consigo.

Lector. ¡Cómo es posible poner en duda que estamos quietos y que lo que gira es la habitación! Si nuestro columpio se pusiera de verdad quilla arriba, nosotros nos caeríamos, no nos íbamos a quedar colgados cabeza abajo. Pero como ve, no nos caemos. Por lo tanto lo que da vueltas es la habitación.

Yo. Sí. Pero recuerde usted que tampoco se derramaba el agua del cubo que daba vueltas rápidamente, a pesar de que también se ponía boca abajo (pág. 59). El ciclista del "rizo de la muerte" (véase la pág. 69) tampoco se cae cuando va cabeza abajo.

Lector. Si eso es así, vamos a calcular la aceleración centrípeta y veremos si efectivamente es suficiente para que no nos caigamos del columpio. Sabiendo a qué distancia nos encontramos del eje de rotación y el número de vueltas por segundo, podemos hallarla por la fórmula ...

Yo. No pierda usted el tiempo haciendo cálculos. Los constructores del "columpio del diablo", enterados de nuestra discusión, me advirtieron que el número de vueltas es más que suficiente para que el fenómeno se pueda explicar cómo yo digo. Por consiguiente, el cálculo no puede resolver nuestra polémica.

Lector. No obstante, tengo la esperanza de qué podré convencerle. Mire usted, el agua de este vaso no se derrama ... Sí, usted me va a recordar el experimento del cubo que da vueltas ... Bueno, pero vea, esta plomada que tengo en la mano siempre se dirige a nuestros pies, es decir, hacia abajo. Si nosotros diéramos vueltas y la habitación estuviera parada, la plomada se dirigiría al suelo, es decir, tensaría el hilo unas veces hacia nuestras cabezas, otras hacia nuestros costados ...

Yo. Está usted en un error. Si giramos con suficiente velocidad, el peso de la plomada tira en la dirección del radio de giro y en sentido contrario al eje, es decir, hacia nuestros pies, como ahora ocurre.

FIN DE LA DISCUSION

Ahora permítame que la aconseje cómo se puede vencer en un debate como éste. Cuando se va al "columpio del diablo" hay que llevar consigo un dinamómetro (o peso de muelle), colgar en él una pesa cualquiera, por ejemplo, de 1 kg, y observar la señal que marca el índice. Este último indicará siempre un mismo peso, el correspondiente a la pesa colgada (en nuestro caso, 1 kg). Esta es precisamente la demostración de que el "columpio" no se mueve.

Si el "columpio" girase alrededor de un eje, sobre la pesa no sólo actuaría la gravedad, sino también el efecto centrífugo, el cual en los puntos inferiores del camino recorrido *haría aumentar* el peso de la pesa, mientras que en los superiores le *haría disminuir,* es decir, nos daríamos cuenta de que la pesa se hace unas veces más pesada y otras casi ingrávida. Como esto no ocurre, está claro que lo que gira es la habitación y no nosotros.

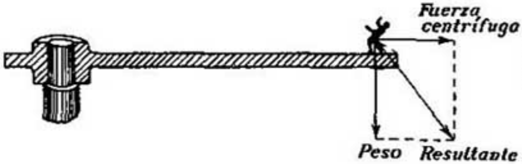


Fig. 37. Fuerzas que actúan sobre una persona que se encuenra en el borde de una plataforma giratoria.

EN LA ESFERA "ENCANTADA"

Un empresario norteamericano construyó, para divertir al público, un carrusel muy interesante e instructivo que tenía la forma de una habitación esférica giratoria. Dentro de esta habitación el público experimentaba sensaciones tan extraordinarias como las que suelen ocurrir en sueños o en los cuentos de hadas.

Antes de entrar en detalles, recordemos el efecto que experimenta una persona cuando se encuentra en una plataforma redonda que gira de prisa. El movimiento giratorio tiende a lanzar la persona hacia fuera; cuanto más lejos esté del centro, con mayor fuerza se sentirá inclinada y arrastrada hacia fuera. Si cierra los ojos, le parecerá que no està de pie sobre un suelo plano, sino sobre una superficie inclinada en la que cuesta trabajo guardar el equilibrio. Esto se comprende fácilmente estudiando las fuerzas que actúan sobre esta persona (fig. 37). El efecto giratorio arrastra su cuerpo hacia fuera, al mismo tiempo que la gravedad tira de él hacia abajo. Estos dos movimientos se componen según la regla del paralelogramo y dan una resultante cuya acción está dirigida *oblicuamente hacia abajo*. Cuanto más rápida sea la rotación de la plataforma, tanto mayor será la resultante y tanto menor su inclinación.

Pero supongamos que el borde de la plataforma está torcido hacia arriba y que nos encontramos de pie en esta parte inclinada (fig. 38). Cuando la plataforma esté inmóvil nos será difícil mantenernos en esta posición, puesto que nos deslizaremos hacia

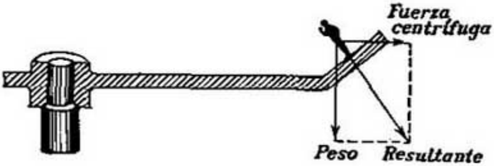


Fig. 38. Cuando la plataforma tiene el borde inclinado, la persona que se encuentra en él guarda el equilibrio perfectamente.

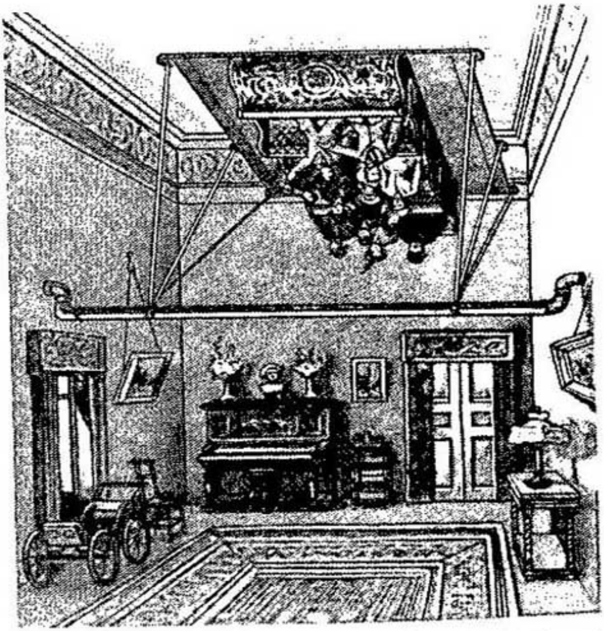


Fig. 34. Esto piensan los que se montan en el "columpio del diablo".

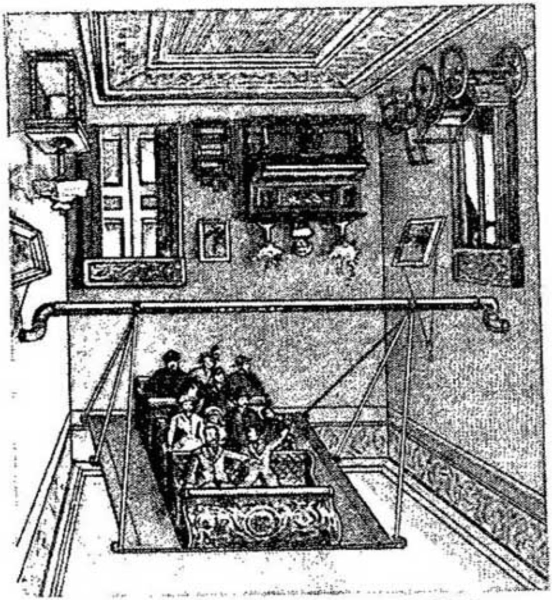


Fig. 35. Esto es lo que ocurre en realidad.

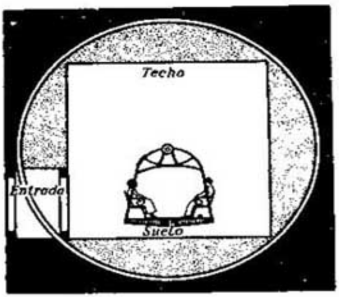
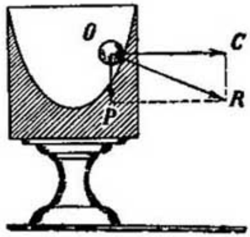


Fig. 36. Esquema del "columpio del diablo".

Fig. 39. Si se hace que esta copa gire con suficiente velocidad la bola no caerá al fondo.



abajo o quizá nos caigamos. Ahora bien, si la plataforma gira, todo será muy distinto: a una velocidad determinada, la superficie nos parecerá horizontal, ya que la resultante de los dos movimientos que experimentamos también estará dirigida oblicuamente, es decir, formando un ángulo recto con el borde torcido de la plataforma.*

Si a la plataforma se le da una forma curva, calculada de manera que su superficie sea en *cada* punto perpendicular a la resultante, la persona que se encuentre en pie en esta superficie se sentirá en todos sus puntos como si estuviera sobre un plano horizontal. Los cálculos matemáticos realizados dan como resultado que esta superficie curva sería la de un cuerpo geométrico que se llama *paraboloide*. Esta superficie se puede obtener haciendo que un vaso, lleno de agua hasta la mitad, gire rápidamente alrededor de su eje; en estas condiciones, el agua asciende junto a las paredes del vaso, desciende en el centro y su superficie libre toma la forma de paraboloide.

Si en lugar de agua echamos en el vaso cera derretida y hacemos que gire hasta que ésta se enfríe, la superficie solidificada de la cera nos da la forma exacta del paraboloide. A una velocidad de rotación determinada, esta superficie

*Esto mismo explica por qué en las curvas de ferrocarril la vía externa está más alta que la interna, por qué los velódromos tienen la pista inclinada hacia adentro y por qué los ciclistas y los motoristas profesionales pueden correr por entarimados circulares muy pendientes.

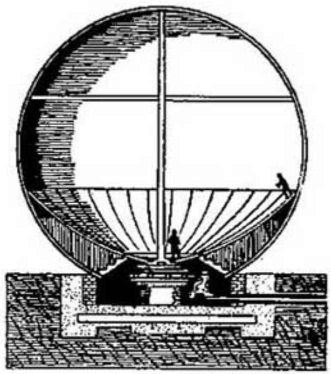


Fig. 40. La esfera "encantada" (corte)

tiene para los cuerpos pesados propiedades semejantes a las de una superficie horizontal fija, es decir, una bola colocada en cualquier parte de esta superficie no rueda hacia abajo, sino que permanece al mismo nivel (fig. 39).

Después de lo dicho se comprenderá sin dificultad en qué consiste la esfera "encantada". El fondo de esta esfera (fig. 40) es una gran plataforma giratoria cuya superficie tiene la forma de paraboloide. Aunque la rotación, producida por un mecanismo oculto, es extraordinariamente suave todas las personas que estuvieran en la plataforma sentirían mareos si no se movieran también las paredes. Para que nadie se pueda dar cuenta del movimiento, la plataforma giratoria se halla dentro de una gran esfera, de paredes opacas, que gira con la misma velocidad que ella.

Esta es, en pocas palabras, la estructura del carrusel llamado esfera "encantada". ¿Qué se siente cuando se está en la plataforma, dentro de la esfera? Mientras gira la plataforma, el suelo que hay debajo de los pies parece siempre horizontal, cualquiera que sea el punto de la curva en que nos encontremos, bien junto al eje (donde en realidad es horizontal), o bien junto a los bordes (donde la inclinación es de 45°). Los ojos ven perfectamente que el suelo es cóncavo, pero los músculos transmiten una sensación que atestigua que dicho suelo es plano. Las sensaciones que producen estos dos sentidos se contradicen entre sí categóricamente. Si desde un borde de la plataforma nos trasladamos al opuesto, nos parece que la enorme esfera se inclina hacia el lado contrario, influida por el peso de nuestro cuerpo, con la misma liviandad que si fuera una pompa de jabón, puesto que en cualquier punto nos sentimos como si estuviéramos en el plano horizontal. La posición oblicua de las demás personas que se encuentran en la plataforma nos parece extraordinariamente anormal: dan la sensación de personas que andan por las paredes lo mismo que las moscas (fig. 41).

Si se derrama agua en el suelo de la esfera "encantada" se extiende por toda su superficie curva formando una capa uniforme. Pero a las personas les parece que delante de ellas tienen una pared líquida inclinada.

Dentro de esta esfera asombrosa parece que dejan de cumplirse las leyes de la gravedad, tal como las concebimos de ordinario, y que nos trasladamos a un mundo maravilloso.

Esta misma sensación la experimentan los pilotos cuando dan un viraje. Si vuelan a una velocidad de 200 km por hora siguiendo una curva cuyo radio sea igual a 500 m, les parece que la tierra se levanta y se inclina 16°.

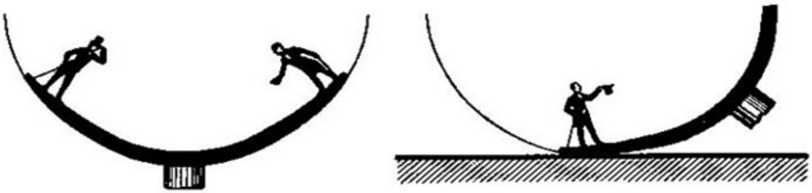


Fig. 41. Posición real de las personas dentro de la esfera "encantada" (a la izquierda) y lo que cree cada una de ellas (a la derecha).

Fig. 42. Laboratorio giratorio. Posición real.

Fig. 43. Laboratorio giratorio Posición aparente.

En la ciudad alemana de Gotinga (o Göttingen) se construyó con fines de investigación científica un laboratorio giratorio. Este laboratorio (fig. 42) tenía la forma de una habitación cilíndrica de 3 m de diámetro y giraba con una velocidad de 50 revoluciones por segundo. Como el suelo era plano, al girar producía en la persona que se encontraba junto a la pared la sensación de que la habitación se inclinaba hacia atrás y que ella estaba semirrecostada en la pared (fig. 43).

En el futuro, cuando en el cosmos aparezcan satélites-laboratorios de gran duración, habrá que hacer que giren, para de esta forma crear en ellos una gravedad artificial. Hoy día ya se hacen proyectos de satélites de este tipo.

UN TELESCOPIO LIQUIDO

La forma ideal del espejo del telescopio reflector es la parabólica, es decir, precisamente la forma que toma de por sí la superficie de un líquido cuando se hace girar alrededor de su eje el recipiente que lo contiene. Los constructores de telescopios emplean muchas horas de trabajo en darle al espejo una forma semejante a la antedicha. La fabricación del espejo de un telescopio dura años enteros. El físico norteamericano Wood soslayó estas dificultades haciendo un *espejo líquido*. Para esto hizo girar mercurio dentro de un recipiente ancho, con lo cual consiguió una superficie parabólica ideal que podía servir de espejo, puesto que el mercurio refleja los rayos de luz. El inconveniente de este telescopio es que cualquier impulso provoca ondulaciones en la superficie del espejo y, por consiguiente, se deforma la imagen. A pesar de que su sencillez es seductora, la idea del telescopio de mercurio de Wood no encontró aplicación práctica. Ni su propio autor, ni los físicos contemporáneos de este invento, tomaron en serio este aparato tan original. He aquí, por ejemplo, lo que después de ver el telescopio escribió Webster, director de la sección de Física de una de las universidades norteamericanas:

> Tirilín, tirilán,
> En un pozo está.
> ¿Qué cogió Wood de valija?
> Mercurio en una vasija.
> Y, ¿qué dio el experimento?
> Casi nada, por supuesto.

Casi todos conocen el vertiginoso truco velosipédico que presentan a veces en los circos en el cual un ciclista entra en un rizo, de abajo arriba, y describe una circunferencia completa, a pesar de que la parte superior de esta circunferencia la recorre con la *cabeza hacia abajo*. En la arena del circo construyen generalmente una pista de madera en forma de rizo con una o más vueltas, como la que se puede ver en la fig. 44. El ciclista desciende por un plano inclinado, sube rápidamente por la pista circular, pasa la parte superior de esta pista con la cabeza para abajo y después de recorrer una circunferencia completa llega felizmente a tierra.*

El público suele creer que este truco es la cumbre del arte acrobático. Algunos espectadores se preocupan y preguntan: ¿qué fuerza misteriosa sostiene a este intrépido ciclista cabeza

* El "rizo de la muerte" es invención simultánea de dos artistas de circo. "Diablo" (Johnson) y "Mefisto" (Nuassetti). Se dio a conocer en el año 1902.

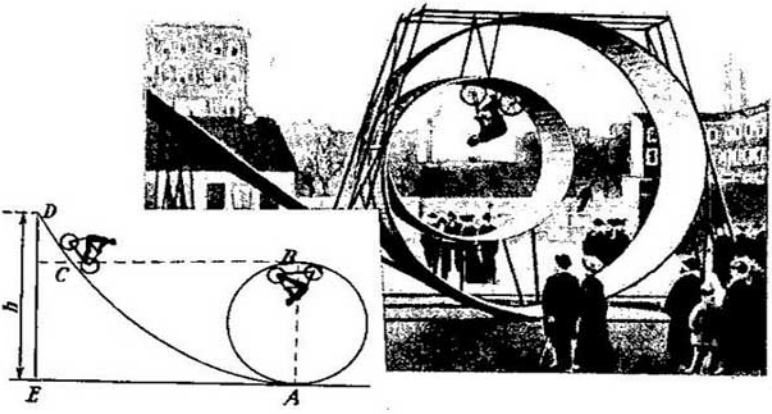


Fig. 44. El "rizo de la muerte". Abajo a la izquierda el esquema para el cálculo.

abajo? Otros, más incrédulos, sospechan que se trata de un engaño. Pero en esto no hay nada sobrenatural. Este truco se explica totalmente por las leyes de la Mecánica. Una bola de billar puesta a rodar por esta misma pista la recorrería hasta el fin con el mismo éxito que el ciclista. En los gabinetes de Física de las escuelas hay "rizos de la muerte" en miniatura.

"Mefisto", el célebre inventor y ejecutor de este truco, antes de lanzarse él mismo a "rizar el rizo", probaba la solidez de la pista echando a rodar por ella una bola cuyo peso era igual al del artista con la bicicleta. Si la bola hacía el recorrido sin contratiempos, "Mefisto" se arriesgaba a ejecutar el truco.

El lector comprenderá, naturalmente, que este fenómeno se debe a la misma causa que explica el experimento del cubo giratorio (pág. 59). Para poder pasar felizmente la parte peligrosa del rizo, es decir, la parte superior, el ciclista debe llevar una velocidad suficientemente grande. Esta velocidad viene determinada por la altura desde la cual empieza a descender el artista. La velocidad mínima tolerable depende del radio del rizo. De aquí se deduce que para que el truco salga bien hay que calcular exactamente la altura desde la cual se lanza el ciclista, de lo contrario puede ocurrir una catástrofe.

LAS MATEMATICAS EN EL CIRCO

Yo sé que las fórmulas "secas" repelen a los aficionados a la Física. Pero si renuncian a conocer el lado matemático de los fenómenos, estos enemigos de las ciencias exactas se verán privados de la posibilidad de prever el desarrollo de los fenómenos y de determinar las condiciones en que deben realizarse. En nuestro caso concreto, por ejemplo, dos o tres fórmulas son suficientes para determinar exactamente las condiciones necesarias para que se realice con éxito un truco tan sorprendente como el de recorrer el "rizo de la muerte".

Hagamos, pues, los cálculos.

Designemos con letras aquellas magnitudes que intervienen en dicho cálculo:

llamemos h a la *altura* desde la cual se lanza el ciclista;

designemos por x la parte de la altura h que sobrepasa del punto más alto del "rizo"; según la fig. 44, $x=h-AB$;

r representará al radio de la circunferencia del rizo;

m designará la *masa* total del ciclista y la bicicleta; el peso conjunto estará expresado por mg, siendo g la *aceleración de la gravedad*, que como sabemos es igual a 9,8 m por segundo cada segundo;

la letra v será la *velocidad* del ciclista en el momento de llegar al punto más alto de la circunferencia.

Todas estas magnitudes pueden relacionarse entre sí por medio de dos ecuaciones. En primer lugar, sabemos por la Mecánica que la velocidad que adquiere el ciclista en el momento que, descendiendo por el plano inclinado, llega al punto C (que se encuentra al nivel de B, como puede verse en la parte inferior de la fig. 44) es igual a la que tendrá en la parte superior del rizo, es decir, en el punto B. La primera de estas velocidades viene expresada por la fórmula * $v=\sqrt{2gx}$, o $v^2=2gx$. Por consiguiente, la velocidad del ciclista en el punto B será igual a $\sqrt{2gx}$, es decir, $v^2=2gx$.

Pero para que el ciclista no se caiga al llegar al punto más alto de la curva hace falta (véase la pág. 59) que la aceleración centrípeta que produzca sea mayor que la aceleración de la gravedad, es decir, hace falta que $\frac{v^2}{r}>g$, o $v^2>gr$. Pero como ya sabemos que $v^2=2gx$, tendremos que $2gx>gr$, o $x>\frac{r}{2}$.

De esta forma ya sabemos que para que este truco se pueda ejecutar con éxito hay que construir el "rizo" de tal forma que el vértice de la parte inclinada de la pista esté 1/2 radio más alto que el punto superior de la circunferencia. La inclinación de la pista no desempeña ningún papel, lo que importa es que el punto desde el cual comienza a descender el ciclista se encuentre como mínimo 1/4 de diámetro más alto que la cumbre del rizo. En este cálculo no hemos tenido en cuenta el rozamiento de la bicicleta y hemos considerado que la velocidad en el punto C es igual a la velocidad en el punto B. Por esto no es conveniente alargar demasiado la bajada, haciéndola más suave. Cuando el descenso es suave, el rozamiento hace que la velocidad del ciclista al llegar al punto B sea menor que la que tenía en C. Si, por ejemplo, el rizo tiene 16 m de diámetro, el artista debe lanzarse desde una altura de 20 m por lo menos. Si esta condición no se cumple, no hay arte que le ayude a "rizar el rizo"; antes de llegar al punto más alto se caerá.

Cuando realiza este truco la bicicleta va sin cadena. El ciclista confía su máquina a la acción de la gravedad, puesto que ni puede ni debe acelerar ni frenar su movimiento. Todo su arte consiste en mantenerse en el centro de la pista de madera. La menor desviación representa un peligro inminente de salir

* Despreciamos la energía de rotación de las llantas de las ruedas de la bicicleta; este factor influye muy poco en el resultado del cálculo.

despedido hacia un lado. La velocidad de la carrera por el interior de la circunferencia es muy grande. Suponiendo que el diámetro de ésta sea igual a 16 m, el ciclista dará la vuelta en 3 segundos. Esto representa una velocidad de... ¡60 km por hora! A esta velocidad no es fácil guiar una bicicleta. Pero esto es precisamente lo que no hace falta. Hay que ser decidido y confiarse a las leyes de la Mecánica. "El truco de la bicicleta no es peligroso de por sí — leemos en un folleto escrito por un profesional —, cuando el aparato está bien calculado y su construcción es sólida. El peligro está en el propio artista. Si le tiembla una mano, se pone nervioso, pierde el control sobre sí mismo o se marea inesperadamente, todo puede esperarse".

En esta misma ley se basa el "rizo de Nésterov" o "looping" y otras figuras de alto pilotaje. Para hacer el "rizo" tiene una importancia primordial tomar buena "carrera" por la curva y mandar diestramente el avión.

FALTA DE PESO

Un bromista dijo una vez que sabía un procedimiento de aborrar en el peso sin engañar a los clientes. El secreto estaba en comprar las mercancías en países próximos al ecuador y venderlas lo más próximo posible a los polos. Ya hace mucho tiempo que sabemos que cerca del ecuador las cosas pesan menos que junto a los polos; 1 kg trasladado desde el ecuador a un polo aumenta en peso 5 g. Claro que para que esta diferencia se note hay que pesarlo en una báscula de resorte hecha (o graduada) en el ecuador, de lo contrario no hay ganancia; porque si las mercancías se hacen más pesadas, lo mismo le ocurre a las pesas.

No creo que nadie se pueda hacer rico comerciando por este procedimiento, pero el bromista tenía razón: la gravedad aumenta realmente al alejarse del ecuador. Esto ocurre porque los cuerpos que están en el ecuador describen las mayores circunferencias al girar la Tierra y también porque la esfera terrestre está más hinchada en el ecuador.

La parte más importante de la pérdida de peso se debe a la rotación de la Tierra. Esta rotación hace que el peso de los cuerpos en el ecuador disminuya, en comparación con el que tienen en los polos, en una fracción igual al 1/290.

Cuando los cuerpos que se trasladan de una latitud a otra son ligeros, la diferencia de peso es insignificante. Pero si se trata de objetos pesados puede alcanzar valores bastante considerables. Nadie sospecha, por ejemplo, que una locomotora que pesa en Moscú 60 t, al llegar a Arcángel resulta 60 kg más pesada, y si va a Odesa, 50 kg más ligera. En un tiempo, desde la isla de Spitzberg se transportaban anualmente a puertos más meridionales cerca de 300 000 t de carbón. Si esta cantidad hubiera sido transportada a un país ecuatorial y pesada en básculas de resorte traídas de Spitzberg, se habría notado una falta de carbón de 1 200 t. Un acorazado que pese en Arcángel 20 000 t, cuando navegue por aguas ecuatoriales será 80 t más ligero; pero esto no se nota, porque todos los demás cuerpos también se hacen más ligeros, sin excluir, naturalmente, el agua del mar*.

Si la Terra girara alrededor de su eje más de prisa que ahora, por ejemplo, si los días en vez de tener 24 horas tuvieran 4, la diferencia de pesos de los cuerpos en los polos y en el ecuador sería mucho más sensible. Con días de cuatro horas, por ejemplo, una pesa de 1 kg en el polo pesaría en el ecuador 875 g nada más. Así son las condiciones de gravedad que existen en Saturno. En este planeta los cuerpos que se encuentran en los polos pesan 1/6 parte más que en el ecuador.

Como la aceleración centrípeta aumenta proporcionalmente al cuadrado de la velocidad, no es difícil calcular a qué velocidad de rotación se hará 290 veces mayor en el ecuador, es decir, a qué velocidad se hará igual a la fuerza de atracción. Esto sucedería si la Tierra girase 17 veces más de prisa que en la actualidad (17×17 = aproximadamente a 290). En estas condiciones los cuerpos dejarían de ejercer presión sobre los sitios en que se apoyan. En otras palabras, si la Tierra girara 17 veces más de prisa, las cosas que estuvieran en el ecuador... *¡no pesarían nada*!

En Saturno pasaría lo mismo si su velocidad de rotación aumentara dos veces y media nada más.

De lo expuesto se deduce que el lanzamiento de los satélites artificiales es preferible hacerlo desde regiones ecuatoriales y en dirección oeste — este. Para lanzar satélites cuyas órbitas formen ángulos grandes con el ecuador hay que gastar mucha más energía. Precisamente por esto los primeros satélites norteamericanos volaban solamente sobre las regiones ecuatoriales, ya que los cohetes portadores de que disponían eran poco potentes y no servían para ponerlos en órbitas más inclinadas con respecto al ecuador.

* Por esto en las aguas ecuatoriales el barco se hundirá hasta la misma profundidad que en las polares, porque aunque él se hace más ligero, al agua que desaloja le ocurre lo mismo.

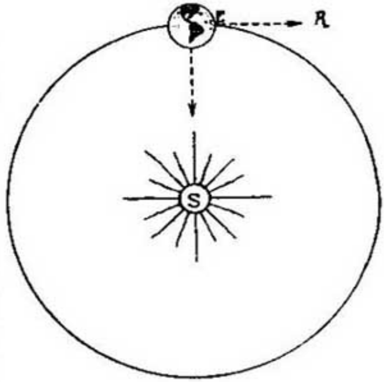
ATRACCION UNIVERSAL

¿ES GRANDE LA FUERZA DE LA ATRACCION?

"Si la caída de los cuerpos no fuera una cosa que vemos a cada instante, sería para nosotros el fenómeno más asombroso", escribía el célebre astrónomo francés Arago. La costumbre hace que el hecho de que la Tierra atraiga a todos los cuerpos nos parezca un fenómeno natural y ordinario. Pero cuando se nos dice que los cuerpos también *se atraen entre sí* nos resistimos a creerlo, porque en las condiciones normales de nuestra vida no vemos nada semejante.

Efectivamente, ¿por qué en torno nuestro no se manifiesta constantemente, en las circunstancias normales, la ley de la atracción universal? ¿Por qué no vemos cómo se atraen entre sí las mesas, las sandías, las personas? Porque cuando los objetos son pequeños la fuerza de atracción que ejercen es muy pequeña. Citaré un ejemplo ilustrativo. Dos personas que se encuentren a dos metros de distancia entre sí se atraen mutuamente, pero la fuerza de esta atracción es insignificante. Suponiendo que estas dos personas tienen un peso medio, la atracción será de 1/100 de miligramo. Esto quiere decir que estas dos personas se atraen mutuamente con la misma fuerza con que una pesita de 1/100 000 de gramo presiona sobre el platillo de una balanza. Solamente las balanzas de extraordinaria sensibilidad de los laboratorios de investigación pueden apreciar un peso tan insignificante. Claro está que esta fuerza no puede hacer que nos movamos del sitio, puesto que lo impide el rozamiento entre las suelas de nuestros zapatos y el suelo. Para que nos movamos, estando sobre un suelo de madera, por ejemplo (la fuerza de rozamiento entre las suelas de los zapatos y el suelo será en este caso igual al 30% del peso de nuestro cuerpo) hace falta que sobre nosotros actúe una fuerza mínima de 20 kg. Resulta cómico comparar esta fuerza con la de una centésima de miligramo, que es la que ejerce la atracción. Un miligramo es la milésima parte de un gramo, y un gramo es la milésima parte de un kilogramo; por lo tanto, 0,01 mg será... ¡la mitad de la *mil millonésima parte* de la fuerza necesaria para hacer que nos movamos del sitio! Siendo así, ¿qué tiene de particular que, en condiciones normales, no nos demos ni la más leve cuenta de la atracción entre los cuerpos terrestres?

Fig. 45. La atracción del Sol hace que se curve la trayectoria de la Tierra *E*. La inercia hace que el planeta tienda a seguir la línea tangente *ER*.



Si no existiera el rozamiento sería otra cosa; entonces nada impediría que hasta la más leve atracción provocara la aproximación de los cuerpos entre sí. Pero en este caso la aproximación mutua de dos personas producida por una fuerza de atracción de 0,01 mg sería también muy lenta, es decir, se realizaría con una *velocidad* insignificante. Por medio de cálculos se puede demostrar que, si no existiera rozamiento, dos personas situadas a 2 m de distancia se aproximarían entre sí (por influjo de la atracción mutua) 3 cm durante la primera hora, 9 cm durante la segunda y 15 cm durante la tercera. El movimiento de aproximación se iría acelerando, pero las dos personas no llegarían a juntarse antes de cinco horas.

La atracción entre los cuerpos terrestres se puede notar en aquellos casos en que la fuerza de rozamiento no es un obstáculo, es decir, cuando los cuerpos no se mueven. Un peso colgado de un hilo se halla sometido a la atracción de la Tierra (por eso el hilo está dirigido verticalmente), pero si cerca de este peso se encuentra un cuerpo cuya masa sea grande, aquél será atraído por éste y el hilo se desviará ligeramente de su posición vertical y tomará la dirección de la resultante entre la atracción de la Tierra y la del cuerpo, que será relativamente muy pequeña. La desviación de una plomada en las proximidades de una gran montaña fue observada por vez primera en el año 1775 en Escocia, por Maskelyne, quien comparó la dirección de dicha plomada con la del polo celeste, por los dos lados de una misma montaña. Posteriormente se realizaron otros experimentos más perfectos, utilizando balanzas especiales, que permitieron determinar exactamente la fuerza de la atracción.

Como hemos visto, la fuerza de la atracción entre masas pequeñas es insignificante. A medida que aumenten las masas crece la atracción proporcionalmente al producto de éstas. Pero hay algunas personas propensas a exagerar esta fuerza. Hasta un científico, aunque no físico, sino zoólogo, intentó demostrarme en una ocasión que la atracción que suele observarse entre los barcos se debe a la atracción universal. Por medio de cálculos no es difícil demostrar que la atracción universal no tiene nada que ver con esto. Dos navíos de línea de 25 000 t cada uno que se encuentren a 100 m de distancia entre sí se atraerán mutuamente con una fuerza total de... ¡400 g! Lógicamante esta fuerza es incapaz de producir el más mínimo acercamiento entre dichos barcos. La causa verdadera de la misteriosa atracción que existe entre los barcos es otra, que explicaremos en el capítulo dedicado a las propiedades de los líquidos.

Pero la fuerza de atracción, que es tan insignificante entre masas pequeñas, se hace muy sensible cuando se trata de masas tan colosales como las de los cuerpos celestes. Baste decir que incluso un planeta tan alejado de nosotros como Neptuno, que gira casi en el límite del sistema solar, nos manda su "saludo" atrayendo a la Tierra con una fuerza de... ¡18 millones de toneladas! A pesar de la enorme distancia que nos separa del Sol, la Tierra se mantiene en su órbita gracias a su atracción. Si la atracción que ejerce el Sol desapareciera por cualquier causa, la Tierra, siguiendo una dirección tangencial a su órbita actual, se lanzaría a recorrer eternamente la profundidad insondable del espacio cósmico.

UN CABLE DE ACERO DESDE LA TIERRA AL SOL

Supongamos que la poderosísima atracción del Sol desaparece efectivamente y que el trágico futuro de la Tierra es alejarse para siempre en los fríos y lóbregos desiertos del universo. Pero figurémonos— aunque para esto hace falta no poca fantasía —, que nuestros ingenieros deciden reemplazar las invisibles cadenas de la desaparecida atracción por un enlace material, es decir, deciden simplemente unir la Tierra con el Sol por medio de fuertes cables de acero, los cuales tendrán la misión de mantener la Tierra en su órbita circular alrededor del Sol. ¡Qué puede haber más fuerte que el acero, cuya resistencia a la tracción alcanza 100 kg por milímetro cuadrado! Figurémonos una poderosa columna de acero de 5 m de diámetro. La superficie de su sección transversal sería, en números redondos, de 20 000 000 mm², por consiguiente, para romper por tracción esta columna se necesitaría un peso de 2 000 000 t. Supongamos ahora que esta columna se extiende desde la Tierra hasta el Sol y que une entre sí a ambos astros. ¿Cuántas columnas como ésta harían falta para mantener la Tierra en su órbita? ¡Un millón de millones! Para que sea más fácil hacerse una idea de lo que sería este bosque de columnas de acero, que poblaría densamente tanto los continentes como los océanos, habrá que decir que, si las columnas estuvieran repartidas uniformemente por todo el hemisferio terrestre que mira al Sol, el espacio entre dos columnas contiguas sería poco más ancho que ellas mismas. Imagínense ustedes la fuerza que hace falta para romper este enorme bosque de columnas de acero y tendrán una idea de la fuerza invisible, pero poderosísima, de la atracción mutua entre la Tierra y el Sol.

Toda esta fuerza colosal se manifiesta exclusivamente en torcer el camino por el cual marcha la Tierra. Esta fuerza hace que la Tierra se desvíe 3 mm cada segundo de la línea tangente y que, gracias a esto, el camino que sigue nuestro planeta sea una curva cerrada, es decir, una elipse. Parece imposible que para que la Tierra se desvíe 3 mm cada segundo, es decir, la altura que tiene este renglón, sea necesaria una fuerza tan imponente. Pero si una fuerza tan extraordinaria puede comunicarle solamente una desviación tan insignificante, podemos figurarnos lo enorme que es la masa de nuestro planeta.

¿ES POSIBLE OCULTARSE A LA GRAVITACION?

Acabamos de fantasear sobre lo que ocurriría si desapareciera la atracción mutua entre el Sol y la Tierra y hemos visto que la Tierra, liberada de las cadenas invisibles de la atracción, recorrería vertiginosamente la inmensidad del universo. Abramos ahora nuestra fantasía a otro tema: ¿qué ocurriría con todos los objetos terrestres si no existiera la gravedad? Nada los sujetaría a nuestro planeta y el menor impulso sería suficiente para lanzarlos al espacio interplanetario. Ni siquiera sería necesario aguardar este impulso, la propia rotación de la Tierra dispersaría en el espacio todo cuanto no está sólidamente ligado a su superficie.

El escritor inglés Wells utilizó este género de ideas para describir en una novela un viaje fantástico a la Luna. En esta obra ("Los primeros hombres en la Luna") el ingenioso novelista propone un procedimiento muy original para viajar de un planeta a otro. Este procedimiento consiste en el empleo de una sustancia especial, inventada por el científico, héroe de la novela, que posee la magnífica propiedad de ser impenetrable a la gravedad. Si una capa de esta sustancia se coloca debajo de un cuerpo cualquiera, este último se liberará de la atracción de la Tierra y quedará sometido solamente a la atracción de los demás cuerpos. Wells le dio a esta sustancia fantástica el nombre de "cavorita", por ser Cavor su inventor imaginario.

"Sabemos — escribe el novelista —, que para la atracción universal, es decir, para la gravitación, todos los cuerpos son penetrables. Se pueden poner pantallas que impidan el paso de los rayos de luz hasta los objetos; por medio de chapas metálicas se puede preservar un cuerpo contra la llegada de las ondas eléctricas de la radiotelegrafía, pero no existen obstáculos que puedan proteger un objeto de la atracción del Sol o de la gravitación terrestre. No es fácil explicarse por qué no existen en la naturaleza barreras semejantes para la gravitación. Pero Cavor no veía ningún motivo que pudiera impedir la existencia de una sustancia impenetrable a esta atracción y se consideraba a sí mismo capaz de crear artificialmente la sustancia que tuviera esta propiedad".

"Cualquiera que posea una chispa de imaginación puede figurarse fácilmente qué posibilidades tan extraordinarias abriría ante nosotros una sustancia semejante. Si hace falta levantar un peso, aunque éste sea enorme, bastará con poner debajo de él una hoja de esta sustancia para que pueda ser levantado hasta con una pajita".

Después de conseguir esta sustancia estupenda, los héroes de la novela construyen una nave espacial en la cual realizan un intrépido viaje a la Luna. La estructura de este proyectil es muy sencilla; en él no existe ningún mecanismo propulsor, puesto que se mueve por medio de las atracciones que sobre él ejercen los astros.

A continuación reproducimos la descripción que hace Wells de este proyectil imaginario:

"Figúrense ustedes un proyectil esférico bastante amplio, capaz de transportar dos personas con sus equipajes. Este proyectil tiene dos envolturas, una interna y otra externa; la interna de vidrio grueso y la externa de acero. En él se puede hacer provisión de aire condensado, alimentos concentrados, aparatos para destilar agua, etc. La esfera de acero estará totalmente recubierta por fuera con una capa de "cavorita". La envoltura de vidrio interna será continua, excepto la escotilla; la de acero, por el contrario, constará de partes independientes, cada una de las cuales podrá enrollarse como si fuera una cortinilla. Esto se puede conseguir sin dificultad por medio de unos resortes; para subir y bajar las cortinillas se empleará una corriente eléctrica, que unos alambres de platino conducirán desde la envoltura de vidrio. Pero esto son ya pormenores técnicos. Lo principal es que la envoltura exterior del proyectil estará formada por una especie de ventanas con cortinilla de "cavorita". Cuando todas las cortinillas estén bajadas por completo, en la esfera no podrá penetrar ni luz, ni ninguna clase de energía radiante, ni la fuerza de la atracción universal. Pero imagínense que una de las cortinillas está levantada. En este caso cualquier masa que se encuentre a alguna distancia enfrente de esta ventana nos atraerá hacia sí. Prácticamente podremos viajar por el espacio cósmico atraídos ya por uno, ya por otro cuerpo celeste".

COMO HICIERON EL VIAJE A LA LUNA LOS HEROES DE WELLS

Es muy interesante cómo el novelista describe el momento en que el vagón interplanetario emprende su viaje. La tenue capa de "cavorita" que recubre la superficie externa del proyectil hace que éste se comporte como si fuera ingrávido. Ustedes comprenderán que un cuerpo ingrávido no puede encontrarse tranquilamente en el fondo del océano aéreo; con él deberá ocurrir lo mismo que un corcho que estuviera en el fondo de un lago y que inmediatamente subiría a la superficie. De la misma forma el proyectil ingrávido — sobre el cual actúa además la inercia de la rotación de la Tierra —, deberá elevarse rapidísimamente y, después de alcanzar los límites de la atmósfera, continuar libremente su camino en el espacio interplanetario. Así fue como emprendieron su vuelo los héroes de la novela. Cuando se hallaron en el espacio cósmico, comenzaron a abrir unas ventanas y a cerrar otras, exponiendo el interior del proyectil unas veces a la atracción del Sol y otras a la de la Tierra o de la Luna, y así llegaron a la superficie de nuestro satélite natural. Después uno de los expedicionarios volvió a la Tierra en este mismo proyectil.

No vamos a discutir aquí la esencia de idea de Wells (esto es cosa que hice en otro lugar*, donde expuse su inconsistencia). Creamos por un momento al ingenioso novelista y sigamos a sus personajes en la Luna.

MEDIA HORA EN LA LUNA

Veamos cómo se sentían los personajes de la obra de Wells en un mundo donde la gravedad es mucho menor que en la Tierra.

He aquí una página curiosa** de la novela "Los primeros hombres en la Luna". Habla uno de los habitantes de la Tierra recién llegados a la Luna.

* *Viajes interplanetarios".*
** El trozo que reproducimos está un poco extractado.

"Empecé a destornillar la tapa del proyectil. Me puse de rodillas y me asomé por la escotilla. Abajo, a una distancia de tres pies de mi cabeza, yacía la nieve inmaculada de la Luna.

Cavor se lió en una manta, se sentó en el borde de la escotilla y empezó a bajar las piernas. Cuando tenía sus plantas a medio pie del suelo, dudó un momento y se dejó caer sobre la superficie del mundo lunar.

Yo lo estaba mirando a través de la envoltura de vidrio de la esfera. Después de dar varios pasos se detuvo un minuto, miró a su alrededor, y por fin se decidió a saltar hacia adelante.

El vidrio deformó este movimiento, pero a mí me pareció que este salto fue demasiado grande en realidad. Cavor se encontró de golpe a 6 ó 10 metros de mí. De pie sobre una peña, me hacía señas; es posible que gritase algo; el sonido no llegaba hasta mis oídos ... Pero, ¿cómo dio el salto?

Yo estaba preocupado y decidí salir por la escotilla y dejarme caer. De esta forma me encontré al borde de un hoyo nevado. Di un paso adelante y después salté.

Sentí que volaba y pronto me encontré cerca de la peña en que estaba esperándome Cavor. Me cogí a ella y quedé suspenso y horriblemente sorprendido.

Cavor se agachó y empezó a gritarme con voz chillona que tuviera cuidado. Me había olvidado de que en la Luna la gravedad es seis veces más débil que en la Tierra. Pero la propia realidad hacía que lo recordase.

Teniendo precaución y conteniendo mis movimientos logré subir a la cumbre de la peña y andando como un reumático me puse al sol junto a Cavor. Nuestro proyectil estaba a unos treinta pies de nosotros sobre un montón de nieve que se derretía.

— Mire usted — dije, volviéndome hacia Cavor.

Pero Cavor había desaparecido.

Me sobrecogí un instante por esta sorpresa y después, queriendo ver lo que había allá del borde de la peña, di un paso hacia adelante, sin acordarme de que estaba en la Luna. El esfuerzo que hice era el necesario para avanzar un metro en la Tierra, pero aquí fueron seis los que avancé, con lo cual fui a parar cinco metros más allá del borde de la peña.

Sentí la misma impresión que cuando en sueños se cae uno a un abismo y va por el espacio. Cuando se cae una persona en la Tierra, durante el primer segundo baja 5 metros, en la Luna solamente baja 80 centímetros en este mismo tiempo. Por esto yo descendí planeando suavemente hasta una profundidad de cerca de nueve metros. Esta caída me pareció larga, aunque duraría unos tres segundos. Volé por el aire y, después de caer como una pluma, me encontré hundido hasta las rodillas en un montón de nieve y en el fondo de un valle pedregoso.

— ¡Cavor! — grité, mirando a mi alrededor.

No se veían huellas de él por ninguna parte.

— ¡Cavor! — volví a gritar más fuerte.

De repente lo vi. Se estaba riendo y me hacía señas desde un peñasco pelado que había a unos veinte metros de mí. Sus palabras no se podían oir, pero por los gestos comprendí lo que quería. Me invitaba a dar un salto y a reunirme con él.

Dudé un poco, porque la distancia me pareció demasiado grande. Después pensé que si Cavor pudo dar un salto así, también lo podía dar yo.

Di un paso atrás y salté con todas mis fuerzas. Salí por el aire como una flecha y parecía que nunca iba a llegar abajo. Fue un vuelo fantástico, monstruoso como los que se sueñan, pero al mismo tiempo admirable.

El salto resultó demasiado grande y yo pasé volando sobre la cabeza de Cavor".

DISPAROS EN LA LUNA

El episodio siguiente está tomado de una novela del insigne inventor soviético K. E. Tsiolkovski titulada "En la Luna". Este episodio nos ayudará a comprender las condiciones del movimiento bajo la acción de la gravedad. En la Tierra la atmósfera dificulta el movimiento de los cuerpos y oculta las leyes simples de la caída de los cuerpos, complicándolas con otras condiciones. En la Luna no existe aire Por esto nuestro satélite sería un magnífico laboratorio para estudiar la caída de los cuerpos, si pudiéramos encontrarnos allí y dedicarnos a la investigación científica.

En el episodio que a continuación reproducimos, los dos interlocutores se hallan en la Luna y quieren investigar cómo se moverán allí las balas disparadas con una escopeta.

"—¿Funcionará aquí la pólvora?

Por qué no. Los explosivos en el vacío deben poner de manifiesto sus propiedades con más fuerza aún que en el aire, puesto que este último lo único que hace es dificultar su explosión. En cuanto al oxígeno, no les hace falta. Dentro de ellos mismos hay la cantidad suficiente.

— Colocaré la escopeta verticalmente para que la bala caiga más cerca y sea más fácil encontrarla después del disparo.

Hizo fuego y se sintió un ruido muy débil* y una pequeña sacudida del suelo.

— ¿Dónde estará el taco? Debía haber caído por aquí cerca.

— El taco salió disparado junto con la bala y lo más probable es que no se separe de ella, puesto que en la Tierra es la atmósfera la que le impide seguir al plomo; aquí una pluma cae y vuela con la misma rapidez que una piedra. Coge una pluma de ésas que salen de la almohada y yo cogeré esta bola de hierro colado. Tú podrás tirar tu pluma y atinar a un blanco, aunque se encuentre bastante alejado, con la misma facilidad que yo con mi bola. Yo puedo, si el peso es pequeño, lanzar la bola a 400 metros y tú puedes tirar tu pluma a la misma distancia; claro que con ella no le harás daño a nadie y al lanzarla te parecerá que no has tirado nada. Bueno, tiremos nuestros proyectiles arrojadizos con todas nuestras fuerzas — que no son muy dispares — a un mismo blanco; a aquella piedra de granito rojo ...

La pluma adelantó un poco a la bola de hierro colado. Parecía que la había arrastrado un fuerte remolino.

¿Qué pasa? Desde que disparamos la escopeta han transcurrido tres minutos y aún no ha regresado la bala.

Espera dos minutos más y verás como vuelve.

Efectivamente, al cabo del tiempo señalado sentimos una pequeña sacudida en el suelo y vimos cómo el taco botaba no muy lejos.

— ¡Cuánto tiempo estuvo volando la bala! ¿A qué altura tenía que remontarse?

— A unos setenta kilómetros. Puede alcanzar esta altura porque la gravedad es pequeña y porque no existe aire que le ofrezca resistencia".

Comprobémoslo. Si consideramos que la velocidad de la bala en el momento de salir del cañón es solamente de 500 m por segundo (en comparación con las armas modernas esta velocidad es vez y media menor que la real), la altura a que subiría en la *Tierra, si no existiera la atmósfera,* sería:

$$h=\frac{v^2}{2g}=\frac{500^2}{2\cdot 10}=12\,500 \text{ m},$$

es decir, 12,5 km. En la Luna, donde la gravedad es 6 veces menor, en lugar de g hay que tomar 10/6; por consiguiente, la bala deberá alcanzar la altura de

$$12\,500\cdot 6=75 \text{ km}.$$

* En la Luna el sonido se transmite a través del suelo y del cuerpo de las personas, y no a través del aire, puesto, que allí no lo hay.

Sobre lo que ocurre en las profundas entrañas de nuestro planeta se sabe todavía muy poco. Unos suponen que debajo de una corteza dura de cien kilómetros de espesor comienza una masa líquida incandescente. Otros consideran que todo el globo terráqueo se ha solidificado hasta el mismo centro. Esta es una cuestión difícil de resolver. Hasta ahora el pozo más profundo tiene 7,5 km de hondura y la mina más honda a que ha bajado el hombre tiene una profundidad de 3 300 m*, mientras que el radio de la Tierra es igual a 6400 km. Si a través de nuestro planeta se pudiera perforar un pozo de parte a parte, siguiendo uno de sus diámetros, estos problemas estarían resueltos. Pero la técnica más moderna está muy lejos aún de poder realizar semejante empresa, aunque todos los pozos perforados en la corteza terrestre, tomados conjuntamente, alcanzarían una longitud mayor que el diámetro de nuestro planeta.

En el siglo XVIII soñaban con hacer un túnel a través de la Tierra el matemático Maupertuis y el filósofo Voltaire. A este proyecto, aunque en escala más modesta. se refirió también el astrónomo francés Flammarion. En esta página reproducimos el dibujo que encabezaba su artículo dedicado a este tema (fig. 46).

Hasta ahora no se ha hecho, naturalmente, nada parecido; pero aprovechemos este pozo imaginario sin fondo para ocuparnos de un problema muy interesante. ¿Qué piensa el lector que le ocurriría si se cayese en un pozo sin fondo de este tipo (olvidando por ahora la resistencia del aire)? Estrellarse en el fondo no podría, puesto que no existe fondo, pero, ¿dónde pararía?

* La mina de oro de Boksburg (Transvaal, Africa del Sur), con la particularidad de que la entrada del pozo se encuentra a 1 600 m de altura sobre el nivel del mar, es decir, la profundidad de la mina con respecto al nivel del mar es solamente de 1 700 m. (*N. de la R.*)

Fig. 46. Si la Tierra se taladrara por su diámetro ...

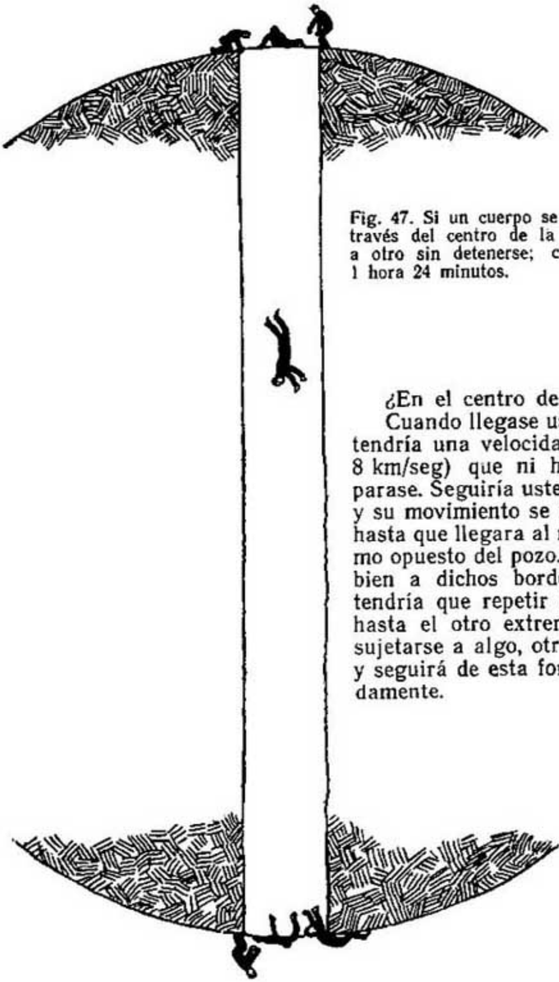


Fig. 47. Si un cuerpo se cayera en un pozo practicado a través del centro de la Tierra oscilaría de un extremo a otro sin detenerse; cada oscilación completa duraría 1 hora 24 minutos.

¿En el centro de la Tierra? No.

Cuando llegase usted a este centro, su cuerpo tendría una velocidad tan enorme (de cerca de 8 km/seg) que ni hablar se puede de que se parase. Seguiría usted adelante, como disparado, y su movimiento se iría retardando poco a poco hasta que llegara al nivel de los bordes del extremo opuesto del pozo. Aquí tendría que agarrarse bien a dichos bordes, porque de lo contrario tendría que repetir el paseo a través del pozo hasta el otro extremo. Y si tampoco consigue sujetarse a algo, otra vez se hundirá en el pozo y seguirá de esta forma balanceándose indefinidamente.

La Mecánica enseña que, en estas condiciones (si se desprecia la resistencia del aire), el cuerpo debe oscilar, de un lado a otro y viceversa, constantemente*.

¿Cuánto duraría una de estas oscilaciones? El recorrido de ida y vuelta duraría 84 minutos y 24 segundos, es decir, en números redondos, hora y media.

"Así ocurriría — continúa C. Flammarion —, si el pozo estuviera abierto por el eje de la Tierra, desde un polo a otro. Pero si se traslada el punto de partida a cualquier otra latitud — a Europa, Asia o Africa —, hay que tener en cuenta la influencia que ejerce la rotación de la Tierra. Sabemos que cada punto de la superficie terrestre recorre en el ecuador 465 m por segundo, y a la altura de París, 300 m. Como la velocidad circular *aumenta* al alejarse del eje de rotación, una bola de plomo, por ejemplo, dejada caer en un pozo, no caerá verticalmente, sino que se desviará un poco hacia el este. Si el pozo sin fondo se hace en el ecuador, su anchura deberá ser bastante grande, o el pozo estar muy inclinado, puesto que el cuerpo que caiga en él desde la superficie de la Tierra se desviará mucho hacia el este, con respecto a su centro.

Si la boca de entrada del pozo se encontrará en una de las mesetas de América del Sur, a una altura de dos kilómetros sobre el nivel del mar, y el extremo opuesto del túnel estuviera al nivel del océano, la persona que por descuido se cayese en la boca americana, al llegar al otro extremo llevaría tanta velocidad que se elevaría dos kilómetros sobre la superficie.

Si los dos extremos del pozo se encontraran al nivel del océano, se le podría dar una mano a la persona caída en el momento en que apareciera por una de las bocas, puesto que su velocidad sería igual a cero. Pero en el caso anterior, por el contrario, habría que apartarse por temor a un viajero tan extraordinariamente precipitado".

UN CAMINO IDEAL

Hace tiempo, en San Petersburgo (hoy Leningrado) apareció un folleto que tenía un título tan extraño como el siguiente: "Ferrocarril subterráneo automotriz entre San Petersburgo y Moscú. Novela fantástica en tres capítulos, incompletos por ahora". El autor de este folleto. A. A. Rodnig, propone un proyecto ingenioso que puede interesar a los aficionados a las paradojas físicas.

* La resistencia del aire haría que las oscilaciones se fueran amortiguando paulatinamente y al final la persona se detendría en el centro de la Tierra.

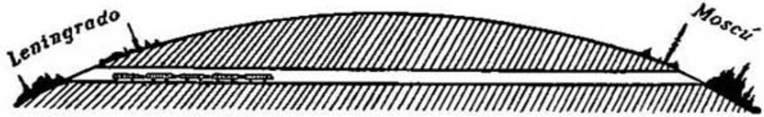


Fig. 48. Si se hiciera un túnel entre Leningrado y Moscú, los trenes circularían por él en ambas direcciones por su propio peso, sin necesidad de locomotoras.

El proyecto consiste en "hacer un túnel de 600 km de longitud para unir entre sí las dos capitales, siguiendo una línea subterránea completamente recta. De esta forma tendríamos la posibilidad de realizar el viaje en línea recta, y no siguiendo vías curvas como hasta ahora". (El autor quiere decir que todos los ferrocarriles se amoldan a la curvatura de la superficie de la Tierra y, por lo tanto, forman arcos, mientras que el túnel que él ha proyectado sigue una línea recta, es decir, una cuerda).

Si se pudiera hacer este túnel, tendría una propiedad magnífica que no tiene ningún ferrocarril del mundo. Esta propiedad consiste en que cualquier carruaje *se movería por él de por sí solo*. A propósito de esto, recordemos nuestro pozo perforado atravesando la Tierra. El túnel Leningrado-Moscú sería un pozo semejante a aquél, pero perforado no por el diámetro, sino por la cuerda. Es verdad que mirando la fig. 48 puede parecer que el túnel es horizontal y que, por consiguiente, no hay ninguna causa para que podamos viajar por él a costa de la gravedad. Pero esto es solamente una ilusión óptica. Si trazamos mentalmente los radios de la esfera correspondientes a los extremos del túnel (la dirección del radio es la de la plomada), veremos que éste no está hecho en dirección perpendicular a la de la plomada, es decir, horizontal, sino inclinada.

En un pozo inclinado como éste todo cuerpo debe rodar hacia adelante y hacia atrás atraído por la gravedad y presionando continuamente sobre el fondo. Si dentro de este túnel se ponen vías, los vagones de ferrocarril podrán desplazarse por él solos; el peso de los propios vagones sustituirá a la tracción de la locomotora. Al principio este tren se moverá despacio. Pero su velocidad irá en aumento cada segundo y pronto se hará insospechadamente grande, de manera que el aire estorbará mucho su avance. Pero olvidémonos temporalmente de este lamentable obstáculo, que impide la realización de tantos proyectos seductores, y sigamos adelante con nuestro tren. En la mitad del túnel el tren tendrá una velocidad mucho mayor que la de una bala de cañón, con la que podrá llegar casi hasta el otro extremo. Si no hubiera rozamiento, tampoco existiría este "casi"; el tren, sin locomotora, haría perfectamente el recorrido desde Leningrado hasta Moscú. El viaje en una dirección duraría, según los cálculos, lo mismo que en el caso de la caída al pozo perforado siguiendo el diámetro de la Tierra, es decir, 42 minutos y 12 segundos. Aunque parezca extraño, la duración no depende de la longitud del túnel. El viaje por el túnel Moscú-Leningrado duraría lo mismo que por un túnel Moscú-Vladivostok o Moscú-Melbourne*.

Lo mismo ocurriría con cualquier otro carruaje, fuera una vagoneta, un coche, un automóvil, etc. En realidad sería un camino ideal que, permaneciendo inmóvil, haría que todos los carruajes marchasen por él, de un extremo al otro, con extraordinaria rapidez.

¿COMO SE HACEN LOS TUNELES?

En la fig. 49 se muestran tres procedimientos de trazar túneles, ¿por cuál de los tres se consigue que el túnel sea horizontal?

Ni por el primero ni por el tercero. Por el de en medio, en que el túnel tiene forma de arco y en todos sus puntos forma ángulos rectos con la dirección de las líneas verticales (es decir, con los radios de la Tierra). Este es el túnel horizontal; su curvatura es igual que la de la superficie de la Tierra.

Los grandes túneles se hacen generalmente como indica el dibujo superior de la fig. 49, es decir, siguiendo las líneas rectas

* También se puede demostrar otra propiedad muy interesante del pozo sin fondo que consiste en que la duración de cada oscilación no depende de las *dimensiones* del planeta, sino exclusivamente de su *densidad*.

Fig. 49. Tres procedimientos de hacer un túnel a través de una montaña.

tangentes a la superficie de la Tierra en los puntos extremos del túnel. Los túneles de este tipo *se elevan* al principio un poco y luego *descienden*. Tienen la ventaja de que el agua no se acumula en ellos, sino que corre hacia los extremos. Si el túnel se hiciera estrictamente horizontal y fuera largo, tendría forma de arco. El agua no tendría a salir de él, puesto que en cada uno de sus puntos se encontraría en equilibrio. Cuando un túnel de éstos tiene más de 15 km de largo (el del Simplón tiene 20 km), mirando desde un extremo no se ve el otro, porque la visual se topa con el techo, debido a que el punto medio del túnel se eleva más de 4 m sobre el nivel de sus puntos extremos.

Finalmente, si el túnel se hace siguiendo una línea recta que una los puntos extremos, presentará un pequeño *declive* desde sus bocas hacia el centro. El agua en vez de salir de él se acumulará en su centro, que será la parte más baja. Pero desde una entrada podremos ver la otra. Los dibujos adjuntos facilitan la comprensión de lo expuesto*.

* De lo dicho se deduce que todas las líneas horizontales son *curvas*, mientras que las verticales son rectas.

Capítulo 5

VIAJE EN UN PROYECTIL DE CAÑON

Como resumen de nuestras charlas sobre las leyes del movimiento y de la gravedad, vamos a analizar el viaje fantástico a la Luna que de una manera tan amena relató Julio Verne en sus novelas "De la Tierra a la Luna" y "Alrededor de la Luna". Ustedes recordarán, naturalmente, que los miembros del Club de los cañones de Baltimore, condenados a la inactividad después de terminar la guerra en América del Norte, decidieron fundir un cañón colosal, cargarlo con un proyectil hueco enorme tripulado por algunos pasajeros, y por medio de un disparo lanzar este vagón-proyectil a la Luna.

Esta idea, ¿es realmente fantástica? Ante todo, ¿se le puede comunicar a un proyectil la velocidad suficiente para que abandóne para siempre la superficie de la Tierra?

EL MONTE DE NEWTON

Concedamos la palabra al genial descubridor de la ley de la gravitación universal, a Newton. En sus "Principios matemáticos de la Física" dice:*

"Cuando tiramos una piedra la acción de la gravedad la desvía de su camino rectilíneo y la obliga a caer en la superficie de la Tierra describiendo una línea curva. Si lanzamos la piedra con más velocidad caerá más lejos. Por lo tanto, puede ocurrir que describa un arco de diez, cien, mil millas y que, finalmente, se salga de los límites de la Tierra y no vuelva más. Supongamos que *AFB* (fig. 50) representa la superficie de la Tierra, que *C* es su centro y que *UD, UE, UF y UG* son las curvas que describe un cuerpo lanzado horizontalmente desde un monte muy alto, con una velocidad cada vez mayor. La resistencia de la atmósfera no la tendremos en cuenta, es decir, supondremos que no existe en absoluto. Cuando la velocidad inicial es pequeña, el cuerpo describe la curva *UD*, cuando dicha velocidad es mayor describirá

* La libertad con que se ha hecho la traducción de esta cita tiene por objeto facilitar su comprensión.

Fig. 50. Así deberían caer las piedras que se lanzaran horizontalmente y con una velocidad enorme desde la cumbre de una montaña.

la curva *UE* y a velocidades todavía mayores recorrerá las curvas *UF* y *UG*. A una velocidad determinada el cuerpo dará la vuelta a la Tierra y volverá al vértice del monte de donde fue lanzado. Como, en este caso, la velocidad del cuerpo al regresar a su punto de partida no será *menor* que al principio, este cuerpo continuará moviéndose por la misma curva".

Si en este monte imaginario hubiera un cañón, un proyectil lanzado por él a una velocidad determinada no volvería a caer nunca sobre la Tierra, sino que seguiría dando vueltas alrededor de ella sin detenerse. Por medio de un cálculo bastante sencillo* se puede hallar que esto deberá ocurrir cuando el proyectil tenga una velocidad de cerca de 8 km por segundo. En otras palabras, si un cañón lanza un proyectil con la velocidad inicial de ocho kilómetros por segundo, este proyectil abandonará para siempre la superficie de la Tierra y se convertirá en satélite de nuestro planeta. Su velocidad será entonces 17 veces mayor que la de cualquier punto del ecuador y dará una vuelta completa a la Tierra en 1 hora y 24 minutos. Si al proyectil se le comunica una velocidad mayor, girará alrededor de la Tierra, pero ya no describirá una circunferencia, sino una elipse más o menos alargada, y se alejará del planeta hasta una distancia enorme. Una velocidad inicial todavía mayor puede hacer que el proyectil se aleje para siempre de la Tierra en el espacio cósmico. Esto deberá suceder cuando la velocidad inicial sea, aproximadamente, de 11 km por segundo. (En todos estos casos se tienen en cuenta proyectiles que se mueven en un espacio *sin aire,* no en la atmósfera.)

Sabiendo esto, veamos si es posible realizar el viaje a la Luna con los medios que proponía Julio Verne.

* Véase "*Física Recreativa*" libro I, cap. II.

Los cañones modernos comunican a sus proyectiles velocidades que no pasan de dos kilómetros en el primer segundo. Esto es, cinco veces menores que la necesaria para que un cuerpo pueda volar hacia la Luna. Los personajes de la novela pensaban que construyendo un cañón colosal y cargándolo con una cantidad enorme de explosivos podrían conseguir la velocidad suficiente para lanzar el proyectil a la Luna.

EL CAÑON FANTASTICO

Ya están los miembros del Club de los cañones fundiendo su colosal cañón, de un cuarto de kilómetro de largo, enterrado verticalmente. Al mismo tiempo se hace el enorme proyectil, en cuyo interior se encuentra el camarote para la tripulación. Este proyectil pesa 8 t. El cañón se carga con 160 t de algodón pólvora. Después del disparo el proyectil, si creemos al novelista, adquiere una velocidad de 16 km por segundo, pero debido al rozamiento con la atmósfera esta velocidad disminuye hasta 11 km. De esta forma, el proyectil de Julio Verne se encontrará fuera de la atmósfera con una velocidad suficiente para llegar a la Luna.

Esto es lo que dice la novela. Veamos lo que dice la Física.

El punto vulnerable del proyecto de Julio Verne no es generalmente el que despierta las sospechas del lector. En primer lugar, se puede demostrar (yo así lo he hecho en el libro "Viajes Interplanetarios") que los cañones a base de pólvora no podrán nunca comunicar a los proyectiles una velocidad mayor de 3 km por segundo.

Julio Verne tampoco calculó bien la resistencia del aire, que a una velocidad tan enorme debe ser muy grande y capaz de cambiar por completo el cuadro del vuelo. Pero aparte de esto existen motivos muy serios para no estar de acuerdo con el proyecto de vuelo a la Luna en un proyectil de cañón.

El principal motivo de preocupación es la suerte de los propios pasajeros. Esto no quiere decir que les amenace un peligro durante el vuelo de la Tierra a la Luna. Si consiguieran estar vivos en el momento de salir del alma del cañón, en adelante no tendrían nada que temer. La enorme velocidad con que el vagón y sus pasajeros surcarían el espacio sería para éstos tan inofensiva como lo es para los habitantes de la Tierra la velocidad, aún mayor, con que ésta se mueve alrededor del Sol.

Los momentos más peligrosos para nuestros viajeros serían las centésimas de segundo durante las cuales el vagón proyectil avanza dentro el alma del cañón. Porque durante este intervalo tan pequeño de tiempo la velocidad con que cada pasajero se mueve dentro del cañón debe aumentar desde cero hasta 16 km/seg. Por eso es comprensible la inquietud con que esperaban el disparo. Barbicane tenía mucha razón cuando aseguraba que el momento en que el proyectil sea disparado será tan peligroso para sus tripulantes como si en vez de estar dentro estuvieran delante de él.

Efectivamente, en el momento del disparo, la plataforma inferior del camarote dará un golpe a los pasajeros, desde abajo, cuya fuerza será la misma que tendría el choque del proyectil con cualquier cuerpo que encontrase en su camino. Los personajes de la novela le concedieron demasiado poca importancia a este peligro, pensando que en el peor de los casos sufrirían un aflujo de sangre a la cabeza.

Pero el asunto es mucho más serio. El proyectil avanza por el alma del cañón aceleradamente, su velocidad aumenta por la constante presión de los gases que se producen durante la explosión. En el transcurso de una fracción insignificante de segundo esta velocidad aumenta desde 0 hasta 16 km/seg. Supongamos, para simplificar, que este incremento de la velocidad se produce uniformemente. En este caso, la aceleración, necesaria para hacer que el proyectil adquiera en un lapso de tiempo tan insignificante la velocidad de 16 km/seg, alcanza, en números redondos, la cifra de 600 km por segundo cada segundo (el cálculo se da en las págs. 94-95).

El significado fatal de esta cifra se comprende perfectamente si recordamos que la aceleración ordinaria de la gravedad en la superficie de la Tierra es solamente de 10 m por segundo cada segundo*. De aquí se deduce, que cada objeto que se encuentre dentro del proyectil en el momento del disparo deberá ejercer una presión sobre el fondo del camarote que será 60 000 veces mayor que su propio peso. En otras palabras, los pasajeros se sentirían como si fueran varias decenas de millares de veces más pesados. Esta presión tan colosal los aplastaría en el acto. Nada más que el sombrero de copa de míster Barbicane pesaría en el

* Puedo añadir, que la aceleración de un automóvil de carreras al comenzar su rápido movimiento no excede de 2 ó 3 m por segundo cada segundo, y la aceleración de un tren, al salir suavemente de la estación, es de 1 m por segundo cada segundo.

momento del disparo unas 15 toneladas (¡el peso de un vagón de ferrocarril cargado!). Este sombrerito sería mas que suficiente para aplastar a su dueño.

Es verdad que en la novela se describen algunas medidas tomadas para amortiguar el golpe. La bala se supone provista de amortiguadores de muelles y de un doble fondo lleno de agua. Esto hace que la duración del golpe sea un poco mayor y, por consiguiente, que el aumento de la velocidad sea algo más lento. Pero las fuerzas que actúan son tan enormes, que la ventaja que se obtiene con estos dispositivos resulta irrisoria. La fuerza que oprime a los pasajeros contra el suelo disminuiría insensiblemente y, en fin de cuentas, ¡qué más da morir aplastado por un sombrero de 15 toneladas o por uno de 14!

¿COMO SE PUEDE DEBILITAR LA SACUDIDA?

La Mecánica enseña cómo se puede suavizar la rapidez fatal con que aumenta la velocidad.

Esto se puede conseguir *alargando el cañón*. Pero si se quiere que en el momento del disparo la fuerza de la "gravedad" artificial, dentro del proyectil, sea igual a la gravedad ordinaria en la Tierra, el alargamiento del cañón tiene que ser muy grande. Un cálculo aproximado demuestra que para esto habría qué hacer un cañón que tuviera, ni más ni menos, que ... ¡6 000 km! En otras palabras, el cañón de Julio Verne debería llegar hasta el mismo centro de la Tierra. En este caso los pasajeros podrían sentirse libres de molestias, puesto que a su peso normal se sumaría otro igual aparente, debido al aumento paulatino de la velocidad, que haría que se sintiesen nada más que dos veces más pesados.

El organismo humano puede soportar, durante cortos espacios de tiempo, aumentos de la gravedad de hasta varias veces su peso. Cuando nos deslizamos por una pendiente de hielo en un trineo y cambiamos de dirección rápidamente, hay un instante en que nuestro peso aumenta considerablemente, es decir, nuestro cuerpo se aprieta contra el trineo más que de ordinario. Los aumentos de dos o tres veces de peso se soportan relativamente bien. Admitiendo que el hombre puede aguantar, sin perjuicio para su salud, un breve aumento de la gravedad de hasta diez veces su peso (ésta es la sobrecarga que experimentaron los cosmonautas al despegar. — *La Red.*), tendremos que será suficiente hacer un cañón que tenga 600 km de largo "solamente". Pero esto no es un consuelo, puesto que la fabricación de un artefacto semejante supera nuestras posibilidades técnicas.

Estas son las condiciones en que tendría sentido la realización del proyecto de Julio Verne de hacer un viaje a la Luna en un proyectil de cañón*.

PARA LOS AMIGOS DE LAS MATEMATICAS

Entre los lectores de este libro estoy seguro que habrá algunos que quieran comprobar los cálculos de que hemos hablado en el párrafo anterior. Aquí reproducimos estos cálculos. Pero advertimos que son aproximados solamente, ya que se basan en la suposición de que el proyectil avanza dentro del ánima del cañón con movimiento uniformemente acelerado (en realidad este aumento de la velocidad no es uniforme).

En estos casos hay que utilizar las dos fórmulas del movimiento uniformemente acelerado siguientes:

la de la velocidad v, que al cabo de t segundos será igual a at, donde a es la aceleración:

$$v=at;$$

y la del camino S recorrido durante t segundos, que viene determinado por la fórmula

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

Con estas fórmulas hallamos, en primer lugar, la aceleración del proyectil mientras se deslizaba por el alma del cañón.

La novela nos informa de que la parte del cañón no ocupada por la carga tenía una longitud de 210 m; éste es el camino S recorrido por el proyectil.

También conocemos la velocidad final $v=16\,000$ m/seg. Estos datos (S y v) nos permiten hallar t, es decir, el tiempo que el proyectil tarda en recorrer el ánima del cañón (considerando que lo hace con movimiento uniformemente acelerado). De aquí tenemos que:

$$v=at=16\,000,\quad 210=S=\frac{at\cdot t}{2}=\frac{16\,000\cdot t}{2}=8\,000\ t,$$

* Cuando Julio Verne describió las condiciones que se daban dentro del proyectil en vuelo, se olvidó de un factor muy importante. De esto se habla en el libro primero de "Física Recreativa". El novelista no tuvo en cuenta que, después del disparo, durante todo el viaje, los objetos que hubiera dentro del proyectil se harían completamente ingrávidos, ya que la gravedad comunicaría al proyectil y a todos los cuerpos que iban en él la misma aceleración (véase, también, más adelante, el artículo titulado "El capítulo que le falta a la novela Julio Verne").

de donde $t=\frac{210}{8\,000}$ =aproximadamente a $\frac{1}{40}$ seg, es decir, el proyectil tarda en recorrer el cañon ... ¡ $^1/_{40}$ segundos!

Poniendo $t=\frac{1}{40}$ en la fórmula $v=at$, tenemos:

$$16\,000=\frac{1}{40}\,a, \text{ de donde } a=640\,000 \text{ m/seg}^2.$$

Esto quiere decir que la aceleración del proyectil mientras recorría el cañón fue de 640 000 m/seg², es decir, 64 000 veces mayor que la aceleración de la gravedad. ¿Qué longitud debería tener el cañón para que la aceleración del proyectil fuera nada más que 10 veces mayor que la aceleración de los cuerpos que caen (es decir, igual a 100 m/seg²)?

Este problema es el inverso del que acabamos de resolver. Los datos son: $a=100$ m/seg² y $v=11\,000$ m/seg (esta velocidad es suficiente si no existe la resistencia de la atmósfera).

Por la fórmula $v=at$ tenemos: $11\,000=100\,t$, de donde $t=110$ seg.

Por la fórmula $S=\frac{at^2}{2}=\frac{at\cdot t}{2}$ obtenemos que la longitud del cañón deberá ser igual a

$$\frac{11\,000\cdot 110}{2}=605\,000 \text{ m, es decir, } 605 \text{ km.}$$

Estos cálculos dan las cifras que destruyen planes tan seductores como los que tenían los héroes de Julio Verne*.

* Los razonamientos y cálculos que se hacen este capítulo son justos. El problema de los viajes del hombre a la Luna y a otros planetas es evidente que se resolverá por medio de cohetes.
(N. de la R.)

Capítulo 6

PROPIEDADES DE LOS LIQUIDOS Y LOS GASES

UN MAR EN EL QUE NO SE PUEDE AHOGAR NADIE

Este mar existe y se encuentra en un país que conoce la humanidad desde los tiempos más remotos. Se trata del célebre Mar Muerto de Palestina. Sus aguas son extraordinariamente saladas, hasta tal punto que en él no puede existir ningún ser vivo. El clima caluroso y seco de Palestina hace que se produzca una evaporación muy intensa en la superficie del mar. Pero se evapora agua pura; mientras que la sal se queda en el mar y va aumentando la salinidad de sus aguas. Esta es la razón de que las aguas del Mar Muerto contengan no un 2 ó 3 por ciento (en peso) de sal, como la mayoría de los mares y océanos, sino un 27 o más por ciento. Esta salinidad aumenta con la profundidad. Por lo tanto, una cuarta parte del contenido del Mar Muerto está formada por la sal que hay disuelta en el agua. La cantidad total de sal que hay en este mar se calcula en 40 millones de toneladas.

La gran salinidad del Mar Muerto determina una de sus peculiaridades, que consiste en que sus aguas son mucho más pesadas que el agua de mar ordinaria. Hundirse en estas aguas es imposible. El cuerpo humano es más liviano que ellas.

El peso de nuestro cuerpo es sensiblemente menor que el de un volumen igual de agua muy salada y, por consiguiente, de acuerdo con la ley de la flotación, el hombre no se puede hundir en el Mar Muerto, al contrario, flota en su superficie lo mismo que un huevo en agua salada (aunque en el agua dulce se hunde).

Mark Twain estuvo en este lago-mar y después escribió humorísticamente las extrañas sensaciones que él y sus compañeros experimentaron bañándose en sus aguas:

"Fue un baño muy divertido. No nos podíamos hundir. Se podía uno tumbar a lo largo sobre la espalda y cruzar los brazos sobre el pecho y la mayor parte del cuerpo seguía sobre el agua. En estas condiciones se podía levantar la cabeza por completo. Se puede estar tumbado cómodamente sobre la espalda, levantar las rodillas hasta el mentón y abrazarlas con las manos. Pero en este caso se da la vuelta, porque la cabeza resulta más pesada. Si se pone uno con la cabeza hundida y los pies para arriba, des-

Fig. 51. Un bañista en el Mar Muerto (reproducción de una fotografía).

de la mitad del pecho hasta la punta de los pies sobresale del agua; claro que en esta posición no se puede estar mucho tiempo. Si se intenta nadar de espaldas no se avanza casi nada, ya que las piernas no se hunden en el agua y sólo los talones encuentran apoyo en ella. Si se nada boca abajo no se va hacia adelante, sino hacia atrás. En el Mar Muerto el equilibrio del caballo es muy inestable, no puede ni nadar ni estar derecho, inmediatamente se tumba de costado".

En la fig. 51 se puede ver un bañista que descansa comodísimamente sobre las aguas del Mar Muerto. El gran peso específico del agua le permite estar en esta posición, leer el libro y protegerse con la sombrilla de los ardientes rayos del Sol.

El agua de Kara-Bogas-Gol (golfo del Mar Caspio) * tiene estas mismas propiedades y las del lago Eltón no son menos saladas, puesto que contienen un 27% de sal.

Algo parecido sienten los enfermos que toman baños salinos. Cuando la salinidad del agua es muy grande, como ocurre, por ejemplo, con las aguas minerales de Staraia Russa, los enfermos tienen que hacer no pocos esfuerzos para mantenerse en el fondo

* El peso específico de las aguas del golfo Kara-Bogas-Gol es 1,18. "En un agua tan densa como ésta se puede nadar sin ningún esfuerzo, y es imposible hundirse sin faltar al principio de Arquímedes" — señalaba refiriéndose a estas aguas el investigador A. D. Pelish.

del baño. Yo he oído como una señora que tomó los baños de Staraia Russa se quejaba de que el agua "la echaba materialmente fuera del baño". Según ella la culpa de esto la tenía ... la administración del balneario.

El grado de salinidad de las aguas de los distintos mares oscila un poco y a esto se debe que los barcos no se sumerjan en ellas hasta un mismo sitio. Algunos de nuestros lectores habrán visto el signo que llevan los barcos cerca de la línea de flotación, llamado "marca de Lloyd", que sirve para indicar el nivel límite de la línea de flotación en aguas de distinta densidad. Por ejemplo, la marca representada en la fig. 52 indica los niveles límite de la línea de flotación siguientes:

en agua dulce (Fresh Water) .... FW
en el Océano Indico (India Summer) .... IS
en agua salada en verano (Summer) .... S
en agua salada en invierno (Winter) .... W
en el Atlántico del norte en invierno (Winter North Atlantik) .... WNA

Antes de terminar este artículo quiero advertir que existe una variedad de agua que aún estando pura, es decir, sin contener otros cuerpos, es sensiblemente más pesada que la ordinaria. Este agua tiene un peso específico de 1,1, es decir, es un 10% más pesada que la común, por consiguiente, en una piscina con agua de este tipo lo más probable es que no se ahogue nadie, aunque los que se bañen no sepan nadar. Este agua se llama agua "pesada" y su fórmula química es D_2O (el hidrógeno que entra en su composición está formado por átomos dos veces más pesados que los del hidrógeno ordinario. Este hidrógeno se designa con la letra D). El agua "pesada" se encuentra disuelta en el agua común en cantidades muy pequeñas. Un cubo de agua potable contiene cerca de 8 g de agua "pesada".

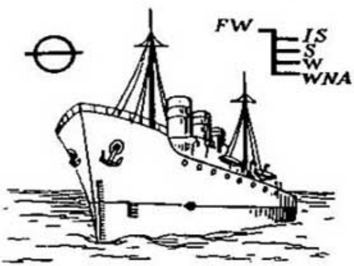


Fig. 52. Disco de carga máxima en el costado de un buque. Las marcas se hacen al nivel de la línea de flotación. Para que se vean mejor se muestran aparte aumentadas. El significado de las letras se explica en el texto.

El agua pesada de fórmula D_2O (hay 17 tipos de agua pesada, cuyas composiciones son distintas) se obtiene actualmente casi pura, puesto que la cantidad de agua ordinaria que hay en ella constituye aproximadamente un 0,05%. Este agua se emplea mucho en la técnica atómica, especialmente en los reactores atómicos. Se obtiene en grandes cantidades del agua ordinaria por procedimientos industriales.

¿COMO FUNCIONA UN ROMPEHIELOS?

Si cuando tomamos el baño, antes de abandonar la bañera, destapamos el agujero de desagüe y seguimos tumbados en el fondo, notaremos que a medida que baja el agua y que nuestro cuerpo va saliendo de ella nos hacemos más pesados. De esta forma podemos convencernos de que el peso que pierde un cuerpo al sumergirse en el agua (recordemos qué ligeros nos sentimos en el agua) vuelve a reaparecer en cuanto dicho cuerpo se encuentra fuera de ella. Cuando una ballena hace involuntariamente este experimento, quedándose varada durante una bajamar, las consecuencias son fatales para ella. Resulta aplastada por su monstruoso peso. No es, pues, casual que las ballenas vivan en el elemento acuático, cuyo empuje las libra de la acción desastrosa de la gravedad.

Lo que acabamos de decir guarda estrecha relación con el encabezamiento del presente artículo. El funcionamiento del rompehielos se basa en este mismo principio físico. La parte del buque sacada del agua deja de estar equilibrada por el empuje de ésta y adquiere su peso "en seco". No hay que creer que los rompehielos cortan el hielo sobre la marcha, ejerciendo sobre él una presión continua con su proa, es decir, con la roda. Así funcionan los *cortahielos*. Pero este procedimiento sirve únicamente cuando el hielo tiene un espesor relativamente pequeño.

Los verdaderos rompehielos marítimos, como, por ejemplo, los célebres en su tiempo "Krasin" y "Ermak" o los modernos, como el rompehielos atómico "Lenin", funcionan de otra forma. Estos rompehielos tienen unas máquinas muy poderosas que les permiten montar sobre la superficie del hielo toda la parte de la proa, que para esto precisamente se hace muy sesgada debajo del agua. Cuando la proa del barco sale del agua recobra todo su peso y esta enorme carga (que en el "Ermak", por ejemplo, era de 800 t) presiona sobre el hielo y lo rompe. Los rompehielos tienen generalmente unas cisternas especiales a proa, que llenas de agua ("lastre líquido") sirven para intensificar la acción rompedora del buque.

Por este procedimiento trabaja el rompehielos mientras que el espesor del hielo no pasa de medio metro. Los hielos más poderosos se vencen *por percusión* del barco sobre ellos. El rompehielos retrocede, toma impulso y embiste con toda su masa el borde del hielo. En este caso lo que actúa no es el peso, sino la energía cinética del buque en movimiento. El rompehielos se transforma en una especie de proyectil de pequeña velocidad, pero de enorme masa, o en un ariete. Los bancos de hielo de varios metros de altura se rompen por la energía de los repetidos golpes que reciben de la sólida proa del rompehielos.

N. Markov, marino polar que participó en la célebre expedición del rompehielos "Sibiriakov" en el año 1932, describe el trabajo de este buque de la manera siguiente:

"Entre centenares de montañas de hielo y en medio de una capa helada continua dio comienzo la lucha del "Sibiriakov". La flecha del telégrafo de máquinas estuvo 52 horas seguidas saltando desde "atrás a toda máquina" a "adelante a toda máquina". Durante trece turnos marinos de cuatro horas el "Sibiriakov" tomaba impulso y penetraba en el hielo desmenuzándolo con su proa, se montaba en él, lo rompía y volvía a retroceder. Abrirse paso en un hielo que tenía tres cuartos de metro de espesor era difícil. A cada golpe avanzábamos en una tercera parte del casco".

La URSS posee los rompehielos más grandes y poderosos del mundo. El primer rompehielos atómico, el "Lenin", es capaz de avanzar sin detenerse por hielo de dos metros de espesor. Su reactor atómico le permite navegar varios años sin recargar combustible. En los próximos años se van a construir en la Unión Soviética otros rompehielos atómicos.

¿DONDE ESTAN LOS BARCOS HUNDIDOS?

Existe el criterio, incluso entre los hombres de mar, de que los barcos que se hunden en el océano no llegan al fondo, sino que permanecen como suspendidos entre dos aguas a cierta profundidad, donde el agua "está comprimida por la presión de las capas superiores".

Este criterio era, por lo visto, compartido por el autor de "Veinte mil leguas de viaje submarino", puesto que en uno de sus capítulos Julio Verne describe un barco hundido que se encontraba inmóvil como suspendido en el agua, y en otro, recuerda los barcos que "se pudren manteniéndose libremente dentro del agua".

¿Es verdad esta afirmación?

Al parecer existe cierto fundamento para ella, puesto que la presión del agua en las profundidades del océano alcanza realmente grados muy elevados. A la profundidad de 10 m la presión del agua es igual a 1 kg por cada centímetro cuadrado del cuerpo sumergido. A 20 m de profundidad esta presión es ya de 2 kg; a 100 m, de 10 kg y a 1 000 m, de 100 kg. La profundidad del océano es de varios kilómetros en muchos sitios y en las partes más profundas del Océano Pacífico llega a 11 km (en la fosa de las Marianas). Es fácil calcular la enorme presión que debe experimentar el agua y los objetos sumergidos en ella en estas profundidades tan grandes.

Si una botella vacía y tapada se sumerge hasta bastante profundidad y se extrae luego, resulta que la presión del agua mete el tapón dentro de la botella y ésta se llena de agua. El eminente oceanógrafo John Murray, en su libro "Océano", cuenta que se hizo el siguiente experimento: tres tubos de vidrio de distintas dimensiones, soldados por ambos extremos, se envolvieron en un lienzo, se colocaron en un cilindro de cobre con orificios para que el agua pudiera entrar libremente y fueron sumergidos hasta la profundidad de 5 km. Cuando sacaron el cilindro, el lienzo estaba lleno de una masa que parecía nieve. Esto es lo que quedó de los tubos de vidrio. Unos trozos de madera sumergidos hasta una profundidad semejante, cuando los sacaron estaban tan comprimidos que se hundían en el agua como si fueran ladrillos.

Parecía natural esperar que una presión tan monstruosa debería condensar hasta tal punto el agua en las grandes profundidades, que ni los objetos pesados se hundirían hasta el fondo, lo mismo que una pesa no se hunde en el mercurio. Pero esta opinión carece de fundamento. La experiencia demuestra que el agua, lo mismo que los demás líquidos, apenas si cede a la presión. El agua sometida a una presión de 1 kg por 1 cm^2 se comprime solamente en una fracción de su volumen igual a 1/22 000. Si se sigue aumentando la presión, la compresión por kilogramo sigue siendo aproximadamente la misma. Si se quiere que el agua tenga la densidad necesaria para que el hierro flote en ella, hay que comprimirla hasta que su volumen sea 8 veces menor. Para conseguir que su volumen se reduzca a la mitad se necesita una presión de 11 000 kg por cm^2 (si la medida de compresión antedicha se cumpliera a tan grandes presiones). Esta presión es la correspondiente a una profundidad de 110 km bajo el nivel del océano.

De aquí se deduce, que es inútil hablar de cualquier condensación sensible del agua en las profundidades de los océanos. En los sitios más profundos, la condensación del agua es igual a 1 100/22 000, es decir, de un veinteavo de su densidad normal, o sea, de un 5%*. Esto casi no puede influir en las condiciones de flotación de los diversos cuerpos, tanto más, cuando los objetos sólidos sumergidos en este agua están sometidos a esta misma presión y, por consiguiente, también se condensan.

Por esto no cabe la menor duda de que los barcos hundidos se encuentran en el fondo del océano. "Todo lo que se hunde en un vaso de agua — díce Murray —, debe irse al fondo del océano más profundo".

Yo he tenido ocasión de escuchar la siguiente objeción a lo antedicho: Si un vaso se introduce en el agua *boca abajo,* con precaución, puede quedarse en esta posición, puesto que desaloja un volumen de agua cuyo peso es igual al del vaso. Un vaso metálico más pesado puede mantenerse en una posición semejante a un nivel más bajo que el del agua, sin llegar a bajar hasta el fondo. De la misma forma parece natural que pueda quedarse entre dos aguas un crucero o un buque cualquiera que se hunda con la quilla hacia arriba. Y si en algunos compartimientos del buque queda aire encerrado, el buque se sumergirá hasta una profundidad determinada y se quedará allí. En realidad no son pocos los barcos que se van a pique invertidos y es posible que algunos de ellos no lleguen al fondo, sino que se queden suspendidos entre las oscuras profundidades del océano. Sería suficiente un leve impulso para hacer que cualquiera de estos barcos perdiera el equilibrio, diera la vuelta, se llenara de agua y se fuera al fondo, pero, ¿de dónde puede proceder un impulso en las profundidades del océano? Aquí reina eternamente el silencio y la quietud; hasta aqui no llegan ni los ecos de las tormentas.

Todos estos argumentos se basan en un error físico. *Ningún vaso puede penetrar solo* en el agua estando invertido, para que esto ocurra tiene que intervenir una *fuerza exterior,* lo mismo que para hacer que se hunda un trozo de madera o una botella vacía tapada. De la misma forma, ningún barco con la quilla hacia arriba se va a pique: en esta posición seguirá flotando en la superficie del agua. Si el buque se hunde no se puede quedar en la mitad del camino entre el nivel del mar y su fondo.

* El físico inglés Tate calculó, que si dejara de existir de repente la gravedad y el agua se hiciera imponderable, el nivel de los océanos subiría, por término medio, en 35 m (como consecuencia de que el agua comprimida recobraría su volumen normal). "El océano inundaría 5 000 000 km² de tierras firmes, que deben su existencia como tales a la compresibilidad de las aguas de los océanos que las rodean" (Berget).

Los submarinos de hoy no sólo han alcanzado al fantástico "Nautilus" de Julio Verne, sino que incluso lo han superado. Es verdad que la velocidad de los cruceros submarinos actuales es la mitad de la del "Nautilus", es decir, de 24 nudos contra 50 que tenía el de Julio Verne (un nudo es igual a 1,8 km por hora). El trayecto más largo recorrido por un submarino moderno es la vuelta al mundo, mientras que el capitán Nemo realizó un viaje dos veces más largo. Pero el "Nautilus" tenía un desplazamiento de 1500 t solamente, su tripulación la formaban dos o tres decenas de hombres y podía mantenerse debajo del agua no más de 48 horas seguidas. El crucero submarino "Surcouf", construido en Francia en el año 1929, tenía un desplazamiento de 3200 t, una tripulación de 150 hombres y era capaz de permanecer debajo del agua hasta 120 horas seguidas*.

La travesía desde los puertos franceses hasta la isla de Madagascar fue realizada por este crucero submarino sin entrar en ningún puerto. Los compartimientos habitables del "Surcouf" quizá no fueran menos cómodos que los del "Nautilus". Pero el "Surcouf" tenía una ventaja indudable sobre el buque del capitán Nemo. Sobre la cubierta de este crucero submarino había un angar impermeable en el que se alojaba un hidroavión de exploración. El "Nautilus" carecía de periscopio, aparato que permite observar el horizonte estando sumergido.

Sólo hay un aspecto en el que los submarinos reales tardarán mucho en alcanzar la creación de la fantasía del novelista francés. No referimos a la profundidad de inmersión. No obstante, hay que advertir que en este aspecto la fantasía de Julio Verne se sale de los límites de la verosimilidad. "El capitán Nemo — leemos en una parte del libro —, descendió hasta tres, cuatro, cinco, siete, nueve y diez mil metros de profundidad bajo la superficie del océano". En una ocasión el "Nautilus" bajó a una profundidad extraordinaria ... ¡hasta 16 mil metros! "Yo sentía — relata el héroe de la novela — cómo temblaban los sujetadores del revestimiento de hierro del submarino, cómo flexiona-

* En la actualidad un submarino con propulsión atómica le da al hombre la posibilidad de elegir cualquier camino en las casi desconocidas profundidades de los mares y océanos. Sus casi inagotables reservas de energía permiten recorrer enormes trayectos sin emerger. En el año 1958 (desde el 22 de julio hasta el 5 de agosto) el submarino atómico norteamericano "Nautilus" realizó sumergido la travesía desde el Mar de Bering hasta el de Groenlandia, pasando por la región del Polo Norte. Los submarinos atómicos también han hecho posible el viaje alrededor del mundo sin salir a flote. (*N. de la R.*)

ban sus riostras, cómo cedían hacia adentro las ventanas forzadas por la presión del agua. Si nuestro buque no tuviera la resistencia de un cuerpo de fundición macizo, la presión lo aplastaría en el acto".

Este temor era realmente fundado, puesto que a 16 km de profundidad (si existiera esta profundidad en algún océano) la presión del agua debería alcanzar la cifra de

$$16\,000:10=1\,600 \text{ kg por } 1 \text{ cm}^2,$$

ó 1 600 atmósferas técnicas. Esta presión no trituraría al hierro, pero indudablemente aplastaría al submarino. Pero la Oceanografía moderna desconoce la existencia de semejantes profundidades. No obstante, en la época de Julio Verne (la novela está escrita en el año 1869) existía esta idea exagerada de las profundidades marinas, que era debida a la imperfección de los procedimientos que se empleaban para medir dichas profundidades. En aquellos tiempos las sondalezas iban sujetas no con alambre, sino con cuerdas de cáñamo. Estas sondas eran retenidas por el frotamiento con el agua, que aumentaba al aumentar la profundidad. A grandes profundidades este rozamiento aumentaba tanto, que la sonda no se hundía más por más cuerda que se soltase. Esta última se enredaba, dando la impresión de que la profundidad era enorme.

Los buques submarinos de hoy pueden soportar presiones poco mayores de 30 atmósferas. Esto determina que su profundidad máxima de inmersión sea de 300 m. Se han podido alcanzar profundidades mucho mayores en unos aparatos especiales llamados "batisferas" que se emplean para el estudio de la fauna de las vorágines oceánicas. Pero estos aparatos no se parecen al "Nautilus" de Julio Verne, sino a la creación de la fantasía de otro novelista, es decir, a la esfera de gran profundidad que Wells describe en su narración "En el fondo del mar". El héroe de esta narración se sumergió hasta el fondo del mar, a una profundidad de 9 km, en una gruesa esfera de acero. Este aparato se sumergía sin cables, pero tenía una carga (lastre) eliminable. Una vez alcanzado el fondo del océano la esfera soltaba el lastre y subía rápidamente a la superficie.

En las batisferas se han conseguido profundidades mayores de 900 m. Estos aparatos se sumergen con un cable desde un buque, con el cual mantienen comunicación telefónica los tripulantes de la esfera.

Recientemente se han hecho unos aparatos llamados batiscafos, para la investigación a grandes profundidades, en Francia, bajo la dirección del ingeniero Willm, y en Italia, según el pro-

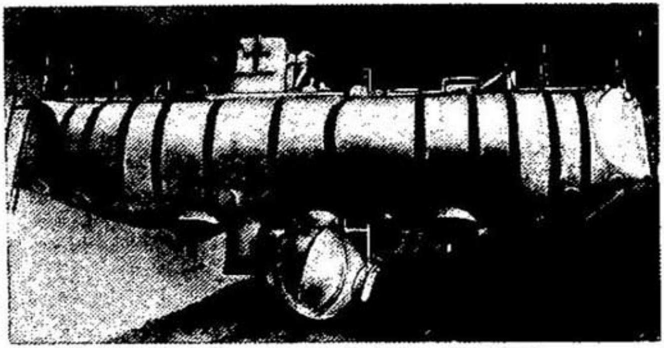


Fig. 53. Batiscafo de Piccard antes de la inmersión (1957).

yecto del profesor belga Piccard (fig. 53). Estos aparatos se diferencian de las batisferas en que se pueden mover, es decir, navegar a grandes profundidades, mientras que las batisferas permanecían colgadas de cables. Piccard se sumergió primeramente en un batiscafo hasta más de 3 km; después, los franceses Houot y Willm pasaron la siguiente frontera y alcanzaron la profundidad de 4 050 m. En noviembre de 1959 se descendió en batiscafo hasta 5 670 m, pero esto tampoco era el límite. El 9 de enero de 1960 el profesor Piccard hizo una inmersión de hasta 7 300 m y el 23 de enero su batiscafo alcanzó en el fondo de la fosa de las Marianas la profundidad de ... ¡11,5 km! Según los datos modernos ésta es la mayor profundidad del mundo.

¿COMO SE IZO EL "SADKO"?

En las amplias extensiones del océano perecen anualmente millares de buques grandes y pequeños, sobre todo en tiempo de guerra. Ultimamente se han comenzado a recuperar ("salvar") del fondo del mar los barcos más valiosos y asequibles. Los ingenieros y buzos soviéticos que forman las "Expediciones para trabajos submarinos especiales" (la sigla rusa es EPRON) se hicieron célebres en el mundo entero por haber recuperado eficazmente más de 150 grandes buques. Uno de los mayores fue el rompehielos "Sadkó", que se hundió el año 1916 en el Mar Blanco por negligencia de su capitán. Después de estar en el fondo del mar 17 años, este magnífico rompehielos fue izado por los operarios de las EPRON y volvió a prestar servicio.

La técnica que se emplea para izar los buques se basa por entero en el principio de Arquímedes.

Los buzos hicieron en el fondo del mar, debajo del buque hundido, 12 túneles y a través de ellos hicieron pasar unas bandas de acero fortísimas. Los extremos de estas bandas se sujetaron a unos flotadores, previamente hundidos junto al rompehielos. Este trabajo se realizó a 25 metros de profundidad.

Servían de flotadores (fig. 54) unos cilindros de hierro huecos y estancos que tenían 11 metros de longitud y 5,5 metros de diámetro. Cada uno de estos flotadores pesaba estando vacío 50 t. Su volumen, que se puede calcular fácilmente por las reglas de la Geometría, era de 250 metros cúbicos. Está claro que semejante cilindro vacío debe flotar en el agua, puesto que desaloja 250 t de agua y pesa solamente 50 t. Su poder de elevación será igual a la diferencia entre 250 t y 50 t, es decir, a 200 t. Para que el flotador se hunda no hay más que llenarlo de agua.

Cuando (véase la fig. 54) los extremos de las bandas de acero (bragas) estuvieron bien sujetos a los flotadores hundidos, se comenzó a inyectar aire comprimido en estos últimos. A 25 m de profundidad el agua presiona con una fuerza de $\frac{25}{10}+1$ atmósferas, es decir, de tres atmósferas y media. El aire se inyectaba en los flotadores a cerca de 4 atmósferas, por lo tanto, podía expulsar el agua que había en ellos. Los cilindros así aligerados eran empujados por el agua circundante hacia la superficie del mar, con una fuerza enorme. Ascendían en el agua lo mismo que un globo en el aire. Su fuerza de elevación conjunta (los flotadores eran 12) era de 200×12, es decir, de 2 400 t. Esto excedía el

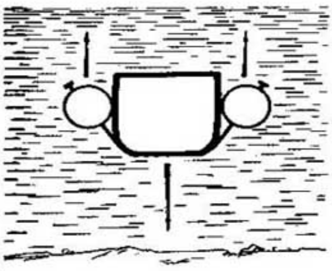
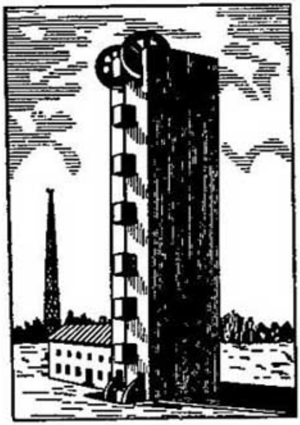


Fig. 54. Esquema del salvamento del rompehielos "Sadkó"; se muestra el corte del rompehielos, los flotadores y las bragas.

Fig. 55. Proyecto de un supuesto "móvil perpetuo" hidráulico.



peso del "Sadkó", por lo que los flotadores sólo se vaciaron de agua parcialmente, para que el izado fuera más suave.

A pesar de todo la recuperación solamente se consiguió después de varias tentativas infructuosas. "Cuatro averías sufrió el equipo de salvamento antes de que su empresa se viera coronada por el éxito — escribe T. I. Bobritski, ingeniero naval jefe de las EPRON y director de los trabajos —. Tres veces, cuando esperábamos con impaciencia la aparición del buque, vimos subir, en lugar del rompehielos, los flotadores, que inesperadamente salían a flote envueltos en un caos de olas, espuma y mangas desgarradas que se enrollaban como serpientes. El rompehielos asomó dos veces, pero volvió a desaparecer antes de emerger definitivamente y de quedar a flote".

UN MOVIL "PERPETUO" HIDRAULICO

Entre los muchos proyectos de móvil "perpetuo" (o perpetuum mobile) hay bastantes que se fundan en la emergencia de los cuerpos en el agua. Uno de ellos es el siguiente. Una torre de 20 m de altura está llena de agua. En las partes más alta y más baja de esta torre hay dos poleas unidas entre sí por un cable resistente que hace las veces de correa sin fin. A este cable van sujetos 14 cajones cúbicos de un metro de altura. Estos cajones están hechos de chapas de hierro unidas con remaches y son completamente estancos. Las figs. 55 y 56 representan respectivamente el aspecto exterior de esta torre y su corte longitudinal.

¿Cómo funcionaba este artificio? Todo el que conozca el principio de Arquímedes comprenderá que los cajones que se encuentran dentro del agua tenderán a subir a la superficie. Les obligará a subir una fuerza igual al peso del agua que desalojan, es decir,

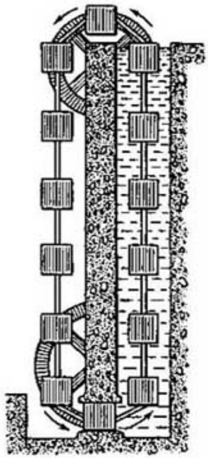


Fig. 56. Corte de la torre de la figura anterior.

un metro cúbico de agua multiplicado por el número de cajones que están hundidos en este líquido. Como puede verse en la figura, dentro del agua habrá siempre seis cajones. Por lo tanto, la fuerza que empuja hacia arriba a los cajones será igual al peso de 6 m^3 de agua, es decir, a 6 t. Estos mismos cajones serán arrastrados hacia abajo por su propio peso, pero esta acción está compensada con el peso de los 6 cajones que cuelgan del cable libremente en la parte exterior de la torre.

De esta forma, el cable tendido de la forma antes indicada estará sometido continuamente a una tracción de 6 t, aplicada a uno de sus lados y dirigida hacia arriba. Está claro que esta fuerza obligará al cable a girar ininterrumpidamente, pasando por las poleas, y a cada vuelta podrá realizar un trabajo igual a $6\,000 \times 20 = 120\,000$ kgm.

Si sembramos todo el país de torres de este tipo podemos obtener una cantidad infinita de trabajo, suficiente para cubrir todas las necesidades de la economía nacional. Estas torres podrán hacer girar los rotores de multitud de dinamos y dar cuanta energía eléctrica sea necesaria.

Pero si analizamos bien este proyecto, veremos que el cable no se puede mover en absoluto.

¿Por qué? Pues, porque para que el cable sin fin dé vueltas, los cajones deben entrar en el pozo de agua de la torre por abajo y salir de él por arriba. Pero para poder entrar en el pozo el cajón tiene que *vencer la presión que sobre él ejerce una columna de agua de 20 m de altura*. Como el cajón tiene una superficie lateral de un metro cuadrado, la presión sobre él será igual, ni más ni menos, que 20 t (el peso de 20 m^3 de agua). La tracción hacia arriba es de 6 t solamente, por lo tanto, es insuficiente para hacer que el cajón entre en el pozo.

La mayoría de los modelos de móviles "perpetuos" hidráulicos han sido ideados por inventores fracasados, pero entre ellos se pueden encontrar algunas variantes muy sencillas e ingeniosas.

Véase, por ejemplo, el modelo representado en la fig. 57. Un tambor de madera sujeto a un eje se encuentra sumergido parcialmente en agua. Si el principio de Arquímedes es cierto, esta parte sumergida del tambor deberá emerger, y si el empuje del agua es mayor que el rozamiento del tambor en el eje, la rotación no deberá interrumpirse jamás. De todos modos, tampoco hay que darse prisa a construir este móvil "perpetuo". El fracaso sería seguro. El tambor ni se movería. ¿Por qué? Porque no hemos tenido en cuenta la dirección en que actúan las fuerzas. Estas últimas estarán dirigidas siempre perpendicularmente a la

Fig. 57. Otro proyecto de móvil "perpetuo" hidráulico.

superficie del tambor, es decir, siguiendo los radios del mismo hacia el eje. Y todos sabemos por experiencia que no es posible hacer girar una rueda aplicándole una fuerza a lo largo de un radio. Para que la rueda gire hay que aplicar la fuerza en dirección perpendicular a su radio, es decir, tangencialmente a la circunferencia. Ahora está claro por qué también en este caso sería un fracaso la construcción del móvil "perpetuo".

El principio de Arquímedes alimentó la imaginación de los buscadores del móvil "perpetuo" y despertó el deseo de inventar dispositivos muy ingeniosos con objeto de aprovechar la aparente pérdida de peso creando una fuente "permanente" de energía mecánica. Pero ninguno de estos intentos fue, ni podía ser, coronado por el éxito.

¿QUIEN IDEO LA PALABRA "GAS"?

La palabra "gas" es una de aquellas que, como "termómetro", "electricidad", "galvanómetro", "teléfono" y antes "atmosfera" fueron ideadas por los hombres de ciencia. Entre todas estas palabras "gas" es sin duda la más corta. El químico y médico holandés Van Helmont (1577—1644), contemporáneo de Galileo, dedujo la palabra "gas" de la griega caos (χαος). Cuando descubrió que el aire consta de dos partes, una, que mantiene la combustión y se consume, y otra, que no presenta estas cualidades, Helmont escribió:

"He llamado *gas* a este vapor, porque casi no se diferencia del *caos* de los antiguos" (el sentido inicial de la palabra "caos" era el de espacio vacío).

Pero esta palabra nueva no se empezó a utilizar hasta muchos años después, siendo el insigne Lavoisier quien la resucitó en el año 1789. Por fin se extendió universalmente cuando empezo a hablarse de los vuelos de los hermanos Montgolfier en los primeros globos de aire caliente.

Lomonósov llamó en sus obras "fluidos elásticos" a los cuerpos en estado gaseoso (esta denominación perduraba cuando el autor de este libro estudiaba en la escuela). A Lomonósov le corresponde el mérito de haber introducido en el idioma ruso una serie de palabras que ahora son comunes en el lenguaje técnico; entre ellas figuran:

atmósfera	manómetro
barómetro	micrómetro
cristalización	óptica
materia	eléctrico y otras

El genial precursor de las ciencias naturales rusas escribía con este motivo lo siguiente:

"Me he visto obligado a buscar palabras para designar algunos instrumentos físicos, acciones y objetos naturales que, aunque al principio parecerán algo raras, espero que con el tiempo y el uso acabarán siendo ordinarias".

UN PROBLEMA QUE PARECE FACIL

Un recipiente de treinta vasos de capacidad está lleno de agua. Ponemos un vaso debajo del grifo que tiene el recipiente, abrimos y, reloj en mano, observamos cuánto tiempo tarda el vaso en llenarse hasta los bordes. Supongamos que tarda medio minuto. Nos planteamos la pregunta: ¿cuánto tiempo tardará el recipiente en vaciarse por completo, si dejamos el grifo abierto?

Parece que se trata de un problema aritmético para niños pequeños. Si el agua que cabe un vaso tarda en salir $1/2$ minuto, los 30 vasos que caben en el recipiente tardarán en salir 15 minutos.

Pero si ustedes hacen este experimento verán que el recipiente no tarda en vaciarse un cuarto de hora, sino media hora.

¿Qué ocurre?

El cálculo que hemos hecho es fácil pero erróneo. El agua no sale con la misma *velocidad* desde el principio hasta el fin. Después de salir el primer vaso, el chorro de agua tendrá ya menos presión, puesto que el nivel dentro del recipiente habrá bajado, por lo tanto, el segundo vaso tardará más de medio minuto en llenarse. El tercero saldrá aún más despacio y así sucesivamente.

La velocidad con que un líquido sale por el orificio de un recipiente abierto depende directamente de la altura de la columna de agua que hay sobre dicho orificio. El genial Torricelli, discípulo de Galileo, fue el primero que estableció esta dependencia expresándola con la sencilla fórmula siguiente:

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

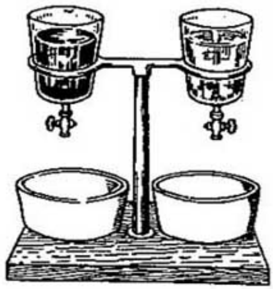


Fig. 58. ¿Qué recipiente se vaciará antes, el que tiene mercurio o el que tiene alcohol? El nivel de los líquidos es igual en los dos recipientes.

donde v es la velocidad de salida, g la aceleración de la gravedad y h la altura del nivel del líquido sobre el orificio. De esta fórmula se deduce que la velocidad con que sale el chorro no depende en absoluto de la *densidad* del líquido, es decir, el alcohol, a pesar de ser ligero, y el mercurio, a pesar de ser tan pesado, saldrán a la misma velocidad si están a un mismo nivel (fig. 58). Según esta fórmula, en la Luna, donde la gravedad es seis veces menor que en la Tierra, el vaso del problema anterior tardaría en llenarse dos veces y media más que en nuestro planeta.

Pero volvamos a nuestro problema. Si después de haber salido del recipiente 20 vasos de agua el nivel de ésta en aquél (a partir del orificio del grifo) ha bajado hasta la *cuarta* parte, el vaso 21° se llenará dos veces más despacio que el 1°. Y si después desciende el nivel hasta la novena parte, los últimos vasos tardarán *tres* veces más tiempo en llenarse que el primero. Cuando el recipiente está casi vacío el agua sale muy despacio. Resolviendo este problema por los procedimientos que se estudian en matemáticas superiores se puede demostrar que el tiempo que tarda el recipiente en vaciarse por completo *es el doble* del que tardaría en salir la misma cantidad de líquido si el nivel inicial permaneciera constante.

EL PROBLEMA DEL DEPOSITO

Desde lo que acabamos de decir no hay más que un paso a los famosos problemas de los depósitos de los cuales no prescinde ni un solo libro de aritmética o de álgebra. Todos recordamos los clásicos y aburridos problemas escolásticos del tipo que sigue:

"Un depósito tiene dos tuberías, una de entrada y otra de salida. El agua que entra por la primera, estando la segunda cerrada, puede llenar el depósito en cinco horas. Cuando se abre solamente la segunda el depósito se vacía en 10 horas. ¿Cuántas horas tardará en llenarse el depósito si se abren las dos tuberías a la vez?"

Hace cerca de 20 siglos que se conocen los problemas de este tipo, es decir, desde la época de Herón de Alejandría. Uno de los problemas de Herón, no tan difícil como sus sucesores, es el siguiente:

Tenemos cuatro fuentes y un depósito grande.
La primera en un día lo pone rebosante.
La segunda tarda dos en hacer lo que aquélla
Y la tercera, en tres, no será menor que ellas.
(Para igualarlas, cuatro necesita la cuarta).
¿Qué tiempo tardará el depósito en llenarse,
Si se abren las cuatro fuentes en el mismo instante?

Hace dos mil años que se resuelven problemas sobre depósitos y, tanta es la fuerza de la rutina, que llevamos dos mil años *resolviéndolos mal*. ¿Por qué? Ustedes mismos lo comprenderán después de lo que acabamos de decir en el artículo anterior sobre la salida del agua. ¿Cómo se enseña a resolver los problemas de los depósitos? El problema que mencionamos más arriba como típico, por ejemplo, se suele resolver así: la primera tubería llena en 1 hora $1/5$ de depósito; la segunda, en este mismo tiempo, vacía $1/10$ del mismo; por consiguiente, cuando están abiertas las dos el agua del depósito aumentará en 1 hora $1/5 - 1/10 = 1/10$, de donde resulta que para que llene el depósito por completo hacen falta 10 horas. Pero este razonamiento es falso, porque si la entrada de agua se puede considerar que ocurre a presión constante y, por consiguiente, de manera uniforme, con la *salida* no se puede hacer lo mismo, puesto que se realiza mientras varia el nivel del agua en el depósito y, por lo tanto, de manera *no uniforme*. Por medio de la segunda tubería el depósito se vacía en 10 horas, pero de este hecho no se puede sacar la conclusión de que por este tubo sale $1/10$ parte del agua del depósito cada hora. Como vemos el procedimiento que se sigue en las escuelas es erróneo. Estos problemas no se pueden resolver correctamente valiéndose de las matemáticas elementales, por lo tanto, los problemas sobre depósitos (*con salida de agua*) deben ser excluidos de los libros de problemas de aritmética*.

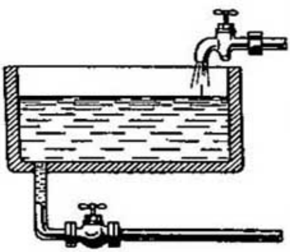


Fig. 59. El problema del depósito.

* El lector puede encontrar un análisis detallado de este tipo de problemas en mi libro *"¿Sabe usted Física?"*

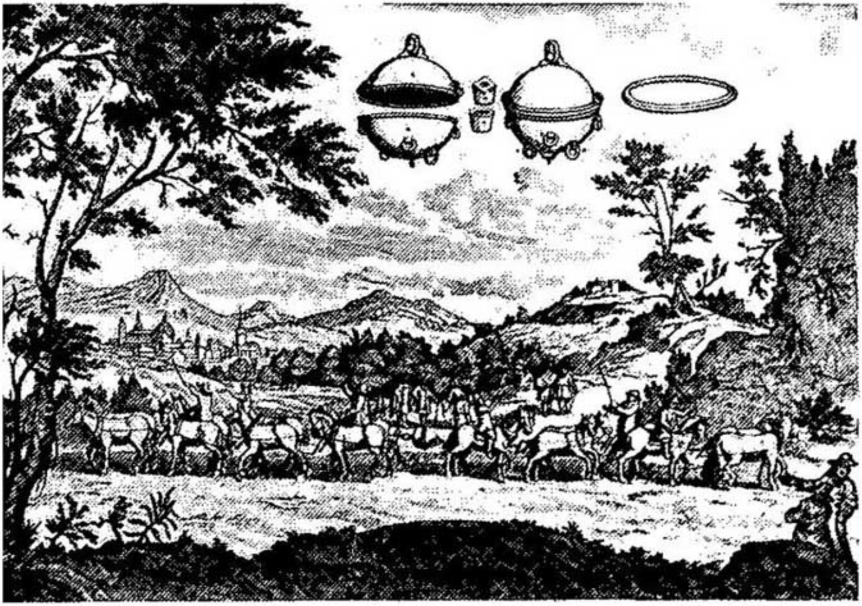


Fig. 61. Experimento con los "hemisferios de Magdeburgo"
Ilustración del libro de Otto Von Guericke.

¿Se puede construir un recipiente del cual siempre salga el agua en chorro uniforme, es decir, sin que su corriente pierda velocidad, a pesar de que el nivel del líquido descienda? Después de lo que hemos dicho en los artículos anteriores pensarán ustedes que este problema no tiene solución.

Sin embargo se trata de una cosa perfectamente realizable. El frasco representado en la fig. 60 tiene precisamente esta extraordinaria propiedad. Como puede verse es un frasco ordinario de gollete estrecho, provisto de un tapón atravesado por un tubo de vidrio. Si abrimos el grifo *C*, que está más bajo que el extremo del tubo, el líquido saldrá por él en chorro uniforme hasta que el nivel del agua dentro del frasco llegue a estar más bajo que el extremo inferior del tubo. Si bajamos el tubo hasta que su extremo se encuentre cerca del nivel del grifo, podemos conseguir que todo el líquido que se halle por encima del nivel de su agujero salga uniformemente, aunque el chorro sea débil.

¿Por qué ocurre esto? Para comprenderlo examinemos mentalmente lo que pasa en el recipiente cuando se abre el grifo *C* (fig. 60). Al salir el agua su nivel va bajando dentro del frasco. Esto hace que el aire que hay en la parte superior se enrarezca. Pero entonces, a través del tubo de vidrio, y pasando por debajo del agua, penetra aire del exterior. Este aire forma burbujas al infiltrarse a través del agua y después se acumula sobre ella en la parte superior del frasco. En este caso la presión es igual a la atmosférica hasta llegar al nivel *B*. Por lo tanto el agua sale por el grifo *C* impulsada por la presión que ejerce la capa de agua *BC*, puesto que la presión atmosférica se equilibra dentro y fuera del frasco. Y como el espesor de la capa *BC* permanece constante, no tiene nada de particular que el chorro corra siempre con la misma velocidad.

Pero ahora se nos plantea una nueva pregunta: ¿cómo saldrá el agua si quitamos el tapón *B*, que se encuentra al nivel del extremo del tubo?

No saldrá en absoluto (se entiende que esto ocurrirá si el orificio es tan pequeño que su

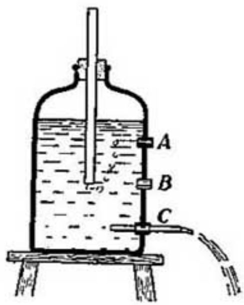


Fig. 60. Esquema del frasco de Mariotte. El agua sale del orificio uniformemente.

anchura se puede despreciar; de lo contrario el agua saldrá por él presionada por una delgada capa de líquido cuyo espesor será igual a la anchura del agujero). Esto se explica, porque en este caso la presión interna y la externa serán iguales a la atmosférica y, por consiguiente, no habrá nada que estimule la salida del agua.

Y si quitamos el tapón *A*, que está *más arriba* del extremo inferior del tubo, no sólo no saldrá agua del frasco, sino que entrará en él aire del exterior. ¿Por qué? Por una razón muy sencilla, porque en esta parte del frasco la presión del aire interior *es menor* que la de la atmósfera exterior.

Este recipiente, de propiedades tan interesantes, fue ideado por el notable físico francés Edmond Mariotte y se conoce con el nombre de "frasco de Mariotte".

UNA CARGA DE AIRE

A mediados del siglo XVII los habitantes de Regensburg y los poderosos príncipes de Alemania, encabezados por su emperador, llegados a esta ciudad, fueron testigos de un espectáculo extraordinario: 16 caballos, tirando con todas sus fuerzas, intentaron inútilmente separar dos semiesferas de cobre unidas entre sí por simple contacto. ¿Qué unía entre sí a estas dos semiesferas? "Nada", el aire. Y no obstante, ocho caballos tirando hacia un lado y ocho tirando hacia otro no pudieran separarlas. De esta forma el burgomaestre Otto Von Guericke demostró públicamente que el aire es algo que tiene peso y que presiona con bastante fuerza sobre todos los objetos que hay en la Tierra.

Este experimento fue realizado con toda solemnidad el día 8 de mayo de 1654. El sabio burgomaestre supo interesar a todo el mundo con sus investigaciones científicas, a pesar de que esto ocurría en una época en que los desbarajustes políticos y las guerras asoladoras estaban en su apogeo.

En los libros elementales de Física figura la descripción del famoso experimento de los "hemisferios de Magdeburgo". No obstante, estoy seguro de que el lector escuchará con gusto esta descripción hecha por el propio Guericke, el "Galileo alemán", como llaman a veces a este célebre físico. El libro, bastante voluminoso, en que se describe la larga serie de sus experimentos apareció en Amsterdam el año 1672; estaba escrito en latín y como los demás libros de esta época tenía un título muy largo, que hemos creído interesante reproducir.

OTTO VON GUERICKE
los llamados nuevos experimentos de Magdeburgo sobre
EL ESPACIO VACÍO,
descrito inicialmente por el profesor de matemáticas de
la Universidad de Wurzburgo KASPAR SCHOTT.
Edición del propio autor,
más detallada y aumentada con otros
nuevos experimentos.

El capítulo XXIII está dedicado al experimento que nos interesa. A continuación incluimos su traducción literal.

"Experimento para demostrar que la presión del aire une dos hemisferios tan fuertemente que 16 caballos no pueden separarlos".

"Encargué dos hemisferios de cobre de tres cuartos de codo de Magdeburgo de diámetro*. Pero en realidad sus diámetros midieron solamente 67/100 de codo, ya que los maestros, como de ordinario, no pudieron hacer exactamente lo que era necesario. Ambos hemisferios se correspondían bien entre sí. Uno de ellos tenía una llave que permitía extraer el aire interior y evitaba la entrada del aire exterior. Los hemisferios tenían además cuatro argollas, por las cuales pasaban los cordeles que se sujetaban a los atalajes de los caballos. También hice que cosieran un anillo de cuero; este anillo, impregnado en una mezcla de cera y aguarrás y cogido entre los dos hemisferios no dejaba que el aire entrase en ellos. En la llave se enchufó el tubo de la máquina neumática y se extrajo el aire de dentro de la esfera. Entonces se puso de manifiesto la fuerza con que ambas esferas se apretaban entre sí a través del anillo de cuero. La presión del aire exterior las apretaba con tal fuerza, que 16 caballos (de un tirón) no las podían separar o lo conseguían con dificultad. Cuando los hemisferios, cediendo a la fuerza de los caballos, se separaban, producían un estampido como un cañonazo.

Pero si se abría la llave y se dejaba entrar el aire, los hemisferios se podían separar fácilmente con las manos".

Un cálculo sencillo puede aclararnos por qué hace falta tanta fuerza (8 caballos por cada lado) para separar las dos partes de la esfera vacía. El aire ejerce una presión aproximada de 1 kg por cada cm². La superficie del círculo** que tiene 0,67

* El "codo de Magdeburgo" mide 550 mm.

** Se toma *la superficie del círculo y no la de la semiesfera,* porque la presión atmosférica tiene el valor que hemos indicado cuando actúa sobre la superficie formando un ángulo recto con ella. Si la superficie está inclinada, la presión es menor. En nuestro caso tomamos la *proyección* rectangular de la superficie esférica sobre el plano, es decir, la superficie del círculo.

codos (37 cm) de diámetro será igual a 1 060 cm^2. Por lo tanto, la presión de la atmósfera sobre cada hemisferio será mayor de 1 000 kg (1 t). Cada uno de los tiros de 8 caballos tenía, pues, que tirar con una fuerza de una tonelada para poder contrarrestar la presión del aire exterior.

Parece que para 8 caballos (por cada lado) esto no es mucha carga. Pero no hay que olvidarse de que cuando un caballo tira de un carro cargado con 1 t la fuerza que hace no es de 1 t, sino mucho menor; exactamente la que se necesita para vencer el rozamiento de las ruedas sobre sus ejes y sobre el pavimento. Esta fuerza representa (en una carretera, por ejemplo) el cinco por ciento de la carga, es decir, si el carro pesa una tonelada la fuerza necesaria para arrastrarlo es igual a 50 kg. (Sin hablar ya de que la experiencia demuestra que cuando se enganchan 8 caballos juntos se pierde el 50% del esfuerzo). Por consiguiente, la tracción de 1 t corresponde para los 8 caballos a arrastrar un carro que pese 20 t. Esta es la carga de aire que tenían que arrastrar los caballos del burgomaestre de Magdeburgo. Este esfuerzo se puede comparar con el necesario para mover de su sitio a una locomotora no muy grande, pero que no esté sobre los raíles.

Se ha medido que un caballo fuerte tira de la carga con una fuerza total de 80 kg*. Por consiguiente, para separar los hemisferios de Magdeburgo, con tracción uniforme, hubieran sido necesarios $\frac{1\,000}{80} = 13$ caballos por cada lado**

* A una velocidad de 4 km por hora. Se considera que, por término medio, la fuerza de tracción de un caballo es aproximadamente igual al 15% de su peso. Un caballo ligero pesa 400 kg, uno pesado, 750 kg. Durante poco tiempo (el esfuerzo inicial) la fuerza de tracción puede ser varias veces mayor.

** La explicación de por qué hacen falta 13 caballos por *cada* lado puede encontrarse en mi libro *"Mecánica Recreativa"*.

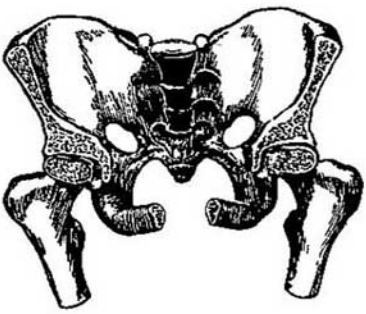


Fig. 62. Los huesos de nuestras articulaciones coxofemorales no se separan debido a la presión atmosférica, que los sujeta lo mismo que a los hemisferios de Magdeburgo.

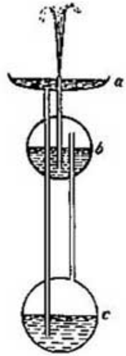


Fig. 63. La fuente de Herón clásica

El lector quizá se asombre al saber que algunas articulaciones de nuestro esqueleto se mantienen unidas por la misma causa que los hemisferios de Magdeburgo. Nuestra articulación coxofemoral tiene unas propiedades parecidas a los antedichos hemisferios. A esta articulación se le pueden quitar todos los ligamentos musculares y cartilaginosos sin que se desarticule. Ocurre esto porque la presión atmosférica aprieta entre sí los huesos que forman esta articulación, puesto que en el espacio comprendido entre ellos no hay aire.

NUEVAS FUENTES DE HERON

Mis lectores conocerán probablemente la forma ordinaria de la fuente que se atribuye al mecánico de la antigüedad Herón. No obstante, recordaremos aquí su estructura antes de pasar a describir las nuevas variantes de este aparato tan interesante. La fuente de Herón (fig. 63) consta de tres vasijas: una superior, abierta, *a* y dos de forma esférica, *b* y *c*, herméticamente cerradas. Estas vasijas están unidas entre sí por tres tubos dispuestos como se indica en la figura. Cuando en *a* hay un poco de agua, la esfera *b* está llena de líquido y la *c* de aire, la fuente empieza a funcionar. El agua pasa por el tubo de *a* a *c*, hace que el aire pase de esta esfera a la *b* y el agua de *b*, presionada por el aire que entra, sube por el tubo y forma la fuente sobre la vasija *a*. Cuando la esfera *b* se queda vacía, el surtidor deja de echar agua.

Esta es la antiquísima forma de la fuente de Herón. Pero ya en nuestro tiempo, un maestro de escuela italiano, obligado a inventar por la falta de medios de que disponía su gabinete de Física, construyó una fuente de Herón en la que introdujo unas modificaciones que hacen posible que cualquiera pueda construirla valiéndose de

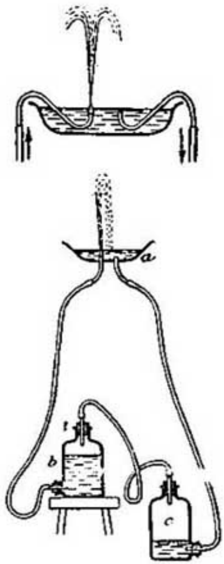


Fig. 64. Modificación actual de la fuente de Herón. Arriba una variante que evita horadar el fondo del plato superior.

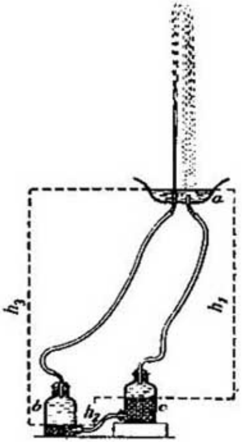


Fig. 65. Fuente que funciona por la presión del mercurio. La altura a que sube el chorro es diez veces mayor que la diferencia entre los niveles del mercurio.

medios muy simples (fig. 64). En lugar de las esferas utilizó frascos de farmacia y en vez de ponerle tubos de vidrio o de metal, los puso de goma. La vasija superior no es necesario que tenga agujeros en el fondo; basta introducir en ella los extremos de los tubos como se muestra en el diseño superior de la fig. 64.

El aparato construido de esta forma es mucho más cómodo y fácil de utilizar. Cuando el tarro *b* se queda vacío, porque el agua que había en él pasó ya a través de la vasija *a* al tarro *c*, los tarros *b* y *c* se pueden cambiar de sitio entre sí y la fuente volverá a echar agua, si la boquilla se pone en el otro tubo.

Otra ventaja de esta fuente modernizada consiste en que da la posibilidad de variar la situación de las vasijas y, de esta manera, estudiar cómo influye la diferencia de niveles del líquido que hay en ellas en la altura a que se eleva el agua que echa la fuente.

Si se quiere que el chorro llegue mucho más alto, no hay más que sustituir el agua que había en los tarros por mercurio y el aire por agua (fig. 65). El aparato funciona en estas condiciones del modo siguiente: el mercurio pasa del tarro *c* al *b* y hace que de este último salga el agua y origine el surtidor. Sabiendo que el mercurio pesa 13,5 veces más que el agua, podemos calcular a qué altura deberá elevarse el chorro de la fuente. Designemos la diferencia de niveles entre las correspondientes vasijas por h_1, h_2 y h_3. Veamos ahora qué fuerzas son las que hacen que el mercurio de la vasija *c* (fig. 65) pase a la *b*. El mercurio que se halla en el tubo que une entre sí estas vasijas está sujeto a presión por los dos lados. Por la derecha sufre la presión debida a la diferencia de alturas h_2 entre las columnas de mercurio (que es igual a la presión que ejercería una columna de agua 13,5 veces más alta, es decir, $13{,}5\,h_2$) más la presión que origina la columna de agua h_1. Por la izquierda presiona sobre él la columna de agua h_3. Por lo tanto, el mercurio es arrastrado con una fuerza total de

$$13{,}5h_2+h_1-h_3.$$

Pero $h_3-h_1=h_2$; por esto podemos poner $-h_2$ en lugar de h_1-h_3 y obtener:

$$13{,}5h_2-h_2$$

es decir, 12,5 h_2. De esta forma, el mercurio entra en la vasija *b* a la presión correspondiente al peso de una columna de agua que tuviera una altura igual a 12,5 h_2. Por esto, teóricamente el chorro de agua puede llegar hasta una altura igual a la diferencia entre los niveles del mercurio en los tarros multiplicada por 12,5. El rozamiento hace que esta altura sea algo menor que la teórica.

A pesar de esto, con el aparato que acabamos de describir se puede conseguir cómodamente que el chorro suba hasta muy alto. Para que llegue a 10 metros de altura basta poner uno de los frascos un metro, aproximadamente, más alto que el otro. Es interesante que, como puede verse, la altura de la vasija *a* con respecto a los tarros en que se encuentra el mercurio no influye en absoluto en la altura a que se eleva el chorro.

VASIJAS DE PEGA

En los siglos XVII y XVIII los grandes señores se distraían con juguetes como el siguiente: mandaban a hacer un jarro que en la parte superior tenía unos adornos calados bastante grandes (fig. 66). Este jarro lleno de vino se lo ofrecían a alguien de quien se podían burlar sin temor a las represalias. ¿Cómo beber?

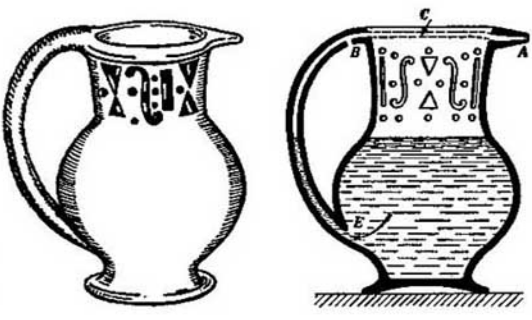


Fig. 66. Vasija de pega de finales del siglo XVIII y corte de la misma en que se ve el canal secreto.

Si empinas el jarro, se derrama el vino por las ranuras caladas sin que ni una gota llegue a la boca. Pasa como en el cuento:

Miel y cerveza bebí
y ni el bigote humedecí.

Pero el que sabía el secreto de estos jarros, que puede verse en la fig. 66 a la derecha, tapaba con un dedo el orificio *B*, cogía entre los labios el pitorro *A* y chupaba como si fuera de un biberón, sin torcer el jarro. El vino entraba por el agujero *E*, subía por el canalito que tenía dentro el asa, pasaba después por el borde hueco *c* y salía por el pitorro.

Los alfareros rusos hasta hace poco hacían jarros parecidos a éstos. Yo he tenido ocasión de ver uno en una casa. El secreto estaba muy bien disimulado. El jarro tenía una inscripción que decía: "Bebe pero no te mojes".

¿CUANTO PESA EL AGUA QUE HAY EN UN VASO BOCA ABAJO?

— Nada, claro está — dirán ustedes —, ¿cómo va a pesar si se derrama?

— ¿Y si no se derrama? — pregunto yo.

En realidad se puede conseguir que el agua no se salga de un vaso boca abajo, es decir, que no se derrame. Este caso es el que se representa en la fig. 67. Como puede verse, una copa de vidrio invertida está sujeta por el pie al platillo de una balanza. La copa está llena de agua, que no se derrama porque los bordes de la copa están sumergidos en el agua que hay en otra vasija. En el otro platillo de la balanza se encuentra otra copa exactamente igual que la primera.

¿Hacia qué lado se inclinará la balanza?

Hacia el lado de la copa invertida llena de agua. Esta copa está sometida por arriba a la presión total de la atmósfera, mientras que por abajo el peso

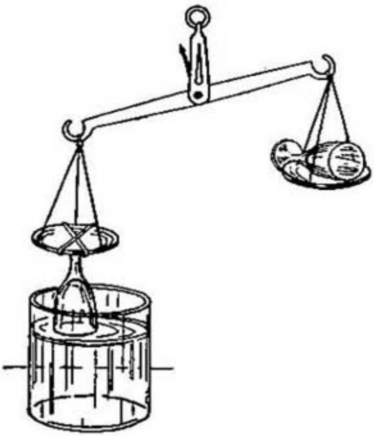
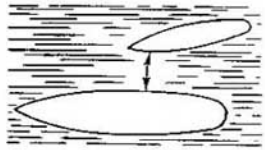


Fig. 67. Procedimiento para pesar el agua que hay en una copa invertida.

Fig. 68. Posición de los buques "Olympic" y "Hauk" antes del abordaje.



del agua que hay en ella debilita esta misma presión atmosférica. Para restablecer el equilibrio sería necesario llenar de agua la copa del otro platillo.

Por consiguiente, en estas condiciones el agua contenida en un vaso boca abajo pesa lo mismo que la contenida en un vaso en dosición normal.

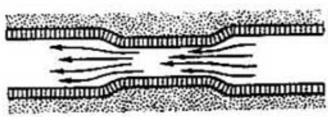
¿POR QUE SE ATRAEN LOS BARCOS?

En otoño del año 1912 ocurrió con el "Olympic", uno de los buques más grandes del mundo en aquella época, el caso siguiente. El "Olympic" navegaba en mar abierto y con rumbo casi paralelo a él y a la distancia de unos cien metros pasaba a gran velocidad otro buque, bastante más pequeño, el crucero acorazado "Hauk". Cuando ambos buques ocupaban la posición que representa la fig. 68, ocurrió algo imprevisto. El barco menor torció rápidamente su rumbo y, como si estuviera sometido a una fuerza invisible, puso proa al "Olympic" sin obedecer al timón, y avanzó hacia él casi directamente. Se produjo un abordaje. La proa del "Hauk" se hundió en el costado del "Olympic". El golpe fue tan fuerte que en la banda del "Olympic" se produjo una gran vía de agua.

Cuando este caso tan singular fue examinado por el tribunal marítimo, este último reconoció culpable al capitán del "Olympic", puesto que, como decía la sentencia, no dio ninguna orden para dejar paso libre al "Hauk", que iba a cruzarse con él.

El tribunal de justicia no vio aquí nada extraordinario. Consideró que se trataba de una simple negligencia del capitán. Sin embargo, el abordaje fue debido a una circunstancia imprevista, fue un caso de *atracción mutua entre dos buques en el mar.*

Fig. 69. En las partes estrechas del canal el agua fluye más de prisa y presiona menos sobre las paredes que en las partes anchas.



Estos casos es posible que también ocurrieran antes, cuando los barcos marchaban con rumbos paralelos. Pero hasta que no se empezaron a construir buques gigantes este fenómeno no se puso de manifiesto con tanta fuerza. Cuando las aguas del océano comenzaron a ser surcadas por "ciudades flotantes" el fenómeno de la atracción entre buques se hizo mucho más notorio. Los capitanes de la marina de guerra tienen en cuenta este fenómeno cuando maniobran con su buque.

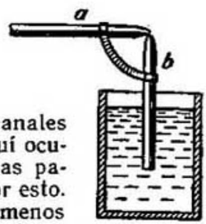
Multitud de averías ocurridas en barcos pequeños que navegaban cerca de grandes buques de pasajeros o de guerra es posible que fueran producidas por esta misma causa.

¿Como se explica esta atracción? En primer lugar, esto nada tiene que ver con la ley de la atracción universal de Newton. En el capítulo IV vimos que esta atracción es demasiado pequeña. La causa de este fenómeno es otra muy distinta y se explica por las leyes del movimiento de los líquidos en tubos y canales. Se puede demostrar que si un líquido se mueve por un canal que tiene unos sitios más anchos y otros más estrechos, por los sitios estrechos el líquido pasa más de prisa y presiona menos sobre las paredes del canal que en los sitios anchos, por los cuales pasa más despacio y presiona más sobre las paredes (éste es el llamado "teorema de Bernoulli".

Esto también es justo para con los gases. Cuando se trata de *gases* este fenómeno se conoce con el nombre de efecto Clément y Desormes (en honor de los físicos que lo descubrieron) y a veces se llama también "paradoja aerodinámica". Este fenómeno fue descubierto casualmente en las siguientes condiciones. En una mina francesa se le ordenó a uno de los obreros que tapara con un escotillón la boca de la galería exterior que servía para suministrar aire comprimido a la mina. El obrero luchó un buen rato con el chorro de aire que entraba en la mina, pero de repente el escotillón mismo cerró de golpe la galería, con tanta fuerza, que si hubiera sido más pequeño habría sido arrastrado por la escotilla de ventilación junto con el obrero. El funcionamiento de los pulverizadores se explica precisamente por esta peculiaridad de las corrientes de los gases. Cuando soplamos por el ramal *a* (fig. 70), que termina en punta, el aire, al llegar al sitio más estrecho, pierde presión. De esta forma, sobre el tubo *b* se encuentra aire cuya presión es menor que la atmosférica, por lo que esta última hace que el líquido del vaso ascienda por el tubo. Cuando este líquido llega al chorro de aire que sale del tubo *a* es arrastrado por él y se pulveriza.

Ahora podemos comprender cuál es la causa de que los barcos se atraigan. Cuando dos buques navegan paralelamente,

Fig. 70. Esquema del pulverizador



entre sus costados se forma una especie de canal. En los canales ordinarios las paredes están fijas y se mueve el agua; aquí ocurre al revés, el agua permanece inmóvil, mientras que las paredes se mueven. Pero la acción de las fuerzas no varía por esto. En los sitios más estrechos del canal móvil el agua ejerce menos presión sobre las paredes que en el resto del espacio que rodea a los barcos. En otras palabras, el agua ejerce menos presión sobre los costados afrontados de los barcos que sobre sus partes exteriores. ¿Qué debe ocurrir entonces? Los buques, sometidos a la presión que el agua ejerce sobre sus costados exteriores deberán acercarse entre sí y, naturalmente, el barco menor será el que se desvíe más notoriamente, mientras que el de mayor masa permanecerá casi inmóvil. Por esto la atracción se manifiesta con más fuerza cuando un barco grande pasa rápidamente junto a otro pequeño.

Quedamos, pues, en que la atracción de los barcos se debe a la acción absorbente de la corriente de agua. Esta misma causa explica el peligro que encierran para los bañistas los rápidos de los ríos y el efecto absorbente de los remolinos de agua. Se puede calcular que la corriente de agua de un río cuya velocidad sea de 1 m por segundo arrastra al cuerpo de un hombre con una fuerza de ... ¡30 kg! Resistirse a esta fuerza no es cosa fácil, sobre todo en el agua, donde el peso de nuestro cuerpo no nos ayuda a mantener la estabilidad. Finalmente, el arrastre que producen los trenes rápidos sobre los cuerpos próximos también se explica por el teorema de Bernoulli. Un tren que pase con una velocidad de 50 km por hora arrastrará a las personas que estén cerca con una fuerza de $\backsim$ 8 kg.

Los fenómenos relacionados con el teorema de Bernoulli no son raros, pero sí poco conocidos por las personas no especializadas en esta materia. Por esto creemos conveniente detenernos un poco en ellos. A continuación reproducimos un fragmento de un artículo sobre este tema publicado en una revista de divulgación científica por el profesor V. Franklin.

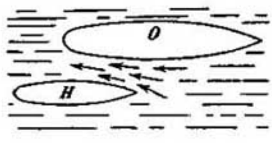


Fig. 71. Corriente de agua entre dos buques que navegan juntos.

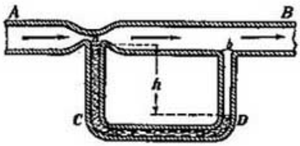


Fig. 72. Ilustración del teorema de Bernoulli. En la parte más estrecha (*a*) del tubo *AB* la presión es menor que en la más ancha (*b*).

TEOREMA DE BERNOULLI Y SUS CONSECUENCIAS

El teorema que por primera vez enunció Daniel Bernoulli en el año 1726, dice: en toda corriente de agua o de aire la presión es grande cuando la velocidad es pequeña y, al contrario, la presión es pequeña cuando la velocidad es grande. Existen algunas limitaciones a este teorema, pero aquí no nos detendremos en ellas.

La fig. 72 sirve de ilustración a este teorema.

Por el tubo *AB* se hace pasar aire. Donde la sección de este tubo es pequeña (como ocurre en *a*), la velocidad del aire es grande, y donde la sección del tubo es grande (como en *b*), la velocidad del aire es pequeña. Si la velocidad es grande, la presión es pequeña, y donde la velocidad es pequeña, la presión es grande. Como la presion del aire en *a* es pequeña, el líquido se eleva por el tubo *C*; al mismo tiempo, la gran presión del aire en el punto *b* hace que el líquido descienda en el tubo *D*.

En la fig. 73 el tubo *T* está soldado al disco *DD*; cuando este disco se dispone próximo y paralelo a una lámina *dd** ligera y libre (por ejemplo, un disco de papel) y se sopla por el tubo *T*, el aire pasa entre el disco y la lámina a gran velocidad, pero ésta disminuye rápidamente a medida que se aproxima a sus bordes, puesto que la sección de la corriente de aire aumenta muy de prisa y además porque tiene que salvar la inercia del aire que hay en el espacio entre el disco y la lámina. Pero la presión del aire que rodea a la lámina es grande, ya que su velocidad es pequeña, mientras que la presión del aire que hay entre ella y el disco es pequeña, puesto que su velocidad es grande. Por lo tanto, el aire que circunda a la lámina ejerce más

* Este mismo experimento se puede hacer con un carrete de hilo y un circulito de papel. Para que este último no se desvíe hacia un lado, se traspasa con un alfiler, que después se hace entrar en el agujero del carrete

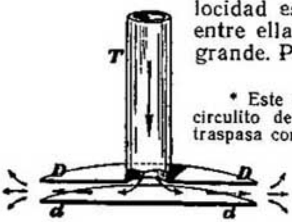


Fig. 73. Experimento con discos.

Fig. 74. El disco DD sube por la barra P cuando sobre él se proyecta el chorro de agua del depósito.

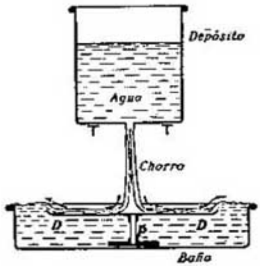


Fig. 75. El chorro de aire no deja que se caiga la pelotita.

influencia sobre ella, tendiendo a aproximarla al disco, que la corriente de aire que pasa entre los dos, que tiende a separarlos; como resultado la lámina dd se adhiere al disco DD con tanta más fuerza cuanto más intensa sea la corriente de aire que entra por T.

La fig. 74 representa un experimento análogo al de la 73, pero con agua. El agua que se mueve rápidamente sobre el disco DD tiene un nivel más bajo y se eleva ella misma hasta el nivel más alto del agua tranquila del baño, cuando sobrepasa los bordes del disco. Por esto, el agua tranquila que hay debajo del disco se encuentra a mayor presión que el agua que se mueve sobre él, por consiguiente, el disco se eleva. La varilla P impide que el disco se desvíe lateralmente.

En la fig. 75 se representa una pelotita ligera que flota en un chorro de aire. El chorro de aire empuja a la pelotita y al mismo tiempo no deja que se caiga. Cuando la pelotita se sale de la corriente, el aire circundante la hace volver a ella, puesto que la presión de este aire (que tiene poca velocidad) es grande, mientras que la del chorro de aire (cuya velocidad es grande) es pequeña.

En la fig. 76 pueden verse dos buques que navegan uno al lado del otro en aguas tranquilas; esto es lo mismo que si los dos barcos estuvieran parados y el agua corriese rodeándolos. Entre los buques se estrecha la corriente y, por lo tanto, la velocidad del agua

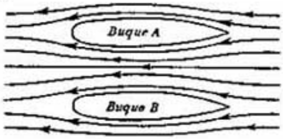


Fig. 76. Dos buques que navegan paralelamente parece que se atraen entre sí

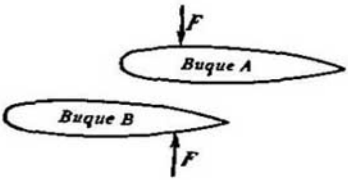
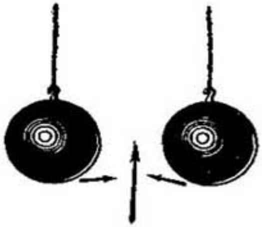


Fig. 77. Cuando los barcos navegan hacia adelante, el *B* gira y pone proa hacia el *A*.

Fig. 78. Si se sopla entre dos esferas ligeras se ve como se aproximan y hasta llegan a juntarse



en este sitio es mayor que por los costados exteriores de ambos buques. Por esto, la presión del agua entre los buques es menor que por los otros dos lados y la presión que ejerce el agua circundante (que es mayor) hace que los barcos se aproximen. Los hombres de mar saben perfectamente que los barcos que navegan juntos se atraen entre sí con bastante fuerza.

El caso en que uno de los buques va detrás del otro, como se representa en la fig. 77, es más peligroso. Las dos fuerzas *F* y *F*, que los aproximan entre sí, tienden a hacerlos girar, con la particularidad de que el buque *B* gira hacia el *A* con gran fuerza. En este caso el choque es casi inevitable, puesto que el timón no tiene tiempo de variar la dirección del movimiento que toma el barco.

El fenómeno a que se refiere la fig. 76 se puede demostrar soplando entre dos pelotitas de goma ligeras, colgadas como se ve en la fig. 78. Cuando el aire pasa entre ellas las pelotitas se aproximan y chocan entre sí.

¿PARA QUE SIRVE LA VEJIGA NATATORIA DE LOS PECES?

Generalmente, y al parecer con toda verosimilitud, se habla e incluso se escribe que la función de la vejiga natatoria de los peces es la siguiente. Cuando el pez quiere subir desde una capa profunda del agua a otra más superficial, hincha su vejiga natatoria; de esta forma el volumen de su cuerpo aumenta, el peso del agua que desaloja se hace mayor que el suyo propio y de acuerdo con la ley de la flotación, el pez se eleva. Cuando no quiere subir más, o quiere descender, el pez hace lo contrario, es decir, comprime su vejiga natatoria. Con esto disminuye su volumen y el peso del agua que desaloja y el pez se va al fondo, de acuerdo con el principio de Arquímedes.

Este concepto tan simple de la función que desempeña la vejiga natatoria de los peces viene desde los tiempos de los sabios de la Academia de Florencia (siglo XVII) y fue expresado por el profesor Borelli en el año 1675. Durante doscientos años esta hipótesis fue admitida sin objeciones y echo raíces en los libros de texto escolares. Pero los trabajos realizados por nuevos investigadores han puesto de manifiesto la falsedad de esta teoría.

Esta vejiga interviene indudablemente en la natación del pez, puesto que los peces privados artificialmente de este órgano pueden mantenerse en el agua únicamente a costa de un intenso trabajo con las aletas. En cuanto dejan de mover las aletas se van al fondo. ¿Cuál es, pues, la función de la vejiga natatoria? El papel que desempeña es muy limitado; ayuda al pez a permanecer a una profundidad determinada, o más concretamente, a la profundidad en que el peso del agua que desaloja su cuerpo es igual al del propio pez. Cuando el pez, moviendo las aletas, baja a una capa *inferior* a este nivel, su cuerpo experimenta una presión exterior mayor por parte del agua y se contrae comprimiendo la vejiga. De esta forma el peso del agua que desaloja disminuye y resulta menor que el del pez y éste desciende. Cuanto mayor es la profundidad a que baja el pez, tanto mayor es la presión que sobre él ejerce el agua (esta presión aumenta en 1 atmósfera cada 10 metros de profundidad), tanto más se comprime el cuerpo del pez y su descenso se hace más rápido.

Lo mismo ocurre, pero en sentido contrario, cuando el pez abandona la capa en que se halla en equilibrio y moviendo sus aletas se eleva a capas superiores. Su cuerpo se libera de una parte de la presión exterior, pero su vejiga, que sigue estando a la misma presión que cuando estaba en equilibrio con la del agua circundante más profunda, hace que se hinche, es decir, que aumente de volumen y, por consiguiente, se eleva. Cuanto más sube el pez, más se hincha su cuerpo y más rápida se hace la ascención. El pez no puede oponerse a esto "comprimiendo su vejiga natatoria" por la sencilla razón de que las paredes de ésta carecen de fibras musculares que permitan variar su volumen activamente.

El hecho de que el volumen del cuerpo de los peces aumente en realidad de una *forma pasiva* se demuestra con el siguiente experimento (fig. 79). Una breca cloroformada se coloca en una vasija con agua (cerrada) en la que se mantiene una presión semejante a la de la profundidad del agua en que vive el pez en condiciones normales. En la superficie del agua el pez permane-

Fig. 79. Experimento con la breca.

cerá inmóvil con el vientre hacia arriba. Si hacemos que se sumerja un poco, volverá a subir a la superficie. Cuando lo sumergimos hasta cerca del fondo, se hunde. Pero entre estos dos niveles existe una capa de agua en la cual el pez permanece en equilibrio y ni se hunde ni sale a flote. Esto se comprende fácilmente si recordamos lo que hemos dicho antes, de que la vejiga natatoria se hincha y se comprime de forma pasiva.

Por lo tanto, a pesar de la idea tan difundida que existe, los peces no pueden voluntariamente hinchar o deshinchar su vejiga natatoria. El volumen de esta vejiga varía pasivamente, es decir, por la acción mayor o menor que sobre ella ejerce la presión exterior (de acuerdo con la ley de Boyle y Mariotte). Estas variaciones de volumen no benefician al pez, al contrario, le perjudican, puesto que hacen que descienda irresistible y aceleradamente hasta el fondo o que ascienda de la misma forma hasta la superficie. En otras palabras, la vejiga solamente sirve para que el pez conserve el equilibrio cuando está inmóvil, pero este equilibrio es *inestable*.

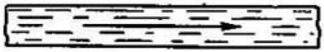
Este es el verdadero papel de la vejiga natatoria cuando se habla de cómo interviene en la natación. Pero la vejiga realiza además otras funciones en el organismo del pez, aunque cuáles son exactamente estas funciones todavía no está claro, ya que este órgano sigue siendo hasta ahora enigmático. Lo único que se puede considerar completamente esclarecido es su papel hidrostático.

Las observaciones de los pescadores confirman lo que hemos dicho. Cuando pescan un pez a gran profundidad y se les escapa dentro del agua al subirlo, en contra de lo que pudiera esperarse el pez sale rápidamente a la superficie, en vez de volverse a la profundidad de donde lo sacaron. A estos peces les suele asomar la vejiga por la boca.

ONDAS Y REMOLINOS

Muchos de los fenómenos físicos que vemos a diario no se pueden explicar basándose en las leyes elementales de la Física. Incluso un fenómeno tan corriente como el oleaje del mar en días de viento es inexplicable ateniéndose a los límites del curso es-

Fig. 80. Corriente tranquila ("laminar") de un líquido por un tubo.



colar de Física. Pero, ¿por qué cuando un barco corta con su proa el agua tranquila se forman ondas que corren hacia los lados? ¿Por qué ondean las banderas cuando hace viento? ¿Por qué la arena de las playas forma ondas? ¿Por qué forma remolinos el humo que sale de las chimeneas de las fábricas?

Para explicar estos y otros fenómenos semejantes hay que conocer lo que se llama movimiento *turbulento* de los líquidos y de los gases. Aquí procuraremos decir algo de los fenómenos de carácter turbulento y de sus propiedades fundamentales, ya que en los libros de texto de las escuelas apenas si se mencionan.

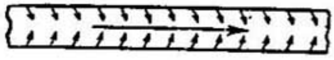
Supongamos que un líquido corre por un tubo. Si al ocurrir esto todas las partículas del líquido se mueven a lo largo del tubo formando líneas paralelas tenemos el caso más sencillo de movimiento de un líquido, el flujo tranquilo o como dicen los físicos, "laminar". Pero este no es el caso más frecuente. Al contrario, lo ordinario es que el líquido corra por el tubo desordenadamente, que forme remolinos que van de las paredes al eje del tubo. Esto es lo que se llama movimiento *turbulento.* Así es como corre el agua por las tuberías de la red de abastecimiento (pero no por los tubos delgados, donde la corriente es laminar). El movimiento turbulento se produce siempre que la velocidad que lleva un líquido determinado al pasar por un tubo (de diámetro determinado) alcanza cierta magnitud, que se llama velocidad *crítica**.

Los remolinos que forma un líquido transparente al correr por un tubo de vidrio se pueden ver echando en aquél un poco de polvo ligero, por ejemplo, polvos de licopodio. Así se ven perfectamente cómo los remolinos van desde las paredes al eje del tubo.

Esta propiedad del movimiento turbulento se aprovecha en la tecnica en los frigoríficos y refrigeradores. Cuando un líquido circula con movimiento turbulento por un tubo de paredes re-

* La velocidad crítica de un líquido cualquiera es directamente proporcional a su viscosidad e inversamente proporcional a su densidad y al diámetro del tubo por que corre.

Fig. 81. Corriente "turbulenta" de un líquido por un tubo.



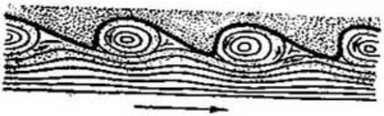


Fig. 82. Formación de las ondas en la arena de la playa por la acción de los remolinos del agua.

frigeradas, sus partículas entran más pronto en contacto con las paredes frías que si se moviera sin formar remolinos. No hay que olvidarse de que los líquidos son malos conductores del calor y que si no se remueven se calientan o se enfrían muy despacio. El intenso intercambio calorífico y material que realiza la sangre en los tejidos que baña también es posible gracias a que su circulación por los vasos sanguíneos no tiene carácter laminar, sino turbulento.

Esto que hemos dicho no se refiere solamente a los tubos, sino también a los canales abiertos y a los cauces de los ríos. El agua que corre por los ríos y canales tiene movimiento turbulento. Cuando se mide con precisión la velocidad de la corriente de un río, el instrumento registra pulsaciones, sobre todo cerca del fondo. Estas pulsaciones demuestran que la corriente cambia constantemente de dirección, es decir, que existen remolinos. Las partículas de agua del río no se mueven únicamente a lo largo del cauce, sino también de sus orillas al centro. Por eso no es cierto lo que dicen de que en el fondo de los ríos profundos el agua tiene la misma temperatura (+4°C) durante todo el año. Debido a la remoción que hay en ellos, el agua de los ríos (no de los lagos) tiene una temperatura igual junto al fondo y en la superficie*.

Los remolinos que se originan en el fondo del río arrastran consigo la arena más ligera y forman en él "ondas" de arena. Esto mismo se puede observar en las orillas del mar bañadas por las olas (fig. 82). Si el agua que corre junto al fondo del río fuera tranquila, la arena presentaría en él una superficie lisa.

De esta forma, junto a la superficie de los cuerpos que baña el agua se forman remolinos. Prueba de la existencia de estos remolinos es, por ejemplo, la forma ondulante que toma una cuerda extendida a lo largo de la corriente (cuando uno de sus

* Véase mi libro "¿Sabe usted Física?", § 133.

Fig. 83. El movimiento ondulatorio de una cuerda en agua corriente se debe a la formación de remolinos.

extremos está atado y el otro libre). ¿Por qué ocurre esto? Porque el trozo de cuerda junto al cual se forma un torbellino (remolino) es atraído por él; pero un momento después este trozo será movido ya por otro remolino en sentido contrario, esto da lugar a que la cuerda se mueva como una serpiente (fig. 83).

Pasemos ahora de los líquidos a los gases, del agua al aire. ¿Quién no ha visto como los remolinos de aire arrastran el polvo que hay en el suelo, la paja, etc.? Esto no es más que una manifestación del movimiento turbulento del aire a lo largo de la superficie de la tierra. Cuando el aire corre a lo largo de una superficie acuática, en los sitios en que se forman remolinos, debido a la depresión que en ellos se produce, se eleva el agua formando una cresta, así se origina el oleaje. Esta misma causa da lugar a las ondas arenosas que vemos en los desiertos y en las faldas de las dunas.

Ahora se comprende por qué ondean las banderas cuando hace viento. Con ellas ocurre lo mismo que con la cuerda en la corriente de agua. Las veletas no señalan constantemente la misma dirección cuando hace viento, sino que, sometidas a la acción de los remolinos, oscilan constantemente. El origen de los remolinos que forma el humo que sale de las chimeneas de las fábricas también es éste. Los gases que suben por la chimenea adquieren un movimiento turbulento que después de salir de ella prosigue durante cierto tiempo por inercia.

El movimiento turbulento del aire tiene gran importancia para la aviación. Las alas de los aviones se hacen de tal forma que debajo de ellas el sitio de enrarecimiento del aire resulta ocupado por el cuerpo de la propia ala, mientras que encima de ella, por el contrario, se intensifica el movimiento turbulento. A

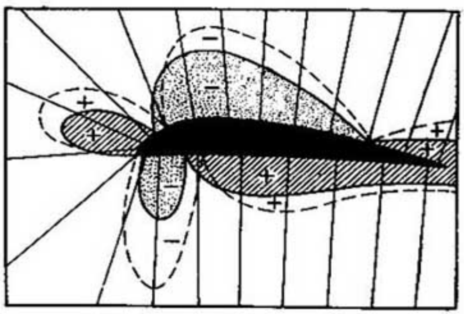


Fig. 84. Fuerzas que actúan sobre el ala de un avión. Distribución de las presiones (+) y de los enrarecimientos (—) del aire en torno al ala según los experimentos realizados. Como resultado de todas las fuerzas aplicadas, de empuje y de succión, el ala es arrastrada hacia arriba. (Las líneas de contorno de trazo continuo representan la distribución de las presiones; las de trazo punteado representan esto mismo, pero cuando la velocidad de vuelo es mucho mayor.)

consecuencia de esto, el ala sufre por abajo un empuje y por arriba una succión (fig. 84). Fenómenos parecidos tienen lugar cuando los pájaros planean con las alas extendidas.

¿Cómo actúa el viento sobre un tejado sometido a él? Los remolinos crean sobre el tejado un enrarecimiento del aire; el aire que hay debajo del tejado tiende a igualar la presión y al subir le empuja desde abajo. Así ocurre lo que a veces tenemos que lamentar; el viento se lleva algún tejado ligero por estar mal sujeto. Por esta misma razón los vidrios de ventana grandes se cimbran hacia afuera cuando hace viento (y no se rompen por la presión exterior).

Pero estos fenómenos son más fáciles de explicar por el hecho de que cuando el aire se mueve, disminuye la presión (véase "Teorema de Bernoulli" pág 124).

Cuando una corriente de aire, de temperatura y humedad determinadas, se mueve a lo largo de otra corriente de aire, de temperatura y humedad distintas, se producen remolinos en las dos. La diversidad de formas que presentan las nubes se debe en gran parte a esta causa.

Vemos, pues, que el círculo de los fenómenos relacionados con el movimiento turbulento de los líquidos y los sólidos es muy amplio.

VIAJE AL CENTRO DE LA TIERRA

Hasta ahora nadie ha penetrado en la Tierra a una profundidad mayor de 3,3 km. El radio de la Tierra tiene 6 400 km. Hasta el centro de la Tierra queda aún mucho camino que recorrer. Pero la inventiva de Julio Verne hizo penetrar profundamente en las entrañas de la Tierra a dos de sus héroes, el extravagante profesor Lidenbrock y su sobrino Axel. En la novela "Viaje al centro de la Tierra" se describen las extraordinarias aventuras de estos viajeros subterráneos. Entre otras cosas inesperadas con que se encontraron debajo de tierra figura el aumento de la densidad del aire. A medida que aumenta la altura el aire se va enrareciendo con bastante rapidez. Cuando la altura aumenta en progresión aritmética, la densidad disminuye en progresión geométrica. Por el contrario, cuando se desciende más abajo del nivel del mar, el aire sometido a la presión de las capas superiores debe hacerse cada vez más denso. Los viajeros subterráneos tenían que notar esto forzosamente. A continuación reproducimos una conversación entre el tío-científico y su sobrino a 12 leguas (48 km) bajo tierra.

"— ¿Qué marca el manómetro? — preguntó el tío.

— Una presión muy grande.

— Ahora comprenderás que bajando poco a poco nos vamos acostumbrando al aire denso y no sentimos molestias.

— ¿Y el dolor de oídos?

— ¡Tonterías!

— Está bien — dije yo, decidido a no contradecir a mi tío —. El estar rodeado de aire denso resulta incluso agradable. ¿Se ha dado usted cuenta de lo fuerte que se oyen los sonidos?

— Claro. En esta atmósfera hasta los sordos podrían oír.

— Pero el aire se irá haciendo cada vez más denso. ¿No alcanzará al fin una densidad como la del agua?

— Naturalmente. Cuando la presión sea de 770 atmósferas.

— ¿Y cuando la profundidad sea mayor?

— La densidad también será mayor.

— ¿Cómo vamos a descender entonces?

— Nos llenaremos los bolsillos de piedras.

— Ah, tío, usted siempre encuentra respuesta.

No volví a meterme en averiguaciones, porque si no podía pensar cualquier otra dificultad que irritaría a mi tío. Sin embargo, me parecía claro que a una presión de varios miles de atmósferas el aire puede pasar al estado sólido. En estas condiciones, aun suponiendo que pudiéramos soportar esta presión, tendríamos que detenernos. Aquí todas las discusiones serían inútiles".

Esto es lo que dice el novelista. Pero si comprobamos los hechos de que se habla en este fragmento resulta otra cosa Para esto no tendremos que bajar al centro de la Tierra. Para nuestra pequeña excursión por el campo de la Física basta tener un lápiz y una hoja de papel.

En primer lugar procuremos determinar a qué profundidad hay que bajar para que la presión atmosférica aumente en una milésima. La presión atmosférica normal es igual a 760 mm de la columna de mercurio. Si estuviéramos sumergidos no en el aire, sino en mercurio, tendríamos que descender nada más que $\frac{760}{1000}=$ $=0,76$ mm para que la presión aumentase en una milésima. En el aire tendremos que bajar mucho más: tantas veces más como el mercurio es más pesado que el aire, es decir, 10 500 veces. Por lo tanto, para que la presión aumente en una milésima de la normal tendremos que descender no 0,76 mm, como en el mercurio, sino $0,76\times10\,500$ mm, es decir, cerca de 8 m. Cuando bajemos otros 8 m la presión del aire aumentará en otra milésima de la magnitud anterior, y así sucesivamente*. Cualquiera que sea el nivel a que nos hallemos, en el "techo del mundo" (22 km), en el pico del Everest (9 km) o junto a la superficie del mar, tendremos que descender 8 m para que la presión del aire aumente en una milésima de su valor inicial. Por consiguiente, obtenemos la siguiente tabla del aumento de la presión del aire al aumentar la profundidad:

La presión al nivel del mar es de	760 mm,	igual a la normal.	
" " a la profundidad de	8 m es	" " 1,001	de la normal
" " " " " "	2×8 m es	" " $(1{,}001)^2$	" " "
" " " " " "	3×8 m "	" " $(1{,}001)^3$	" " "
" " " " " "	4×8 m "	" " $(1{,}001)^4$	" " "

En general, a una profundidad de $n \times 8$ m la presión atmosférica será mayor que la normal $(1{,}001)^n$ veces y, mientras la presión no sea demasiado grande, el mismo número de veces aumentará la densidad del aire (por la ley de Mariotte).

Según la novela, en nuestro caso se trata de una profundidad de 48 km bajo tierra, por lo tanto, puede despreciarse la disminución de la gravedad y la del peso del aire que ella determina.

Ahora podemos calcular, aproximadamente, la presión que soportaban los viajeros de Julio Verne a la profundidad de 48 km (48 000 m). En este caso la n de nuestra fórmula será igual a $\frac{48\,000}{8} = 6\,000$. Hay, pues, que calcular $1{,}001^{6\,000}$. Como multiplicar 1,001 por sí mismo 6 000 veces resultaría aburridillo y nos llevaría mucho tiempo, recurriremos a los logaritmos que, como dijo Laplace, ahorran trabajo y duplican la vida del que calcula**.

* En la siguiente capa de 8 m el aire será más denso que en la anterior y, por lo tanto, el incremento de la presión en magnitud absoluta también será mayor que en la capa anterior. Así es efectivamente, puesto que tomamos la milésima parte de una magnitud mayor.

** Aquellos que al terminar la escuela hayan conservado antipatía por las tablas de logaritmos es posible que varíen este sentimiento hacia ellas cuando conozcan cómo las caracterizaba el gran astrónomo francés en su obra "Exposición del sistema del mundo": "El invento de los logaritmos, al reducir los cálculos de varios meses al trabajo de varios días, es algo que duplica la vida de los astrónomos y los libera del cansancio y de los errores inevitables cuando los cálculos son muy largos. Este descubrimiento es halagüeño para la inteligencia humana, puesto que es totalmente producto de ella. En la técnica el hombre utiliza para aumentar su poder los materiales y las fuerzas que le brinda la naturaleza que lo rodea, pero los logaritmos son el resultado de su propia inteligencia".

Tomando logaritmos tenemos que el de la incógnita será igual a

$$6\,000 \times \lg 1{,}001 = 6\,000 \times 0{,}00043 = 2{,}6.$$

Por el logaritmo 2,6 hallamos el número buscado. Este número es el 400.

Así tenemos que a 48 km de profundidad la presión atmosférica es 400 veces mayor que la normal. La densidad del aire sometido a esta presión, como demuestran los experimentos realizados, aumenta 315 veces. Por esto parece un poco extraño que nuestros viajeros subterráneos no sintieran más molestias que "dolor en los oídos". Pero en la novela de Julio Verne se habla de que los hombres pueden llegar a profundidades de 120 y hasta de 325 km. La presión del aire sería entonces monstruosa; mientras que la presión máxima que el hombre puede soportar sin perjuicio para su salud es de tres o cuatro atmósferas.

Si por esta misma fórmula quisiéramos calcular a qué profundidad la densidad del aire será igual que la del agua, es decir, 770 veces mayor que la normal, obtendríamos la cifra de 53 km. Pero este resultado es falso, ya que a grandes presiones la densidad del gas no es directamente proporcional a la presión. La ley de Mariotte es justa únicamente cuando las presiones no son excesivamente grandes, es decir, cuando no pasan de centenares de atmósferas. A continuación damos los datos relativos a la densidad del aire obtenidos experimentalmente:

Presión		Densidad
200	atmósferas	190
400	"	315
600	"	387
1 500	"	513
1 800	"	540
2 100	"	564

Como puede verse, el aumento de la densidad queda muy retrasado con respecto al incremento de la presión. En vano el sabio de la novela de Julio Verne esperaba poder llegar a una profundidad en que el aire fuera más denso que el agua. Esto no lo hubiera podido conseguir nunca, ya que el aire llega a tener la densidad del agua a la presión de 3 000 atmósferas y después casi no se comprime. En cuanto a solidificar el aire a costa solamente de la presión, sin enfriarlo intensamente (hasta una temperatura menor de — 146°), ni hablar del asunto.

Pero hay que ser justos y reconocer que cuando Julio Verne publicó su novela aún no se conocían los hechos que acabamos de citar. Esto justifica al autor, aunque no corrija la narración.

Antes de terminar, aprovechemos la fórmula que hemos deducido antes para determinar cuál es la profundidad máxima de una mina a la que el hombre pueda descender sin perjuicio para su salud. La presión máxima que puede soportar bien nuestro organismo es de 3 atmósferas. Llamando x a la profundidad de la mina que buscamos, tendremos la ecuación:

$$(1{,}001)^{\frac{x}{8}}=3,$$

de donde (tomando logaritmos) calculamos x. Obtenemos que $x=8{,}9$ kilómetros.

Por lo tanto, el hombre podría encontrarse, sin perjuicio para su salud, a una profundidad de cerca de 9 km. Si el Océano Pacífico se secara, se podría vivir en casi todas las partes de su fondo*.

EN UNA MINA PROFUNDA

¿Quién ha llegado más cerca del centro de la Tierra? (En realidad, no en las novelas.) Los mineros, naturalmente. Ya sabemos (véase el cap. IV) que la mina más profunda se encuentra en Africa del Sur. Su profundidad es mayor de 3 km. Al decir esto tenemos en cuenta no la penetración de los taladros de perforación de pozos, que han alcanzado hasta 7,5 km, sino las profundidades a que han penetrado los propios hombres. El escritor francés, doctor Luc Durtain que visitó un pozo de la mina Morro Velho, cuya profundidad es de cerca de 2 300 m, escribía:

"Los célebres yacimientos auríferos de Morro Velho se encuentran a 400 km de Río de Janeiro. Después de 16 horas de viaje en tren por sitios montañosos, descendemos a un valle profundo rodeado por la selva. Una compañía inglesa explota aquí filones auríferos a una profundidad a la que antes nunca había descendido el hombre.

El filón va oblicuamente hacia abajo. La mina lo sigue formando seis pisos. Pozos verticales y galerías horizontales. Un hecho que caracteriza extraordinariamente a la sociedad contemporánea es que la mina más profunda que se ha abierto en la corteza terrestre, el intento más intrépido hecho por el hombre para penetrar en las entrañas de la Tierra, es para buscar oro

* Las investigaciones llevadas a cabo durante los últimos años han demostrado que el hombre puede soportar, sin perjuicio para su organismo, presiones mayores de 30 atmósferas. Esto ha permitido sumergirse en el mar, sin escafandra, hasta profundidades mayores de 300 metros.

Póngase la ropa de trabajo de lona y la cazadora de cuero. Tenga cuidado; cualquier piedrecita que caiga por el pozo puede herirle. Nos va a acompañar uno de los "capitanes" de la mina. Entra usted en la primera galería. Está bien iluminada. Un viento helado a 4° le hace temblar; es la ventilación para refrigerar las profundidades de la mina.

Después de descender en una estrecha jaula metálica por el primer pozo hasta una profundidad de 700 m, llega usted a la segunda galería. Baja usted por el segundo pozo. El aire está caliente. Ya está usted más bajo que el nivel del mar.

A partir del pozo siguiente el aire quema la cara. Sudando a chorros y agachado, porque el techo es bajo, avanza usted en dirección al ruido de las máquinas perforadoras. Envueltos en un polvo denso trabajan unos hombres semidesnudos; el sudor chorrea por sus cuerpos; las botellas de agua pasan de mano en mano. No toque usted los trozos de mineral recién desprendidos, están a 57° de temperatura.

¿Y para qué esta realidad tan espantosa y abominable?

— Cerca de 10 kilogramos de oro al día ..."

Al describir las condiciones físicas que existían en el fondo de la mina y el grado de explotación a que estaban sometidos los mineros, el autor francés menciona la alta temperatura pero nada dice de que la presión del aire fuera grande. Calculemos cuál será esta presión a 2 300 m de profundidad. Si la temperatura fuera la misma que en la superficie de la tierra, de acuerdo con la fórmula que conocemos, la densidad del aire aumentaría en

$$(1{,}001)^{\frac{2\,300}{8}} = 1{,}33 \text{ veces.}$$

Pero en realidad la temperatura no permanece invariable. sino que se eleva. Por esto la densidad del aire no aumenta tanto, sino menos. En definitiva, tenemos que la diferencia entre la presión del aire en el fondo de la mina y en la superficie de la tierra no es más que un poco mayor que la que existe entre la del aire caliente del verano y la del aire frío del invierno. Por esto se comprende que esta circunstancia no llamase la atención del visitante de la mina.

En cambio tiene mucha importancia la notable humedad del aire a estas mismas profundidades, que hace que la permanencia en ellas sea insoportable cuando la temperatura es alta. En una de las minas de África del Sur (Johannesburg), de una profundidad de 2 553 m, a 50° de temperatura la humedad llega al 100%; en esta mina se instaló lo que se llama "clima artificial". La acción refrigerante de esta instalación equivale a 2 000 t de hielo.

A LAS ALTURAS EN UN ESTRATOSTATO

En los artículos anteriores hemos viajado mentalmente por las entrañas de la Tierra. Nos ha ayudado a realizar estos viajes la fórmula que relaciona la presión del aire con la profundidad. Ahora vamos a tener el valor de remontarnos a las alturas y aplicando esta misma fórmula veremos como varía la presión del aire en ellas. En este caso la fórmula toma el aspecto siguiente:

$$p = 0{,}999^{\frac{h}{8}},$$

donde p es la presión en atmósferas y h es la altura en metros. El número decimal 0,999 ha sustituido al 1,001, porque cuando nos trasladamos hacia arriba 8 m la presión no aumenta en 0,001, sino que *disminuye* en 0,001.

Para empezar resolvamos el problema siguiente: ¿A qué altura hay que elevarse para que la presión del aire se reduzca *a la mitad*?

Para esto haremos $p=0{,}5$ en nuestra fórmula y buscaremos la altura h. Tendremos la ecuación:

$$0{,}5 = 0{,}999^{\frac{h}{8}},$$

cuya resolución no presenta dificultades para los lectores que sepan manejar los logaritmos. La respuesta $h=5{,}6$ km determina la altura a la cual la presión del aire debe reducirse a la mitad.

Sigamos subiendo tras los valerosos aeronautas soviéticos que en los estratostatos "URSS" y "OAX — 1" establecieron en 1933 y 1934 respectivamente los records del mundo de altura, el primero con una marca de 19 km y el segundo con la de 22 km. Estas altas regiones de la atmósfera se hallan ya en la llamada "estratosfera". Por esto, los globos en que se realizaron estas ascensiones no se llaman aeróstatos, sino estratostatos.

Calculemos cuál es la presión atmosférica a esas alturas.

Para la altura de 19 km hallamos que la presión del aire debe ser

$$0{,}999^{\frac{19\,000}{8}} = 0{,}095 \text{ atm} = 72 \text{ mm}.$$

Para los 22 km de altura

$$0{,}999^{\frac{22\,000}{8}} = 0{,}066 \text{ atm} = 50 \text{ mm}.$$

Pero si leemos las notas de los "estratonautas" veremos que a las alturas antedichas se indican otras presiones. A 19 km de altura la presión era de 50 mm y a la de 22 km, de 45 mm.

¿Por qué no se cumplen los cálculos? ¿En qué consiste nuestro error?

La ley de Mariotte para los gases es perfectamente aplicable a estas presiones tan bajas. Pero cometimos un error al considerar que la temperatura del aire es igual en todo el espesor de los 20 km, cuando en realidad desciende notablemente al aumentar la altura. Se considera que, por término medio, la temperatura desciende 6,5° por cada kilómetro de elevación. Así ocurre hasta los 11 km de altura, donde es igual a 56° bajo cero. Después, durante un espacio considerable permanece invariable. Si tenemos en cuenta esta circunstancia (para esto no son suficientes los procedimientos de las matemáticas elementales), se obtiene un resultado que concuerda mucho mejor con la realidad. Por esta misma razón, los resultados de los cálculos que antes hicimos, relativos a la presión del aire a grandes profundidades, también deben considerarse solamente como aproximados.

Para terminar debemos decir que el "techo" alcanzado por el hombre ahora es mucho más alto. Muchos aviones fabricados en serie vuelan ya a 25—30 kilómetros de altura. En el año 1961 los aviadores soviéticos establecieron el record del mundo de altura con una marca de 34,7 km.

Capítulo 7 **FENOMENOS TERMICOS**

EL ABANICO

Cuando las señoras se abanican sienten fresco. Al parecer esto no perjudica a nadie, más bien al contrario, todos los presentes deben estarles agradecidos por enfriar el aire de la sala.

Veamos si esto es así en realidad. ¿Por qué sentimos fresco cuando nos abanicamos? El aire que está en contacto directo con nuestra cara se calienta y forma una especie de máscara de aire caliente que nos da "calor", es decir, que impide que sigamos cediendo calor. Cuando el aire que nos rodea está quieto, la capa que rodea la cara se desplaza muy lentamente empujada hacia arriba por el aire menos caliente y más pesado. Pero al abanicarnos quitamos la máscara de aire caliente antedicha y nuestra cara se pone en contacto con nuevas porciones de aire menos calientes a las cuales cede calor. Por esto, nuestro cuerpo se enfría y sentimos fresco.

De esto se deduce que cuando las señoras se abanican apartan de sus rostros el aire caliente y lo reemplazan por aire fresco; cuando este último se caliente sigue la misma suerte y es sustituido por una nueva porción menos caliente, y así sucesivamente.

La acción de los abanicos acelera la remoción del aire y hace que la temperatura de éste se equilibre pronto en toda la sala, es decir, hace que las propietarias de los abanicos se sientan mejor a costa del aire más fresco que rodeaba al resto del público. En la acción del abanico interviene también otra circunstancia de la cual vamos a hablar a continuación.

¿POR QUE HACE MAS FRIO CUANDO SOPLA EL VIENTO?

Los habitantes de los países fríos saben muy bien que cuando no hace viento se soportan mucho mejor las heladas que cuando lo hace. Pero no todos comprenden exactamente la causa de este fenómeno. Cuando hace viento sienten más frío los *seres vivos,* pero el termómetro no baja más por esto. La sensación de frío intenso que se nota cuando hiela y hace viento se debe, en primer lugar, a que la cara (y todo el cuerpo) cede mucho más calor que cuando el tiempo está en calma, es decir, que cuando el aire calentado por el cuerpo no se renueva rápidamente por otras porciones de aire frío. Cuanto más fuerte sea el viento, tanto mayor será la masa de aire que tiene tiempo de entrar en contacto con nuestro cuerpo durante cada minuto, por consiguiente, mayor será la cantidad de calor que cede nuestro cuerpo por minuto. Esto ya es suficiente de por sí para producir la sensación de frío. Pero existe además otra causa. Nuestra piel transpira humedad incluso cuando el aire está frío. Para esto hace falta calor; este calor procede de nuestro cuerpo y de la capa de aire que está en contacto con él. Cuando el aire está en reposo la transpiración es lenta, ya que la capa que está en contacto con la piel se satura pronto de vapor de agua (y en el aire saturado la evaporación no es intensa). Pero cuando el aire se mueve y se renueva constantemente el que está en contacto con la piel, la transpiración es abundante durante todo el tiempo y consume una gran cantidad de calor, que tiene que ceder el cuerpo.

¿Es muy grande la acción refrigerante del viento? Depende de su velocidad y de la temperatura del aire. Por lo general es mayor de lo que generalmente se cree. Citaré un ejemplo que da una idea de la disminución de la temperatura que suele ocasionar el viento. Supongamos que el aire tiene una temperatura de +4°C y que no hace viento en absoluto. En estas condiciones nuestra piel tiene 31°C de temperatura. Si sopla un viento ligero, de los que apenas hacen que se muevan las banderas y que no mueven las hojas de los árboles (con velocidad de 2 m por seg.), la piel se enfría 7°C. Y cuando el viento hace que las banderas ondeen (velocidad de 6 m por seg.), el enfriamiento es de 22°C, es decir, la temperatura de la piel baja hasta ... ¡9°C! Estos datos han sido tomados del libro de N. N. Kalitin "Fundamentos de la Física atmosférica aplicada a la medicina". En este libro se pueden encontrar cosas muy interesantes

De lo que acabamos de decir se desprende que para saber cómo se va a sentir una helada no es suficiente conocer la temperatura del aire, sino que hay que tener también en cuenta la velocidad del viento. Una misma helada se soporta, por lo general, peor en Leningrado que en Moscú, porque la velocidad media del viento a orillas del Mar Báltico es de 5—6 m por segundo, mientras que en Moscú es de 4,5 m por segundo solamente. Las heladas se soportan mejor aún en la Transbaikalia, donde la velocidad media del viento es de 1,3 m. Los famosos fríos de la Siberia Oriental, que llegan frecuentemente a 40—60°C bajo cero, no se sienten tanto como creemos en Europa los que estamos acostumbrados a los vientos fuertes. En la Siberia Oriental casi no hace viento en invierno.

EL HALITO SOFOCANTE DE LOS DESIERTOS

"Quiere decir que el viento debe refrescar hasta cuando hace un calor bochornoso — es posible que diga el lector, después de lo que hemos dicho en el artículo anterior —, ¿Por qué hablan entonces los viajeros del *hálito sofocante* de los desiertos?"

Esta contradicción se explica, porque en los climas tropicales el aire suele estar *más caliente que nuestro cuerpo*. Por lo tanto, no tiene nada de particular que allí, cuando hace viento, sientan las personas más calor, puesto que en estas condiciones el calor no se transmite del cuerpo al aire, sino del aire al cuerpo. Por esto, cuanto mayor es la masa de aire que entra en contacto con el cuerpo cada minuto, tanto más fuerte es la sensación de calor. Es verdad que aquí también es mayor la transpiración cuando hace viento, pero la causa anterior desempeña un papel mucho más importante. Esta es la razón por la cual los habitantes del desierto, como los turkmenos, por ejemplo, llevan batas de abrigo y gorros de piel.

¿DAN CALOR LOS VELOS?

Este es otro problema de la Física de la vida ordinaria. Las señoras aseguran que el velo abriga, que sin él se siente frío en el rostro. Pero los hombres, cuando ven un tejido tan tenue y de mallas tan amplias, no suelen dar crédito a esta afirmación y piensan que es pura fantasía de las mujeres.

No obstante, si recordamos lo dicho anteriormente, se comprende que hay que ser más crédulos. Por muy grandes que sean las mallas del velo, el aire que pasa por ellos pierde velocidad. Este tejido tan sutil retiene la capa de aire que está en contacto directo con la cara (y que calentada por ella le sirve de máscara de aire caliente), que ya no puede ser arrastrada por el viento tan fácilmente como sin el velo. Por esto no hay motivos para no creer que con el velo se enfría menos la cara que sin él, sobre todo cuando el frío no es muy intenso ni el viento muy fuerte.

Estas vasijas de arcilla porosa tienen la propiedad de que el agua que se echa en ellas se pone más fría que todas las cosas que hay a su alrededor. En España estas vasijas reciben el nombre de alcarrazas (botijos, jarras), en Egipto el de "goula" y en otros países se llaman de otras formas.

El secreto de la acción refrigerante de las alcarrazas es muy sencillo: el agua rezuma hacia afuera por las paredes de arcilla y se va evaporando poco a poco, con lo cual quita calor al recipiente y al líquido que tiene dentro.

Pero el enfriamiento que producen estas vasijas no puede ser muy grande y depende de muchas condiciones. Cuando más caliente esté el aire, más rápida e intensa será la evaporación del líquido que humedece la vasija por fuera y, por consiguiente, tanto más se enfriará el agua que hay dentro de ella. El enfriamiento también depende de la humedad del aire. Si el aire es muy húmedo, la evaporación será lenta y el agua se enfriará poco. Por el contrario, cuando el aire es seco se produce una evaporación intensa que hace que el agua se enfríe más. El viento también acelera la evaporación y facilita el enfriamiento. Esto último es cosa que sabe todo el mundo, por la sensación de frío que se nota (aunque el día sea caluroso) cuando se tienen los vestidos mojados y hace viento.

La disminución de temperatura que se consigue con las jarras refrigerantes no es mayor de 5°C. En días de calor meridional, cuando el termómetro marca 33°C, el agua de los recipientes refrigerantes tiene la temperatura de un baño templado, es decir, 28°C. Como vemos es una refrigeración inútil prácticamente. Pero en estas jarras se conserva muy bien el agua *fría*. y para esto es principalmente para lo que se emplean.

Podemos intentar hacer el cálculo del grado de enfriamiento del agua que se puede conseguir en las alcarrazas. Supongamos que éstas tienen una capacidad de 5 litros y que se evapora 1/10 parte de litro. Para que se evapore 1 litro de agua (1 kg) hace falta, en los días calurosos (33°C), cerca de 580 calorías. En nuestro caso se evapora 1/10 parte de kilogramo, por consiguiente, se consumirán 58 calorías. Si todo este calor se tomara del agua que hay en la alcarraza, su temperatura descendería 58/5 grados, es decir, *unos 12 grados*. Pero una gran parte del calor necesario para la evaporación se toma de las paredes de la propia alcarraza y del aire que la rodea; por otra parte, sobre el agua no sólo actúan estos factores, que tienden a enfriarla, sino también la acción del aire caliente exterior, que tiende a calentarla. Por esta razón, el enfriamiento apenas si llega a la mitad de la cifra antes obtenida.

Tampoco es fácil decir dónde se refresca más el agua de estas jarras, al sol o a la sombra. Al sol la evaporación es más intensa, pero el calentamiento también es mayor. Por lo visto, lo mejor es ponerlas a la sombra y donde haga un poco de viento.

UNA "NEVERA" SIN HIELO

En el enfriamiento que produce la evaporación se funda también el funcionamiento de una cámara frigorífica para conservar productos alimenticios, es decir, una especie de "nevera" sin hielo. Este frigorífico no es difícil de construir. Hay que hacer un cajón de madera (o mejor de chapa galvanizada) con anaqueles para poner los productos que se desea mantener frescos. En la parte superior del cajón se coloca una cubeta alargada con agua pura fría. En esta cubeta se sumerge el borde de un lienzo que cubre la parte posterior del cajón y que termina en otra cubeta, como la primera, situada debajo del anaquel inferior. El agua circula por el lienzo, lo mismo que si fuera por una mecha, y se va evaporando poco a poco, con lo que se refrigeran todos los departamentos de la "nevera".

Esta "nevera" debe ponerse en un sitio fresco de la casa y cada tarde hay que llenar de agua las cubetas, para que durante la noche se enfríe bien. Las cubetas y el lienzo deben estar limpios.

¿QUE CALOR PODEMOS SOPORTAR?

El hombre puede soportar más calor que se cree de ordinario. En los países del sur puede soportar temperaturas mucho mayores de las que en las latitudes medias consideramos inaguantables. En Australia Central, en verano, no es raro que el termómetro marque 46°C a la sombra (se ha llegado a observar temperaturas de hasta 55°C). Durante la travesía del Mar Rojo y en el Golfo Pérsico, en los camarotes de los barcos la temperatura llega a más de 50°C a pesar de la ventilación.

Las temperaturas más altas que se observan en la superficie de la Tierra no pasan de 57°C. Esta temperatura corresponde al llamado "Valle de la Muerte" en California. El sitio más templado de la Unión Soviética es el Asia Central, donde las temperaturas más altas no pasan de 50°C.

Todas estas temperaturas se refieren a la *sombra*. A propósito de esto, hay que aclarar por qué a los meteorólogos les interesa precisamente la temperatura a la sombra, y no al sol. Es el caso que el termómetro sólo puede medir la temperatura del *aire* a la sombra. Si el termómetro se pone al sol los rayos lo calientan mucho más que al aire que está a su alrededor y por consiguiente, sus indicaciones no sirven para caracterizar el estado térmico del medio aéreo. Por esto, cuando hablamos de tiempo caluroso, carece de sentido referirse a las indicaciones de un termómetro puesto al sol.

Se han hecho experimentos para determinar cuál es la temperatura máxima que puede soportar el organismo humano. Resultó que en una atmósfera de *aire seco* y calentándolo paulatinamente nuestro organismo es capaz de resistir, no sólo la temperatura del agua hirviendo (100°C), sino a veces hasta la de 160°C, como lo demostraron los físicos ingleses Blagden y Centry, los cuales estuvieron horas enteras dentro de un horno de panadería calentado. "En el aire de un local en que el hombre puede permanecer sin detrimento para su salud se puede cocer un huevo o freir un bistec" — escribía Tyndall con motivo de este experimento.

¿Cómo se puede explicar esta resistencia? Por el hecho de que nuestro organismo no adquiere la temperatura del medio en que se encuentra, sino que conserva aproximadamente la suya normal. El organismo lucha contra el calentamiento segregando mucho sudor, cuya evaporación absorbe una parte considerable del calor de la capa de aire que está en contacto directo con la piel y de esta forma disminuye su temperatura. Pero son condiciones necesarias para el éxito del experimento las siguientes: primero, que el cuerpo no esté en contacto directo con la fuente de calor, y segundo, que el aire esté seco.

Por esto es más fácil soportar 37°C de calor en el Asia Central que 24°C en Leningrado, porque en Leningrado el aire es húmedo, mientras que en el Asia Central no llueve casi nunca*.

¿TERMOMETRO O BAROMETRO?

Es bastante popular la anécdota de aquel que no se quiso bañar por la siguiente causa:

— Metí el barómetro en el agua y marcó tempestad, ¡cómo me iba a bañar!

Sin embargo, no siempre se puede distinguir con facilidad un termómetro de un barómetro. Hay unos termómetros, o mejor

* En el mes de junio mi higrómetro de bolsillo marcó dos veces que la humedad era nula (el 13 y el 16 de junio de 1930).

10- 78.

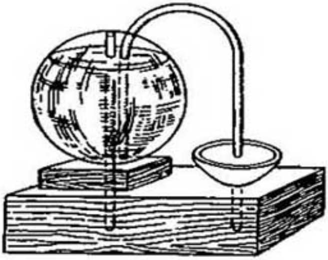


Fig. 85. Termoscopio de Herón.

dicho, termoscopios, que con el mismo derecho se podrían llamar barómetros, y viceversa. Puede servir de ejemplo el antiquísimo termoscopio ideado por Herón de Alejandría (fig. 85). Cuando los rayos del sol calientan la esfera, el aire que hay en su parte superior se dilata, presiona sobre el agua y hace que ésta salga por el tubo encorvado. El agua comienza a gotear por el extremo de este tubo al embudo, desde donde después escurre al cajón inferior. Cuando hace frío, al contrario, el aire que hay en la esfera se contrae y la presión del aire exterior obliga al agua del cajón a subir por el tubo recto a la esfera.

Pero este aparato también es sensible a las variaciones de la presión barométrica. Cuando la presión exterior disminuye, el aire que hay dentro de la esfera conserva la presión anterior, que era más elevada, se dilata y hace que una parte del agua salga por el tubo encorvado y vaya a parar al embudo. Por el contrario, cuando la presión exterior aumenta, una parte del agua que hay en el cajón se ve obligada a pasar a la esfera debido a que la presión exterior es mayor. Cada grado de diferencia de temperatura produce aproximadamente la misma variación en el volumen del aire que hay en la esfera que una variación de presión de $\frac{760}{273} = 2{,}5$ mm de la columna de mercurio. En Moscú, por ejemplo, las oscilaciones barométricas alcanzan 20 o más milímetros, lo que corresponde a 8°C del termoscopio de Herón, es decir, esta disminución de la presión puede confundirse fácilmente con un aumento de temperatura de 8 grados.

Como puede verse, el antiguo termoscopio es en la misma medida un baroscopio. Hace tiempo se vendían barómetros de agua, que al mismo tiempo eran termómetros, aunque, por lo visto, ni el público ni el inventor sospechaban esto.

¿PARA QUE SIRVEN LOS TUBOS DE VIDRIO DE LAS LAMPARAS?

Pocos son los que conocen el largo camino que tuvieron que recorrer los tubos de vidrio de las lámparas hasta llegar a adquirir la forma que ahora tienen. Durante muchos millares de años el hombre se alumbró con llama abierta. Fue necesario el genio de Leonardo de Vinci (1452—1519) para realizar el importante perfeccionamiento de las lámparas que supone el empleo de los tubos. Pero el tubo con que Leonardo rodeó la llama no era de vidrio, sino de metal. Tuvieron que pasar tres siglos más hasta que fue concebida la idea de sustituir el tubo metálico por un cilindro transparente de vidrio. El vidrio de las lámparas es, pues, un invento en el que tomaron parte decenas de generaciones.

Pero, ¿para qué sirve este tubo?

Lo más probable es que no todo el mundo pueda dar una respuesta acertada a esta pregunta tan natural. Porque la protección de la llama contra el viento no es más que una función secundaria del tubo. Su objetivo fundamental es aumentar el *brillo* de la llama acelerando la combustión. El papel de los tubos de las lámparas es anólogo al de las chimeneas de las fábricas o de los hornos, es decir, intensificar el flujo de aire que llega a la llama o, como se suele decir, el "tiro".

Analicemos esto. La llama calienta la columna de aire que hay dentro del tubo mucho más de prisa que el aire que se halla alrededor de la lámpara. Este aire, una vez calentado, se hace más ligero y, de acuerdo con el principio de Arquímedes, es empujado hacia arriba por el aire, más frío y pesado, que entra por abajo a través de los orificios del mechero. De esta forma se mantiene una corriente continua de aire, que va de abajo hacia arriba, que arrastra los residuos de la combustión y trae aire fresco. Cuanto más largo sea el tubo, tanto mayor será la diferencia de peso entre el aire caliente y el frío, más intensa será la corriente de aire fresco y, por consiguiente, la combustión será más rápida. Por esta misma razón se hacen tan altas las chimeneas de las fábricas.

Leonardo de Vinci comprendió perfectamente este fenómeno. Entre sus manuscritos hay una nota que dice: "Cuando se produce fuego se forma a su alrededor una corriente de aire que lo mantiene e intensifica".

¿POR QUE LA LLAMA NO SE APAGA A SI MISMA?

Si se recapacita sobre el problema de la combustión, se plantea forzosamente la pregunta siguiente: ¿por qué la llama no se apaga a sí misma?

Los productos de la combustión, el anhídrido carbónico y el vapor de agua, son *incombustibles* y por lo tanto incapaces de mantener la combustión. La llama, pues, está rodeada desde el primer momento de sustancias incombustibles que impiden la llegada de aire, y como sin aire no es posible la combustión, debe apagarse.

¿Por qué no ocurre esto? ¿Por qué continúa la combustión mientras queda materia combustible? Porque los gases se dilatan al calentarse, y, por consiguiente, *se hacen más ligeros.* Unicamente por esto los productos de la combustión no se quedan junto a la llama en que se formaron, sino que inmediatamente son empujados hacia arriba por el aire fresco. Si el principio de Arquímedes no se extendiera a los gases (o no existiera la gravedad) todas las llamas se apagarían de por sí a poco de empezar a arder.

Convencerse del efecto tan funesto que producen en la llama los productos de la combustión es cosa fácil. Generalmente nos servimos de este efecto, inconscientemente, cuando apagamos una lámpara. ¿Qué hacemos para apagar una lámpara de petróleo? Soplamos por arriba, es decir, hacemos que los productos incombustibles de la combustión vuelvan hacia abajo, hacia la llama; esta última deja de recibir aire y se apaga.

EL CAPITULO QUE LE FALTA A LA NOVELA DE JULIO VERNE

Julio Verne nos cuenta detalladamente en su novela "De la Tierra a la Luna" como sus intrépidos personajes pasaban el tiempo dentro de un proyectil lanzado hacia la Luna. Pero no nos dice cómo Michel Ardan cumplía sus funciones de cocinero en esta situación tan extraordinaria. Por lo visto, el novelista creía que cocinar dentro de un proyectil en vuelo no presenta dificultades dignas de ser descritas. Si esto es así, estaba en un error, porque dentro de un proyectil en vuelo todos los objetos *se hacen ingrávidos**. Julio Verne se olvidó de esto. No obstante, las peripecias que ocurrirían en una cocina ingrávida durante la preparación de la comida son dignas de la pluma de un novelista. Es una lástima que un escritor de tanto talento como Julio Verne no prestase atención a un tema como éste. En vista de esto, procuraré llenar como pueda el hueco del capítulo que le falta a la

* La explicación detallada de este fenómeno se da en el primer libro de *"Física Recreativa"* y en mis libros *"Viajes interplanetarios"*, *"A las estrellas en un cohete"* y *"En cohete a la Luna"*.

novela citada, para darle al lector una idea de lo interesante que hubiera sido esto descrito por el gran novelista.

Cuando el lector lea este artículo no debe olvidar que dentro del proyectil no *existe el peso,* es decir, que todos los objetos son *imponderables.*

EL DESAYUNO EN LA COCINA INGRAVIDA

— Queridos amigos, aún no hemos desayunado — dijo Michel Ardan a sus compañeros de viaje interplanetario —. El hecho de que hayamos perdido nuestro peso en este proyectil no significa que hayamos perdido también el apetito. Ahora mismo les haré un desayuno imponderable que sin duda será el más ligero de cuantos se han hecho hasta ahora en el mundo.

Y sin aguardar contestación se puso a cocinar.

— Esta botella de agua simula que está vacía — murmuró para sí Ardan, mientras abría una gran botella —. Pero no me engañará. Yo sé por qué no pesa ... Bueno, ya hemos sacado el tapón. Haz el favor de verter en la cacerola tu ingrávido contenido.

Por más que inclinaba la botella, el agua no salía.

— No te canses, querido Ardan — dijo Nicholl, acudiendo en su ayuda —. Recuerda que en nuestro proyectil no existe la gravedad y por eso el agua no se derrama. Tendrás que *sacarla* de ahí como si fuera un jarabe espeso.

Ardan no se paró a pensarlo y dio con la palma de la mano un golpe sobre el fondo de la botella. Le esperaba otra sorpresa. En la boca de la botella se formó una bola de agua como un puño de grande.

— ¿Qué le pasa al agua? — se extraño Ardan —. ¡Esto sí que es una sorpresa! Decidme, amigos científicos, ¿qué le pasa al agua?

— Esto no es más que una *gota,* querido Ardan, una simple gota de agua. En el mundo de la ingravidez las gotas pueden ser todo lo grandes que quieras. Recuerda que si los líquidos toman la forma de los recipientes que los contienen, si se derraman formando chorro, etc., es debido a la gravedad. Aquí no existe gravedad, por lo tanto, el líquido está sometido únicamente a sus fuerzas moleculares internas y deberá tomar la forma de esfera, lo mismo que el aceite en el célebre experimento de Plateau.

— ¡Qué me importa a mí Plateau con su experimento! Lo que me hace falta es hervir el agua para el caldo y no hay fuerza molecular que me lo impida — dijo Michel acalorado.

Empezó a sacudir el agua sobre la cacerola, que planeaba en el aire, pero parecía que todo se había confabulado contra él.

Las grandes bolas de agua llegaban a la cacerola y se extendían por su superficie. Pero esto no era todo. Desde las paredes internas el agua se corría a las externas y seguía extendiéndose por ellas. Pronto la cacerola estuvo envuelta en una gran capa de agua. En estas condiciones no había manera de hervirla.

— Esto es un experimento muy interesante que demuestra lo poderosa que es la fuerza de la cohesión — le explicaba tranquilamente Nicholl al furibundo Ardan —. No te pongas nervioso, esto es el caso corriente de un líquido que moja a un sólido, con la particularidad de que en este caso la gravedad no impide que este fenómeno se desarrolle con toda su fuerza.

— ¡Qué lástima que no lo impida! — repuso Ardan —. Moje o no moje, el agua debe estar *dentro* de la cacerola y *no alrededor* de ella. ¡Vaya novedad! ¡Qué cocinero puede hacer un caldo en estas condiciones!

— Si tanto te molesta que el agua moje la cacerola, puedes evitarlo fácilmente — intervino Barbicane para tranquilizarlo —. Acuérdate de que el agua no moja los cuerpos que están recubiertos de grasa, aunque la capa sea muy delgada. Engrasa por fuera tu cacerola y verás como el agua se queda dentro de ella.

— ¡Bravo! ¡Esto es sabiduría! — celebró Ardan y puso en práctica el consejo. Después empezó a calentar el agua a la llama de un mechero de gas.

Realmente todo se unía contra Ardan. El mechero de gas también se encaprichó. Ardió medio minuto con llama mortecina y se apagó sin saber por qué.

Ardan le daba vueltas al mechero, cuidaba con paciencia su llama, pero todo era inútil. La llama se apagaba.

— ¡Barbicane! ¡Nicholl! ¿Es posible que no haya manera de hacer que arde este mechero como es debido, como mandan las leyes de vuestra Física y las normas de las compañías de gas? — exclamó Michel, dirigiéndose a sus amigos.

— Lo que ocurre no es ni extraordinario ni inesperado — le explicó Nicholl —. Esta llama arde como mandan las leyes de la Física. En cuanto a los compañías de gas ... creo que se arruinarían si no existiera la gravedad. Durante la combustión, como tú sabes, se forma anhídrido carbónico y vapor de agua, es decir, gases que no arden. En condiciones normales estos productos de la combustión no se quedan junto a la llama, sino que, como están calientes, son empujados hacia arriba por el aire fresco, que es más pesado. Pero aquí no hay gravedad, por lo tanto, los productos de la combustión se quedan allí donde se producen, rodean la llama con sus gases incombustibles e impiden que llegue hasta ella el aire puro. Por eso aquí arde la llama tan débilmente y se apaga pronto. Los extintores de incendios se basan precisamente en esto, en rodear la llama de un gas incombustible.

— Según dices — le interrumpió Ardan —, si en la Tierra no hubiera gravedad no harían falta los bomberos. Los incendios se apagarían solos, ahogados por su propia exhalación.

— Exactamente. Y ahora, para remediar esto, enciende otra vez el mechero y vamos a soplarle a la llama. Yo creo que conseguiremos crear un tiro artificial y que la llama arderá como en la Tierra.

Así lo hicieron. Ardan volvió a encender el mechero y empezó a cocinar con cierta alegría maliciosa de ver como Nicholl y Barbicane soplaban y abanicaban la llama para que no le faltase aire. Ardan sentía en el fondo de su alma que sus amigos y su ciencia eran los culpables de "toda esta barahúnda".

— Mantenéis el tiro como si fuerais la chimenea de una fábrica — susurró Ardan —. Os tengo lástima, queridos científicos, pero si queréis desayunar caliente no hay más remedio que acatar lo que manda vuestra Física.

Transcurrío un cuarto de hora, media hora, una hora y ... el agua no daba ni señales de empezar a hervir.

— ¡Ten paciencia, querido Ardan! ¿Sabes por qué el agua común, la que pesa, se calienta pronto? Porque en ella se mezclan las capas. Las inferiores, más calientes y menos pesadas, son desplazadas hacia arriba por las más frías. Así se calienta rápidamente todo el líquido. ¿No has intentado nunca calentar agua por arriba? Cuando se hace esto no se produce la remoción de las capas del líquido, puesto que las superiores se calientan y se quedan arriba. Y como el agua conduce mal el calor, se puede hacer que las capas superiores hiervan, mientras que en las inferiores puede haber trozos de hielo que no se derriten. En nuestro mundo sin gravedad puedes calentar el agua por el lado que quieras, el resultado es el mismo, porque como en la cacerola no se puede producir la circulación, el agua se calienta muy despacio. Si quieres que se caliente más de prisa tendrás que removerla tú mismo constantemente.

Nicholl advirtió a Ardan que no era conveniente calentar el agua hasta los 100°C, ya que a esta temperatura se genera mucho vapor, el cual, como tiene aquí el mismo peso específico que el agua (ambos iguales a cero), se mezcla con ella y forma una espuma homogénea.

Los guisantes jugaron otra mala pasada. Cuando Ardan abrió el saquito en que estaban y lo sacudió, los guisantes se esparcieron por el aire y empezaron a deambular por el camarote chocando contra las paredes y rebotando en ellas. Estos guisantes errabundos por poco ocasionan una desgracia. Nicholl suspiró y se tragó uno de ellos; empezó a toser y poco faltó para que se ahogase. Para liquidar este peligro y limpiar el aire, nuestros amigos tuvieron que dedicarse a la caza de los guisantes con una redecilla de mano que llevaba Ardan para "cazar mariposas en la Luna".

Cocinar en estas condiciones era verdaderamente un problema. Ardan llevaba razón cuando decía que aquí hubiera fallado hasta el mejor cocinero.

Freir el bistec también costó lo suyo. Hubo que tener la carne sujeta todo el tiempo con un tenedor, porque los vapores elásticos que se formaban entre ella y la sartén empujaban y la carne a medio freir salía volando hacia "arriba", si es que esta palabra se podía emplear allí, donde no nabía ni "arriba" ni "abajo".

En este mundo sin gravedad el desayuno era un espectáculo digno de verse. Nuestros amigos estaban suspendidos en el aire en las posturas más absurdas y pintorescas y con frecuencia se daban cabezazos unos a otros. A nadie se le ocurrió sentarse. Las sillas, los divanes, los bancos, son totalmente inútiles en el mundo de la ingravidez. En realidad, la mesa tampoco hacía falta, pero Ardan se empeñó en que había que desayunar "en la mesa".

Comerse el caldo no fue más fácil que guisarlo. En primer lugar, no había manera de echarlo en las tazas. Ardan hizo la prueba y poco faltó para que echara a perder su trabajo de toda la mañana. Como el caldo no se vertía, se olvidó de la ingravidez y dio un golpe en el fondo de la cacerola para hacerlo salir. De la cacerola se desprendió una enorme gota esférica. Era el caldo en forma de bola. Ardan tuvo que poner en juego sus dotes de malabarista para recuperar la gota y volver el caldo a la cacerola.

Los intentos de usar las cucharas fracasaron. El caldo mojaba toda la cuchara, hasta los dedos, como si fuera una película continua. Decidieron engrasar las cucharas por fuera, para que el caldo no las mojase, pero el resultado no fue mejor. El caldo formaba en ellas una bola y no había manera de hacer llegar estas píldoras ingrávidas hasta la boca.

Nicholl encontró por fin una solución. Hicieron unos tubos de papel encerado y con ellos absorbieron el caldo. Este procedimiento fue el que usaron en adelante, mientras duró el viaje, para beber agua, vino y todos los demás líquidos*.

* Muchos lectores de las ediciones anteriores de este libro me han escrito expresando sus dudas con respecto a la posibilidad de beber agua en un medio sin gravedad, incluso por el último procedimiento que hemos indicado, puesto que el aire que se encuentra dentro del proyectil en vuelo es ingrávido y, por lo tanto, no ejerce presión sobre el líquido, y no existiendo presión, tampoco se puede beber por succión. Aunque parezca raro,

LA ALIMENTACION EN EL COSMOS

La preparación de los vuelos espaciales de gran duración ha hecho necesario que se estudie seriamente el problema de la alimentación en el cosmos. Se han ideado pastas alimenticias especiales que se envasan en tubos parecidos a los de la pasta de los dientes. Las naves cósmicas llevan el agua en unos depósitos especiales, provistos de unos tubos flexibles. Para beber se absorbe el agua por estos tubos. Los alimentos sólidos, como el pan, la carne, etc., van empaquetados en pequeñas porciones que pueden llevarse directamente a la boca.

El cosmonauta № 4, Pável Popóvich, además de la ración correspondiente, se llevó una "vobla"*, que durante el vuelo se comió con mucho apetito.

¿POR QUE EL AGUA APAGA EL FUEGO?

Esta es una pregunta muy sencilla, pero que no todos saben contestar bien. Esperamos que el lector no se quejará si explicamos brevemente en qué consiste la acción del agua sobre el fuego.

En primer lugar, cuando el agua entra en contacto con el objeto que arde se convierte en vapor, con lo cual quita mucho calor al cuerpo en combustión. Para que el agua hirviendo se convierta en vapor hace falta una cantidad de calor cinco veces mayor que para hacer que una cantidad igual de agua fría se caliente hasta 100°C.

En segundo lugar, el vapor que se forma ocupa un volumen centenares de veces mayor que el que tenía el agua que lo engendró; estos vapores rodean al cuerpo que se quema, desplazan el aire y, cuando este último falta, cesa la combustión.

En algunas ocasiones, para aumentar el efecto extintor del agua se le echa ... ¡pólvora! Esto, que puede parecer raro, es perfectamente lógico, ya que la pólvora arde muy de prisa y produce una gran cantidad de gases incombustibles, los cuales rodean los objetos que se queman y apagan el fuego.

esta misma objeción fue expresada en la prensa por algunos de mis críticos. Sin embargo, es evidente que en estas condiciones la ingravidez del aire no es óbice para que exista presión, puesto que el aire que se encuentra dentro de un espacio cerrado cualquiera presiona sobre sus paredes, no porque tiene peso, sino porque como todo cuerpo gaseoso tiende a extenderse indefinidamente. En el espacio *libre* que hay junto a la superficie terrestre la *gravedad* desempeña el papel de paredes que impiden la expansión del gas. Por lo visto, la costumbre de apreciar esta relación es la que ha hecho que se confundan mis críticos.

* Pescado en salazón.

El lector quizás haya oído decir que el mejor procedimiento, y a veces el único, que se puede emplear para cortar los incendios en los bosques o en las estepas es el de incendiar el bosque o la estepa por el lado opuesto. Las nuevas llamas se lanzan al encuentro del incendio desencadenado y, como destruyen el material que podía arder, hacen que el fuego no tenga de qué alimentarse. Cuando los dos muros de fuego se encuentran, se apagan en el acto, como si se devorasen entre sí.

Muchos habrán leído en la novela de James Cooper "The Prairie"* cómo se empleaba este procedimiento para apagar el fuego en los incendios de las estepas norteamericanas. ¿Se puede acaso olvidar el momento tan dramático en que el viejo trampero salva de una muerte segura a sus compañeros de viaje, cuando fueron sorprendidos por el incendio en la estepa?

A continuación reproducimos este episodio de "The Prairie".

"El viejo tomó de improviso un aspecto decidido.

— Ha llegado la hora de actuar.

— ¡Se ha dado usted cuenta demasiado tarde, viejo desgraciado! — gritó Middleton —. El fuego está ya a un cuarto de milla de nosotros y el viento le empuja hacia aquí con una fuerza horrorosa.

— ¡Conque fuego! ¡Como si yo me asustara del fuego! ¡Venga, valientes, manos a la obra! ¡Arrancad esta hierba seca hasta que la tierra quede como la palma de la mano!

Pronto quedó libre de hierba un espacio que tendría veinte pies de diámetro. El trampero llevó a las mujeres a un extremo de este pequeño espacio y les dijo que se cubrieran los vestidos con las mantas, porque si no se podían incendiar. Después de tomar esta precaución se fue al otro extremo, donde el elemento desencadenado rodeaba a los viajeros con su peligroso cerco, cogió un puñado de la hierba más seca, la puso en la cazoleta del rifle y disparó. La hierba reseca se incendió en el acto. El viejo la tiró a un alto matorral, se retiró al centro del círculo y se puso a esperar el resultado de su obra.

El elemento destructor se lanzó como hambriento sobre su nueva presa y pronto las llamas lamían la hierba.

— Ahora — dijo el viejo —, verán ustedes como el fuego acaba con el fuego.

— ¿Pero esto no es más peligroso? — exclamó Middleton —. ¿No acerca usted el enemigo, en lugar de alejarlo?

* "La Pradera".

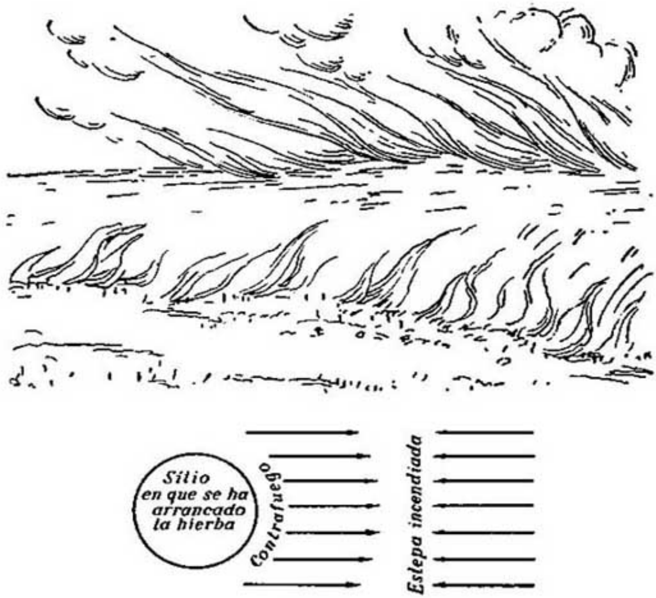


Fig. 86. El fuego apaga el incendido de la estepa (pradera).

El fuego recién encendido iba en aumento y se extendía en tres direcciones, detenido en la cuarta por falta de alimento. A medida que crecía y tomaba fuerza iba limpiando todo el espacio que tenía delante. Detrás del fuego quedaba un suelo negro y humeante mucho más despejado que si hubieran segado la hierba. La situación de los fugitivos habría sido más crítica si el sitio que antes limpiaron no fuera en aumento a medida que las llamas los iban rodeando por las otras partes. Al cabo de unos minutos las llamas retrocedían en todas direcciones dejando a aquella gente envuelta en nubes de humo, pero fuera del peligro de ser alcanzados por el torrente de fuego que seguía avanzando impetuosamente.

Los viajeros contemplaban el simple procedimiento que había utilizado el trampero con la misma admiración que dicen que los palaciegos de Fernando el Católico miraban cómo Colón ponía el huevo de pie".

Pero este procedimiento de apagar incendios en las estepas y en los bosques no es tan sencillo como parece. El contrafuego sólo pueden emplearlo personas de gran experiencia, de lo contrario la catástrofe puede ser todavía mayor.

Para que el lector comprenda qué pericia hace falta para esto, bastará que se pregunte: ¿por qué el fuego que prendió el trampero iba al encuentro del incendio, en lugar de hacerlo en sentido contrario? No hay que olvidar que el viento soplaba del lado del incendio y le empujaba hacia los viajeros. Al parecer, el nuevo incendio producido por el viejo trampero no debía ir al encuentro del mar de fuego, sino por la estepa hacia atrás. Si hubiera ocurrido esto, los viajeros se hubieran visto envueltos en un anillo de fuego y habrían perecido irremediablemente.

¿En qué consistía el secreto del trampero?

En el conocimiento de una ley física muy sencilla. Aunque el viento soplaba de la dirección en que ardía la estepa hacia los viajeros, *más adelante, cerca del fuego,* tenía que haber una corriente de aire contraria, que fuera *en dirección* a las llamas. No podía ser de otra forma, porque el aire que se calienta sobre el mar de fuego se hace más ligero y es desplazado hacia arriba por el aire fresco que llega de todas partes de la estepa no tocadas aún por las llamas. Por esto, cerca del límite del fuego se produce *un tiro de aire que va al encuentro del incendio*. El fuego contrario hay que encenderlo precisamente en el momento en que el incendio se aproxima lo suficiente para que se note este tiro de aire. Esto es lo que esperaba el trampero, que no comenzó a obrar antes de tiempo, sino que aguardó tranquilamente el momento oportuno. Si hubiera prendido fuego a la hierba un poco antes, cuando aún no se había establecido el tiro, el fuego se habría propagado en sentido contrario y la situación de aquel grupo de personas hubiese sido desesperada. Por el contrario, un pequeño retraso también podía resultar fatal, ya que el fuego hubiera llegado demasiado cerca.

¿SE PUEDE HERVIR AGUA EN AGUA HIRVIENDO?

Coja usted una botella pequeña (un tarro o un frasquito), llénela de agua y métala en una cacerola que contenga agua pura y que esté puesta a la lumbre. Haga usted esto de forma que el frasco no toque el fondo de la cacerola. Lo mejor para esto es colgarlo con un alambre. Cuando el agua de la *cacerola* comienza a hervir parece que acto seguido también hervirá el agua del frasquito. Sin embargo, puede usted esperar cuanto quiera, el agua del frasco se calentará, se pondrá muy caliente, pero no hervirá. Es decir, el agua hirviendo resulta poco caliente para hacer que hierva el agua del frasco.

Esto que parece sorprendente era de esperar, porque para hacer que hierva el agua no basta calentarla hasta 100°C; hay que comunicarle además la cantidad de calor necesaria para que pase al nuevo estado de agregación, es decir, a vapor.

El agua pura hierve a 100°C; en condiciones normales su temperatura no aumenta por mucho que la calentemos. Quiere decir, que la fuente de calor con que calentamos el agua del frasquito tiene 100°C y, por lo tanto, solamente puede calentarla hasta 100°C. En cuanto se equilibran las temperaturas, *el agua de la cacerola deja de ceder calor a la del frasco.* Es decir, por este procedimiento no podemos conseguir que el agua del frasco adquiera la reserva de calor necesaria para pasar del estado líquido al gaseoso (cada gramo de agua, calentada hasta 100°C, necesita más de 500 calorías para pasar a vapor). Esta es la causa de que el agua del frasco, aunque se caliente, no llegue a hervir.

Pero puede plantearse la pregunta: ¿en qué se diferencia el agua del frasco de la que hay en la cacerola? ¿No son acaso iguales? Lo único que ocurre es que están separadas por las paredes de vidrio, ¿por qué no hierve entonces?

Porque precisamente esas paredes de vidrio impiden que el agua que hay dentro del frasco tome parte en las corrientes que remueven todo el agua de la cacerola. Cada una de las partículas de agua de la cacerola puede ponerse en contacto directo con su fondo caldeado, mientras que el agua del frasco solamente tiene contacto con el agua hirviendo.

De esto se deduce que con agua hirviendo no se puede hacer que hierva el agua. Pero si en la cacerola se echa un puñado de sal, las circunstancias cambian. El agua salada hierve a más de 100°C y, por consiguiente, puede hacer a su vez que hierva el agua pura contenida en el frasco de vidrio.

¿PUEDE LA NIEVE HACER HERVIR EL AGUA?

Si no fue posible hacerla hervir con agua hirviendo — dirá el lector —, ¿cómo vamos a conseguirlo con nieve?

Pero en vez de contestar apresuradamente, haga usted el experimento siguiente (aunque sea con el mismo frasco de antes):

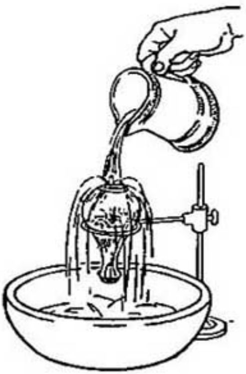


Fig. 87. El agua del frasco hierve cuando se le echa agua fría.

Llene usted el frasco de agua hasta la mitad y métalo en *agua salada* hirviendo. Cuando empiece a hervir el agua del frasco, sáquelo de la cacerola y tápelo con un tapón bien ajustado. Póngalo boca abajo y espere hasta que dentro deje de hervir el agua. En cuanto esto ocurra, rocíe el frasco con agua hirviendo. El agua que hay dentro no hervirá. Pero si sobre la base del frasco pone un poco de nieve o simplemente echa sobre ella agua fría, como muestra la fig. 87, verá usted como el agua empieza a hervir ... ¡La nieve hace lo que el agua hirviendo no pudo hacer!

La cosa resulta más misteriosa, porque si se toca el frasco se nota que no está muy caliente. No obstante, vemos con nuestros propios ojos que el agua hierve dentro de él.

El secreto es el siguiente: cuando la nieve enfría el frasco, el vapor que hay dentro de él se condensa y forma gotas de agua. Pero como dentro del frasco no hay aire (o hay poco), porque fue expulsado mientras el agua hervía, resulta que este agua estará ahora sometida a una presión mucho menor. Por otra parte sabemos que cuando la presión disminuye el líquido puede hervir a menor temperatura. Por consiguiente, en nuestro frasco tenemos agua hirviendo, aunque no *está muy caliente.*

Si las paredes del frasco son delgadas, la condensación instantánea del vapor puede producir una especie de estallido, porque la presión del aire exterior, al no encontrar resistencia dentro del frasco, puede aplastarlo (por eso la palabra "estallido" no es la más a propósito en este caso). Para evitar esto es preferi-

Fig. 88. Resultado asombroso del enfriamiento de la lata.

Fig. 89. "Experimentos científicos" de Mark Twain.

ble usar un frasco esférico (un matraz de fondo convexo, por ejemplo), en este caso aire presionará sobre una "bóveda".

Este experimento es más seguro si se hace con una lata de las que sirven de envase al aceite. Después de hervir en una de estas latas un poco de agua, se le atornilla bien el tapón y se le echa por fuera agua fría. La lata llena de vapor será aplastada inmediatamente por la presión del aire exterior, puesto que dentro de ella el vapor se enfría y se condensa formando agua. La lata quedará abollada por la presión del aire lo mismo que si le hubieran dado un martillazo (fig. 88).

"SOPA DE BAROMETRO"

En su libro "A Tramp Abroad" (Viaje al extranjero) el humorista norteamericano Mark Twain cuenta un caso que le ocurrió durante su viaje a los Alpes, caso, claro está, inventado por él.

"Terminaron nuestros contratiempos; la gente pudo descansar y yo, por fin, pude dedicarme a la parte científica de la expedición. Ante todo quise determinar con el barómetro la altura del lugar donde estábamos. Pero, sintiéndolo mucho, no conseguí ningún resultado. Por mis lecturas científicas yo sabía que para obtener los datos necesarios había que hervir ... el termómetro o el barómetro. Pero como no recordaba exactamente cuál de los dos, decidí hervir ambos.

A pesar de todo no obtuve ningún resultado. Examiné ambos aparatos y me convencí de que estaban totalmente estropeados. Del barómetro no quedó más que la aguja de cobre y del termómetro pendía una gota de mercurio ...

Busqué otro barómetro. Estaba completamente nuevo y era magnífico. Lo herví durante media hora en un puchero, donde el cocinero hacía sopa de habas. El resultado fue sorprendente. El instrumento dejó de funcionar, pero la sopa tomó un gusto a barómetro tan fuerte, que el cocinero — que no era tonto — cambió su nombre en el menú. El nuevo plato fue muy elogiado por todos y yo di la orden de que cada día hicieran sopa de barómetro. El barómetro quedó completamente inutilizado, pero no lo sentí. Como no me sirvió para determinar la altura del lugar, ¿para qué lo quería?"

Ahora, dejando las bromas, procuremos contestar a la pregunta siguiente: ¿qué instrumento era el que había que "hervir", el termómetro o el barómetro?

El termómetro. ¿Por qué? Porque como hemos visto en el experimento anterior, cuanto menor es la presión que soporta el agua tanto más baja es su temperatura de ebullición. Como al subir a una montaña la presión atmosférica disminuye, al mismo tiempo deberá bajar la temperatura de ebullición del agua. Y, efectivamente, al variar la presión atmosférica se observan las suguientes temperaturas dc ebullición del agua:

Presión barométrica, en mm.	Temperatura de ebullición, en °C.
787,7	101
760	100
707	98
657,5	96
611	94
567	92
525,5	90
487	88
450	86

En Berna (Suiza), donde la presión atmosférica media es de 713 mm, el agua hierve en las vasijas abiertas a 97,5 grados, y en el Mont Blanc, donde el barómetro marca 424 mm, el agua hierve a 84,5 grados solamente. La temperatura de ebullición del agua desciende 3°C por cada kilómetro de elevación. Por lo tanto, si medimos la temperatura a que hierve el agua (o como dice Mark Twain, si "hervimos el termómetro") y *buscamos después en la tabla correspondiente,* podemos hallar la altura del lugar. Pero para esto hay que tener una tabla hecha de antemano, cosa de la que se olvidó Mark Twain.

Los instrumentos que se emplean para esto se llaman hipsómetros, son tan fáciles de transportar como los barómetros metálicos, pero proporcionan unos datos mucho más exactos.

El barómetro también puede servir para determinar la altura de un lugar, puesto que directamente, y sin "hervirlo", indica la presión atmosférica. Cuanto mayor sea la altura a que nos elevemos, menor será la presión. Pero en este caso también hay que tener tablas, indicadoras de cómo disminuye la presión del aire a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar, o conocer las fórmulas necesarias. Todo esto fue lo que se mezcló en la imaginación del humorista y le indujo a "hacer sopa de barómetro".

El bravo ordenanza Ben-Zouf, que el lector conoce seguramente por la novela de Julio Verne "Hector Servadac", estaba completamente seguro de que el agua hirviendo tiene siempre y en todas partes la misma temperatura. Es de suponer que habría seguido pensando así durante toda su vida si el azar no hubiera tenido a bien lanzarlo, junto con su jefe Servadac, a un ... cometa. Este astro caprichoso chocó con la Tierra, arrancó de ella el pedazo en que estaban precisamente ambos héroes, y se los llevó siguiendo su órbita elíptica. Fue entonces cuando el ordenanza pudo comprobar por experiencia propia que el agua hirviendo no está siempre igual de caliente. Este descubrimiento lo hizo inesperadamente, mientras preparaba el desayuno.

"Ben-Zouf echó agua en la cacerola, la puso en la plancha de la cocina y esperó a que empezara a hervir para poner a cocer los huevos, que le parecían huecos porque pesaban poco.

Antes de dos minutos ya estaba hirviendo el agua.

— ¡Diablos, cómo calienta el fuego! — exclamó Ben-Zouf.

— No es que el fuego caliente más — le dijo Servadac después de pensarlo —, lo que pasa es que el agua hierve antes.

Cogió un termómetro centígrado que había en la pared y lo metió en el agua hirviendo. El termómetro marcó sesenta y seis grados solamente.

— ¡Oh! — exclamó el oficial —. ¡El agua hierve a sesenta y seis grados, en vez de a cien!

— ¿Qué hacer, capitán?

— Te aconsejo, Ben-Zouf, que cuezas los huevos durante un cuarto de hora.

— Se van a poner duros.

— No, querido, apenas si estarán pasados por agua.

Este fenómeno se debía sin duda a la disminución de la altura de la capa atmosférica. La columna de aire sobre la superficie del suelo había disminuido casi en una tercera parte, por esto el agua, sometida a menos presión, hervía a sesenta y seis grados, en vez de a cien. Un fenómeno semejante ocurriría en la cumbre de una montaña que tuviera 11 000 m de altura. Si el capitán hubiera tenido un barómetro le habría podido demostrar esta disminución de la presión atmosférica".

No vamos a poner en duda las observaciones de nuestros héroes. Ellos afirman que el agua hirvió a los 66°C y nosotros admitimos esto como un hecho. Pero es muy extraño que pudieran sentirse tan bien en una atmósfera tan enrarecida.

El autor de "Servadac" lleva razón cuando dice que un fenómeno semejante podría observarse a la altura de 11 000 m. En estas condiciones, como confirman los cálculos*, el agua debe hervir a 66°C. Pero la presión atmosférica debería ser entonces de 190 mm de la columna de mercurio, es decir, exactamente la cuarta parte de la normal. En el aire enrarecido hasta un grado como éste casi no se puede respirar. Estas alturas están ya en la estratosfera. Y nosotros sabemos que pilotos que volaron a 7 u 8 kilómetros de altura, sin caretas de oxígeno, perdieron el conocimiento por falta de aire, mientras que Servadac y su asistente no se sentían mal. Fue una suerte que Servadac no tuviera un barómetro a mano, de lo contrario el novelista se hubiera visto obligado a hacer que este instrumento marcara una cifra diferente de la que le correspondía de acuerdo con las leyes de la Física.

Si nuestros héroes no hubieran caído en un cometa imaginario, sino en el planeta Marte, por ejemplo, donde la presión atmosférica no es mayor de 60—70 mm, habrían visto hervir el agua a 45 grados.

Por el contrario, en el fondo de las minas profundas, donde la presión atmosférica es bastante mayor que en la superficie de la tierra, el agua hirviendo está muy caliente. En una mina que tenga 300 m de profundidad el agua hierve a 101°C y a la profundidad de 600 m lo hará a 102°C.

En las calderas de las máquinas de vapor el agua hierve a una presión muy elevada. Por ejemplo, a 14 atmósferas el agua hierve a ... ¡200°C! Y al revés, bajo la campana de una máquina neumática se puede hacer que el agua hierva a la temperatura ambiente normal, es decir, a 20°C.

La medicina aeronáutica y cósmica han puesto de manifiesto que la acción funesta de la altura sobre el organismo humano no se reduce a la falta de aire para la respiración. La disminución brusca de la presion atmosférica también es un fenómeno muy peligroso que puede ocurrir, por ejemplo, en el caso en que un meteoro deteriore el revestimiento de una nave cósmica. Si esto ocurre, los gases que se hallan disueltos en la sangre comienzan a desprenderse enérgicamente y la sangre hierve en realidad. Este mismo peligro amenaza a los buzos inexpertos si suben a la superficie demasiado de prisa. Este fenómeno se conoce con el nombre de "enfermedad de descompresión".

* Efectivamente, si como dijimos antes (pág. 160) el punto de ebullición del agua desciende en 3°C por cada kilómetro que nos elevamos, para que la temperatura de ebullición descienda hasta 66°C hay que subir 34:3= =11 km aproximadamente.

HIELO CALIENTE

Hasta ahora hemos hablado de agua que hierve estando "fría", pero hay otro fenómeno más interesante, el *hielo caliente*. Estamos acostumbrados a pensar que el agua no puede encontrarse en estado sólido a temperaturas mayores de 0°C. No obstante, las investigaciones llevadas a cabo por el físico norteamericano Bridgman demostraron que esto no es así. Si el agua está sometida a una gran presión puede pasar al estado sólido y permanecer en él a temperaturas considerablemente mayores de 0°C. Bridgman demostró que, en general, pueden existir varios tipos de hielo. El hielo que él denominó "hielo N° 5" se obtiene a la monstruosa presión de 20 600 atmósferas y permanece en estado sólido a la temperatura de 76°C. Si lo tocásemos nos quemaría las manos. Pero esto es imposible, porque se forma dentro de un recipiente especial del mejor acero, sometido a la presión de una poderosa prensa. Tampoco se puede ver. Las propiedades de este "hielo caliente" se estudian por medios indirectos.

Un dato interesante es que el "hielo caliente" es más denso que el ordinario e incluso que el agua. Su peso específico es de 1,05. Este hielo podría hundirse en el agua, mientras que el ordinario, como todos sabemos, flota en ella.

EL CARBON PRODUCE FRIO

El hecho de que el carbón produzca frío y no calor no es cosa excepcional, sino algo que cada día se hace en las fábricas de lo que se llama "hielo seco". En estas fábricas se quema el carbón en unas calderas y el humo que produce se depura, con la particularidad de que anhídrido carbónico que contiene es capturado por una solución alcalina. Esta solución se calienta después y el anhídrido corbónico puro que se desprende se somete a enfriamiento y presión hasta que pasa al estado líquido a una presión de 70 atmósferas. Este es el anhídrido carbónico líquido que se lleva en balones de paredes gruesas a las fábricas de bebidas efervescentes y que se utiliza también en otros menesteres industriales. Este líquido está tan frío que con él se puede helar el suelo, como se suele hacer en las obras de los túneles del metropolitano. Pero hay muchos casos en que se necesita anhídrido carbónico sólido, es decir, lo que se llama *"hielo seco"*.

El hielo seco, es decir, el anhídrido carbónico sólido, se obtiene del líquido, sometiéndolo a una evaporación rápida a baja presión. Los trozos de hielo seco se parecen más a la nieve prensada que al hielo y, en general, se diferencia bastante del agua en estado sólido. El hielo del anhídrido carbónico es más pesado que el ordinario y se hunde en el agua. A pesar de que su temperatura es extraordinariamente baja (78° bajo cero), si se coge un trozo con precaución no se nota frío en los dedos. Ocurre esto, porque el anhídrido corbónico gaseoso que se produce cuando el hielo seco se pone en contacto con los dedos protege nuestra piel de la acción del frío. Nuestros dedos corren el peligro de helarse únicamente si apretamos con ellos el pedazo de hielo seco.

El nombre de "hielo seco" expresa perfectamente la propiedad física fundamental de este hielo. Es verdad que nunca está húmedo ni humedece nada a su alrededor. Por la acción del calor pasa directamente al estado gaseoso, sin pasar por el estado líquido. El anhídrido carbónico a la presión normal no puede existir en estado liquido. Esta peculiaridad del hielo seco, además de su baja temperatura, lo hacen insustituible como cuerpo refrigerante en muchos casos prácticos. Los productos alimenticios conservados con hielo seco no sólo no se humedecen, sino que están mejor protegidos contra la putrefacción, puesto que el anhídrido carbónico gaseoso que se produce es un medio que impide el desarrollo de los microorganismos; por esta razón, estos productos ni se cubren de verdín ni tienen bacterias. Los insectos y los animales roedores tampoco soportan esta atmósfera. Finalmente, el anhídrido carbonico es extintor de incendios muy seguro. Varios trozos de hielo seco son suficientes para apagar una lata de gasolina que esté ardiendo. Por todo esto el hielo seco se consume mucho, tanto en la industria como para usos domésticos.