

# ATLAS TEMÁTICOS

RELACIÓN DE TÍTULOS

## CIENCIAS EXACTAS

- Atlas de Matemáticas (Análisis + Ejercicios)
- Atlas de Matemáticas (Álgebra + Geometría)
- Atlas de Física
- Atlas de Química
- Atlas de Prácticas de Física y Química

## CIENCIAS COSMOLÓGICAS

- Atlas de Geología
- Atlas de Mineralogía
- Atlas de la Naturaleza
- Atlas de los Fósiles
- Atlas de la Arqueología

## CIENCIAS NATURALES

- Atlas de Zoología (Invertebrados)
- Atlas de Zoología (Vertebrados)
- Atlas de Parasitología
- Atlas de Biología
- Atlas de Botánica

## CIENCIAS PURAS

- Atlas del Átomo
- Atlas de la Astronomía
- Atlas de la Meteorología
- Atlas de la Microscopia
- Atlas de la Informática

## ANATOMÍA

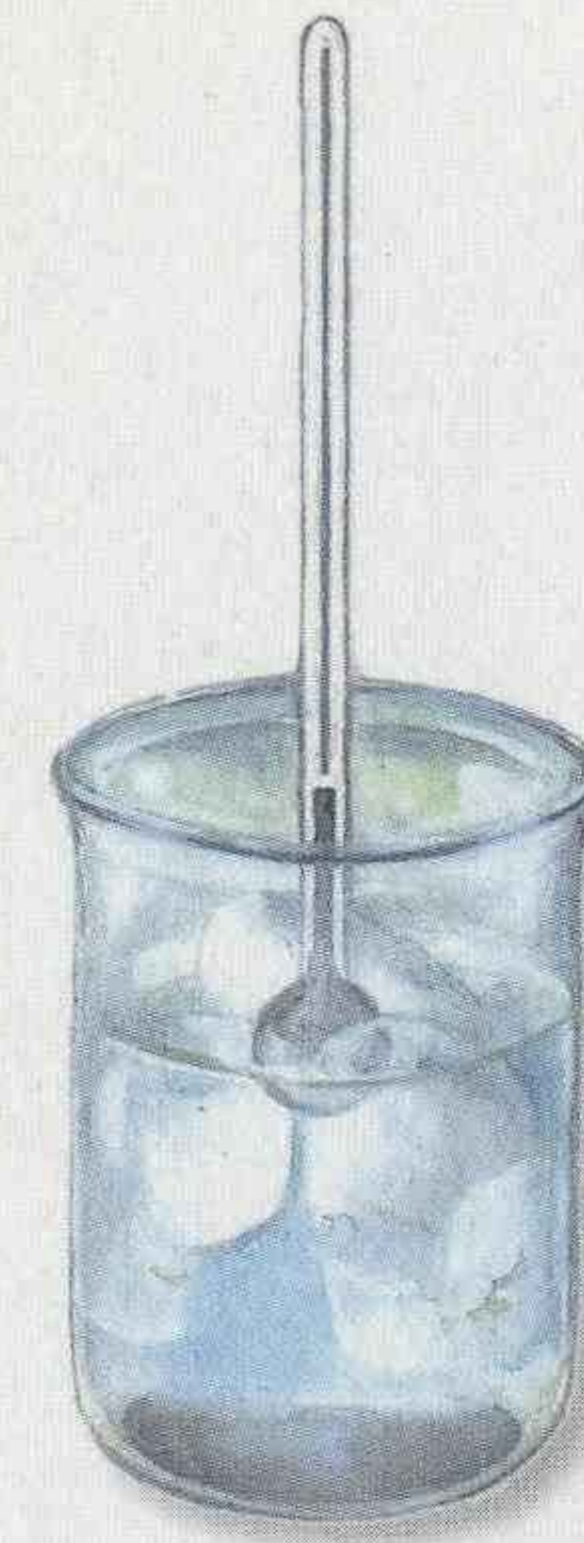
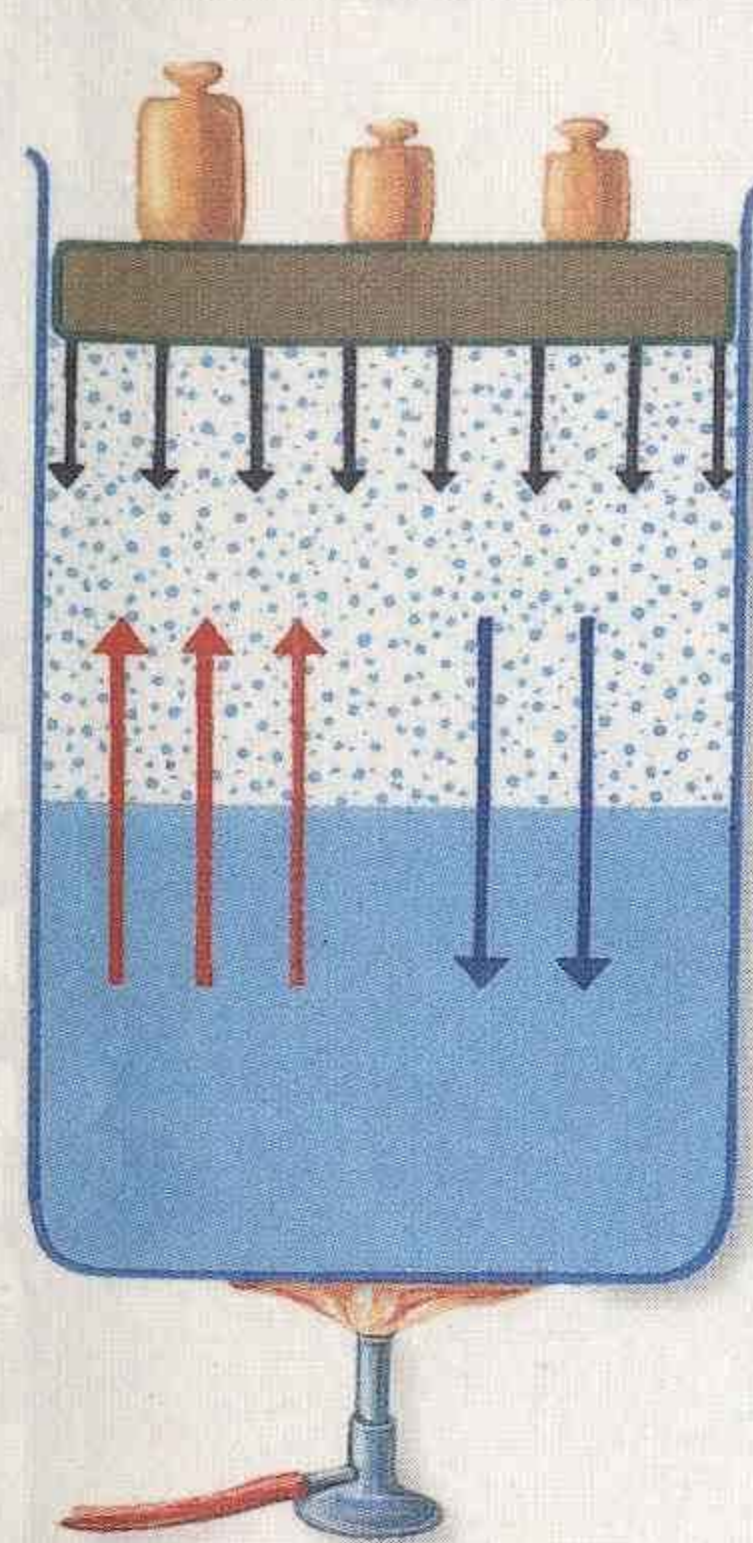
- Atlas de Anatomía Animal
- Atlas de Anatomía Humana
- Atlas del Cuerpo Humano
- Atlas del Hombre
- Atlas de la Cirugía

QUIMICA

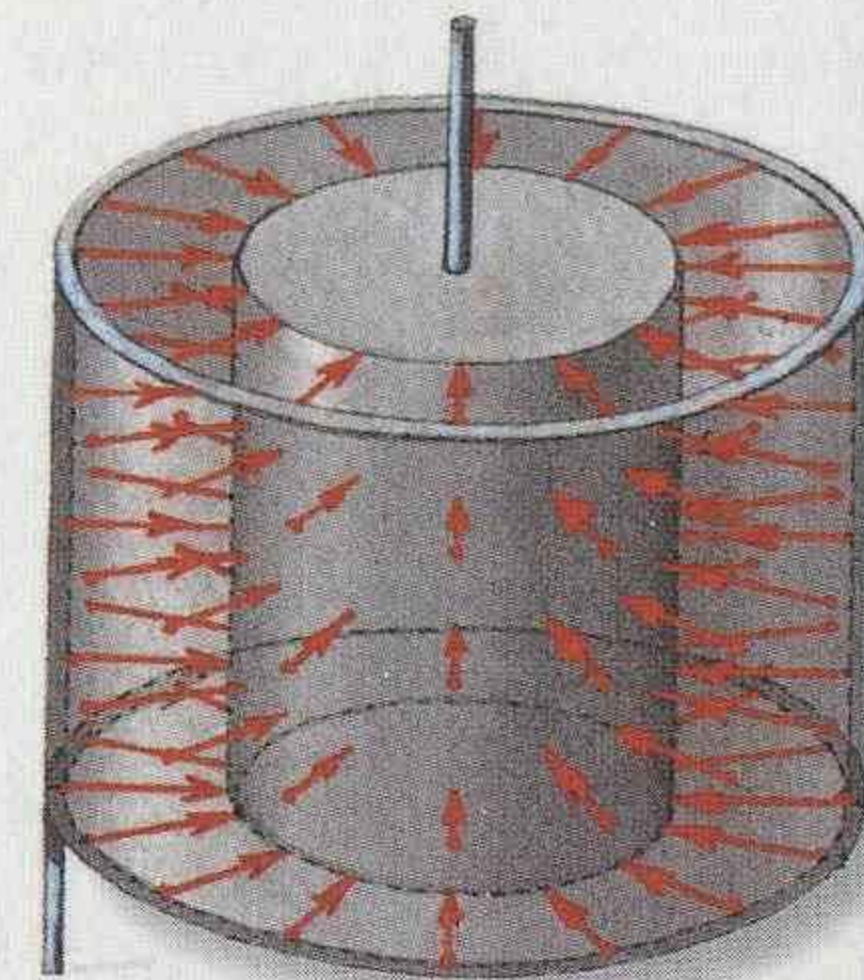
ATLAS TEMÁTICO

# FÍSICA

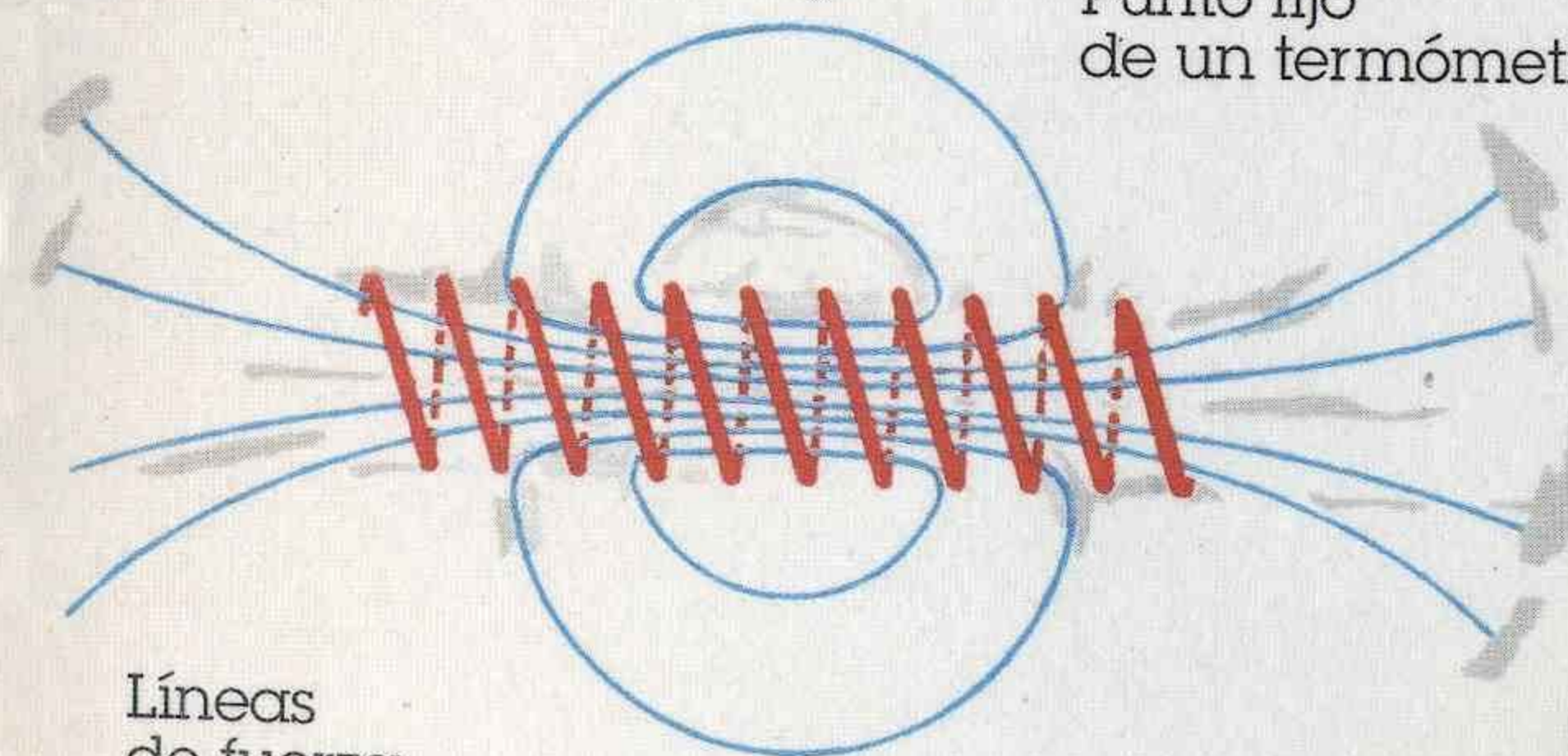
Termodinámica



Punto fijo de un termómetro

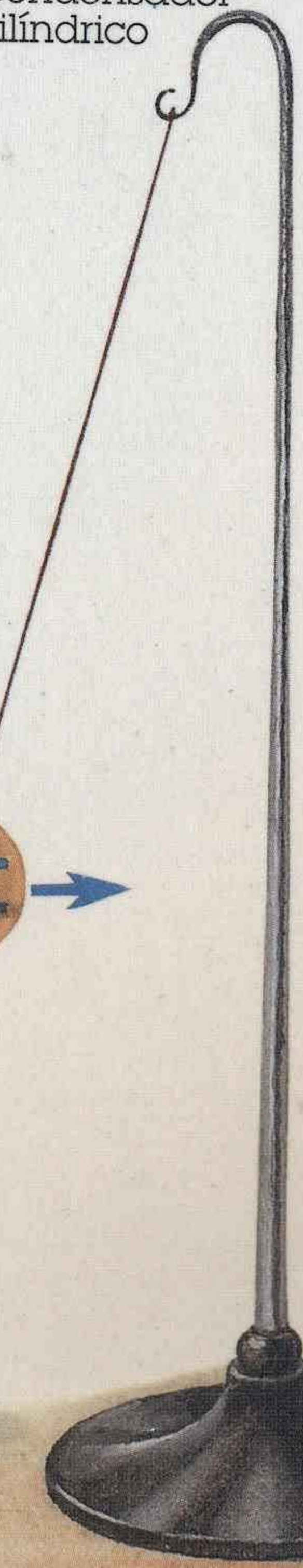


Condensador cilíndrico



Líneas de fuerza de un solenoide

Las cargas positivas están más próximas a la barra de ámbar que las negativas



# Física

Título de la colección  
**ATLAS TEMÁTICO**

Texto e ilustración  
© 1996 **IDEA BOOKS, S.A.**

**Redacción** / J. Fernández Ferrer, Doctor en  
Ciencias Físicas

**Ilustraciones** / Joaquín de V. M. de Castellar  
Bertrán, Juan M.<sup>a</sup> de Castellar Bertrán,  
Montserrat Fabra Hernández, Carlos Gutiérrez  
Marín, Francisco Núñez Otero, Santiago Prevosti  
Pelegrín, José M.<sup>a</sup> Thomas-Doménech

**Diseño de la cubierta** / Lluís Lladó Teixidó

Printed in Spain by  
Emegé, Industria Gráfica, Barcelona

**EDICIÓN 1997**

*El vertiginoso avance de la Ciencia en nuestros días ha originado un cambio radical en la mentalidad de la mayoría de las personas. La juventud, sobre todo, ha sentido la llamada de la Ciencia y ello ha incrementado el número de estudiosos, en una proporción totalmente insospechada hace una veintena de años. Muchos son en la actualidad los que, abandonando conveniencias de índole económica, dedican sus esfuerzos a algún estudio de carácter científico. La Física es una de las ciencias que van hoy día a la cabeza en el progreso científico, y esto, unido al hecho de constituir la base de las llamadas "ciencias tecnológicas", ha conducido a que en derredor de ella se haya ido agrupando una gran parte de la juventud que siente la inquietud de interrogar y conocer el por qué y el cómo se producen los fenómenos que a diario se comentan.*

*Esta obra va dirigida a la juventud que aún no ha tenido ocasión de entrar en contacto con la Ciencia, y se propone despertar en ella una afición que lleva latente, dándole algunas ideas fundamentales en la forma más elemental posible. No se pretende, en cambio, que este ATLAS sea un tratado de Física. La forzosa limitación de espacio, así como el nivel a que hay que tratar las cuestiones, lo impiden; pero si, con todo, se logra despertar una afición o una vocación que contribuyan en el futuro al progreso científico, se dará por satisfecho*

EL AUTOR

# Mecánica

## MAGNITUDES FÍSICAS

La Física, como todas las Ciencias Naturales, estudia los fenómenos que ocurren en la Naturaleza, atendiendo, en este caso, a fenómenos que se producen en la materia inanimada. Si adoptamos esta afirmación como definición de la Física, en ella quedarán incluidas la Química y la Geología, dos ciencias que cada día se hace más difícil separar de la Física. No obstante, los nexos existentes entre dichas ciencias y la Biología permiten establecer una frontera un tanto indefinida entre la Física y esas otras ciencias que, por ser naturales, precisan siempre de la Física para explicar los fenómenos que les son característicos. El físico deberá dar siempre una relación lo más completa posible de los fenómenos físicos y razonar en forma que permita predecirlos en determinadas circunstancias. Ello le lleva a utilizar unas herramientas eficacísimas, las Matemáticas, al mismo tiempo que procura reducir la descripción de dichos fenómenos a la medida de ciertas magnitudes a las que se da el nombre de *magnitudes físicas*. Cuando el físico logra traducir en números los resultados de sus observaciones, el lenguaje que utiliza es claro, preciso y terminante. Este lenguaje es el que hay que estudiar para entrar en conocimiento de los sucesos de que se nos quiere informar, y el estudio de la Física es, en cierto modo, el estudio de ese lenguaje. Así por ejemplo, para describir la caída de un cuerpo en el espacio, una persona carente de conocimientos de Física diría que el cuerpo estaba inicialmente quieto y que luego empezó a bajar cada vez más y más de prisa. La idea que nos da del movimiento del cuerpo en cuestión es muy vaga. En cambio, cuando dice que el cuerpo cae partiendo del reposo con una aceleración constante del  $9,8 \text{ m/s}^2$ , el conocedor del lenguaje físico tiene una idea tan clara del movimiento que puede decirnos cuál será la posición del cuerpo en un instante cualquiera y *cuán deprisa* cae. La descripción resulta completa y la exposición, a la vez, concisa.

## MAGNITUDES ESCALARES Y VECTORIALES

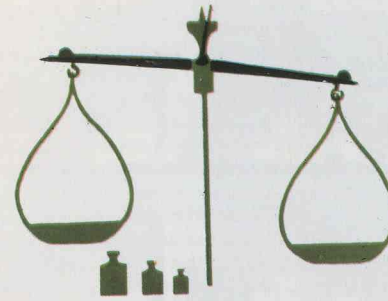
Existen ciertas magnitudes, como el volumen, la masa, la temperatura, el tiempo, la energía, etc., que quedan definidas por un número solamente. Este número da la medida de la magnitud en una escala (de volúmenes, masas, temperaturas, tiempos, etc.), por lo que dichas magnitudes reciben el nombre de *magnitudes escalares*. Otras magnitudes, en cambio, no quedan definidas por un número solamente, sino que llevan asociadas una dirección y un sentido y reciben el nombre de *magnitudes vectoriales*. Ejemplo de éstas son el desplazamiento de un punto, su velocidad, su aceleración, una fuerza, un campo magnético, etc. Es evidente que no basta decir que un móvil ha recorrido 10 km, sino que es preciso indicar en qué dirección y sentido lo ha hecho.

**Vector.**— Las magnitudes así definidas, en lugar de venir representadas por un número, lo son por un segmento orientado, es decir, un segmento rectilíneo que tendrá una longitud, una dirección y un orden prefijado entre sus dos extremos, al primero de los cuales se le llama *origen* y al segundo, *extremo*. Estas dos últimas particularidades determinan la dirección y sentido de la magnitud en cuestión, mientras la longitud mide su intensidad y se le llama *módulo*.

El ente matemático definido por el segmento orientado y que determina la magnitud vectorial se denomina *vector*. Dos vectores se dice que son *equipolentes* (o iguales) cuando tienen el módulo, la dirección y el sentido iguales. En cambio, se llama *vector suma* de otros varios al que se obtiene colocando éstos a continuación unos de otros, con sus direcciones y sentidos respectivos, y uniendo el origen del primero con el extremo del último. Puede demostrarse que cualquiera que sea el orden en que se coloquen los vectores sumandos, siempre se obtiene el mismo vector suma.



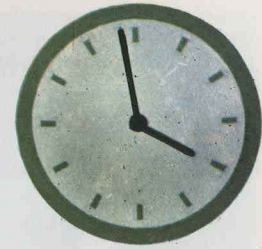
Escala de volúmenes.



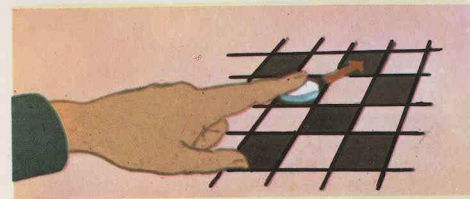
Escala de masas.



Escala de temperaturas.



Escala de tiempos.



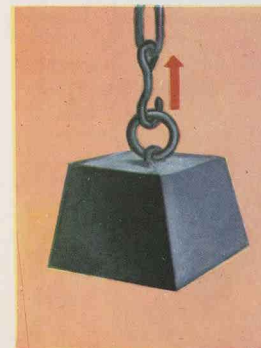
Desplazamiento.



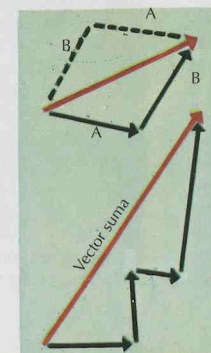
Velocidad.



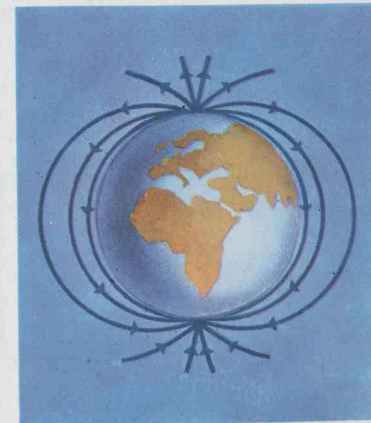
Aceleración (negativa en este caso).



Fuerza.



Suma de vectores.



Campo magnético.

CINEMÁTICA

Las magnitudes escalares vienen medidas por un número, y las vectoriales, por un vector. Son éstos los conceptos que sirven de base a la Aritmética y a la Geometría, respectivamente, y, al incorporar a los conceptos anteriores la noción de tiempo, penetramos en la Física a través de la Cinemática, la cual estudia los movimientos independientemente de las causas que los originan.

MOVIMIENTO RECTILÍNEO UNIFORME

Supongamos que queremos estudiar el movimiento de un automóvil y que con un cronómetro medimos el tiempo que tarda en recorrer la distancia entre mojones situados a cada 100 metros de carretera. Ponemos en marcha el cronómetro al pasar el automóvil ante un mojón, y lo paramos cuando cruza ante el mojón inmediato. El cronómetro nos indica que el coche ha recorrido en 5 segundos esos 100 metros. Otro observador repite la medida en otro instante, y también obtiene el resultado de que el coche ha tardado 5 segundos en recorrer 100 metros. Si diferentes observadores realizan dicha medida en otros instantes y todos hallan el mismo resultado, podremos asegurar que el coche recorre espacios iguales en tiempos iguales, lo que suele especificarse diciendo que el movimiento es uniforme. Se comprende que si un observador hubiera medido el tiempo empleado por el coche en recorrer 200 m, habría hallado 10 s, y si midiera el tiempo correspondiente a una distancia de 50 m, obtendría 2,5 s. Siempre, el cociente entre el espacio recorrido y el tiempo empleado en hacerlo da el mismo resultado: 20, que será el número de metros que cubre en un segundo. Esta distancia por unidad de tiempo recibe el nombre de *velocidad*, y en los movimientos uniformes es, por lo dicho anteriormente, constante. Según cuales sean las unidades utilizadas para medir las distancias y los tiempos, las correspondientes a la medida de la velocidad resultarán ser el metro por segundo (m/s), el centímetro por segundo (cm/s), el kilómetro por hora (km/h), etc. Teniendo en cuenta que el kilómetro tiene 1.000 m, y la hora 3.600 s, el lector puede comprobar que el coche del ejemplo anterior iba a 72 km/h. Cuando el camino que recorre el móvil, y al cual se da el nombre de *trayectoria*, es una recta y la velocidad es

constante, se dice que el movimiento es *rectilíneo y uniforme*. La velocidad es magnitud vectorial, siendo su dirección y su sentido los del movimiento.

Si hacemos funcionar el cronómetro cuando el coche pasa ante el mojón de los 100 m y lo paramos al atravesar frente al de 600 m, la distancia recorrida habrá sido  $600 - 100 = 500$  m, y si el tiempo medido es de 25 s, la velocidad, en metros por segundo, será  $(600 - 100) / 25 = 20$  m/s. El espacio de 100 m que señala el mojón ante el cual cruza el coche cuando disparamos el cronómetro es el *espacio inicial*, que se representa, en general por  $e_0$ , porque corresponde al instante inicial en que el tiempo vale 0. El espacio correspondiente a otro valor cualquiera  $t$  del tiempo se representa por  $e$ , y llamando  $v$  a la velocidad, se tiene:

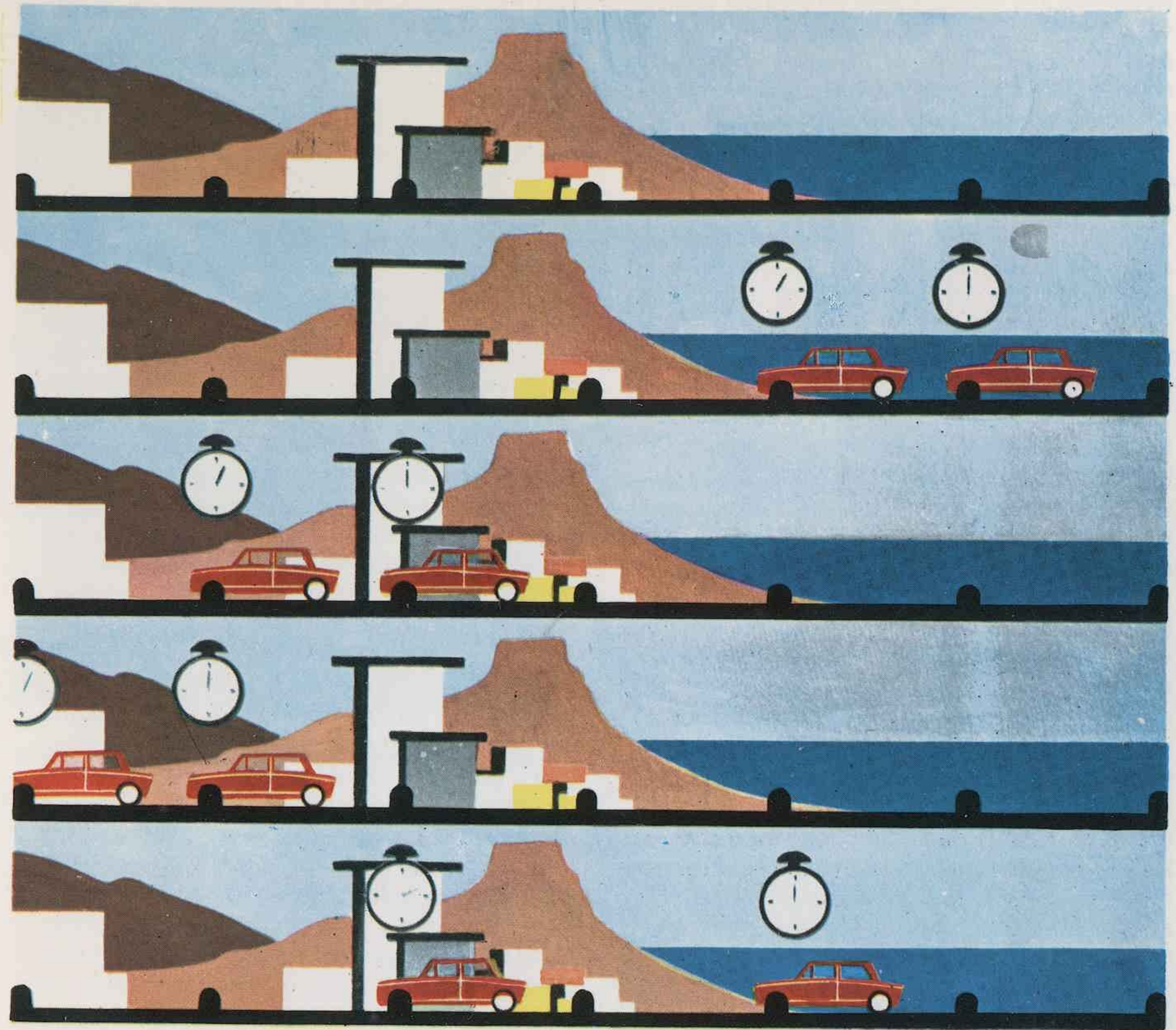
$$v = \frac{e - e_0}{t}$$

o bien,  $e = e_0 + vt$ , que es la ley que rige el movimiento uniforme.

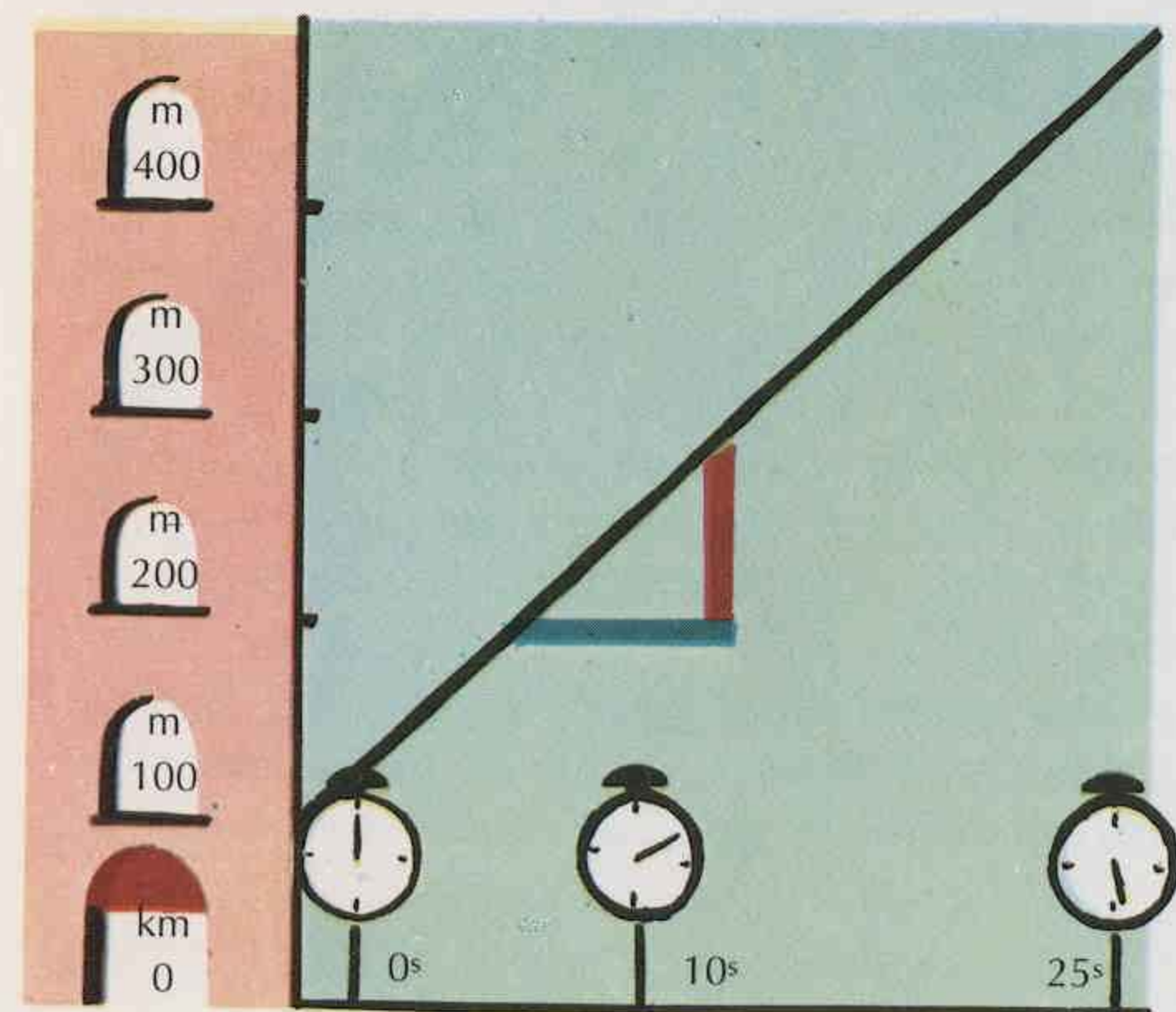
Estos resultados pueden llevarse a una gráfica, tomando sobre el eje horizontal (abscisas) los valores del tiempo, y sobre el vertical (ordenadas) los valores del espacio. Cada posición del móvil vendrá representada por un punto del plano, definido por el tiempo y el espacio, correspondientes ambos a la posición. Estos puntos determinan una recta cuya pendiente es igual a la velocidad.

VELOCIDAD MEDIA Y VELOCIDAD INSTANTÁNEA

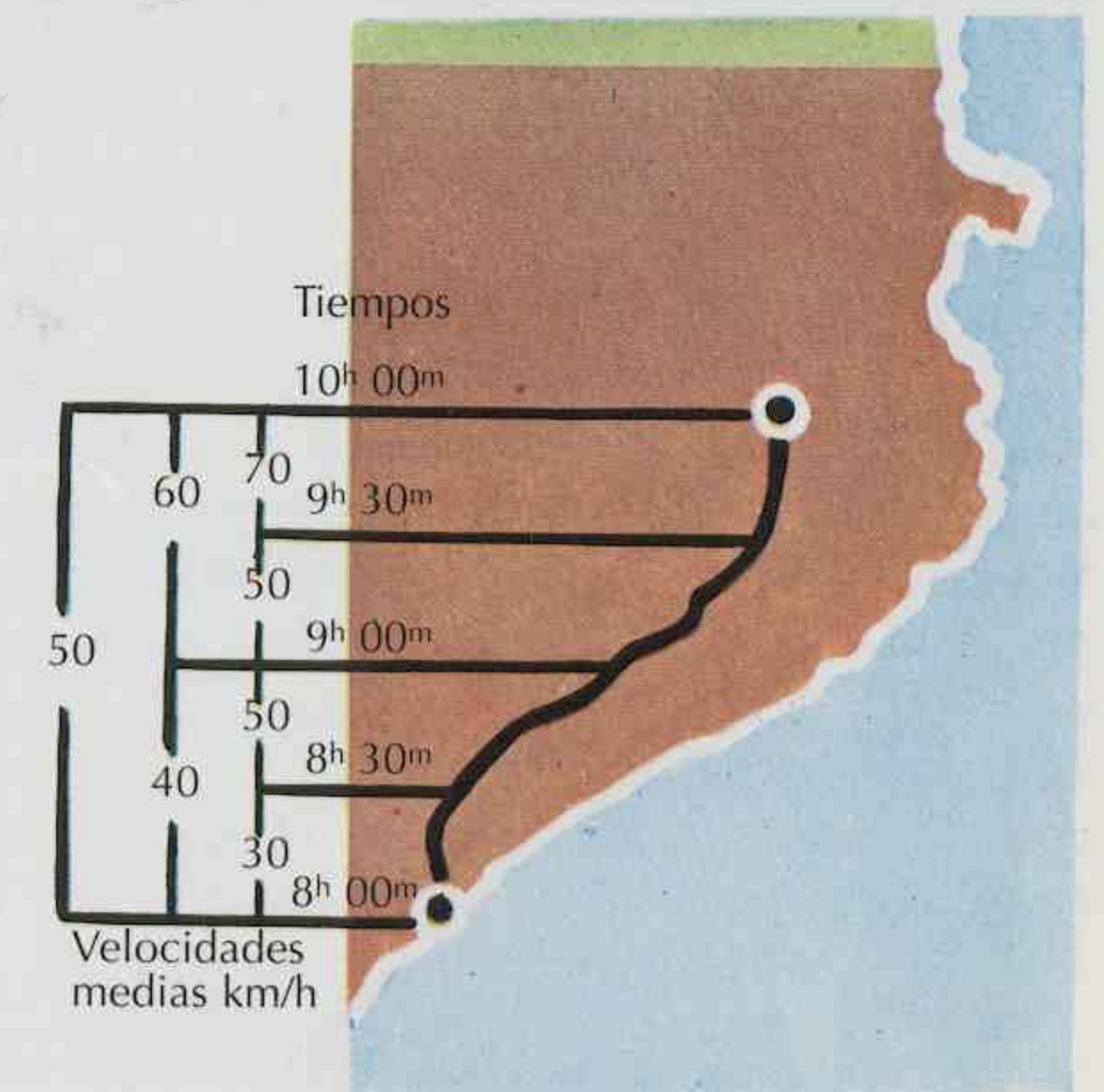
La velocidad de un móvil difícilmente se mantendrá constante durante largo tiempo. Supóngase que realizamos por carretera el viaje Barcelona-Girona (100 km) en dos horas justas. Si la velocidad se hubiera mantenido constante, como imaginábamos antes, habría sido de 50 km/h. Pero, si al cabo de una hora de viaje observamos el cuentakilómetros del coche, puede ocurrir que nos indique que sólo hemos recorrido 40 km, por lo que en la hora siguiente se recorrerán los 60 km restantes. Esto nos dice que la velocidad del coche no fue constante, y se impone, por tal motivo, introducir el concepto de *velocidad media*, que se define como el cociente entre el espacio recorrido por un móvil y el tiempo empleado en recorrerlo. Resulta, pues, que el trayecto Barcelona-Girona lo hemos realizado a una velocidad media de



Movimiento rectilíneo uniforme.



La longitud del segmento rojo dividida por la del verde es la pendiente de la recta.



Velocidades medias.

50 km/h, pero que la velocidad media durante la primera hora ha sido de 40 km/h y la correspondiente a la segunda hora de viaje ha sido de 60 km/h. Hemos ido más aprisa al final que al principio del viaje, y esto representa un mejor conocimiento del mismo que el que supone saber que el trayecto de 100 km se realizó en 2 horas. La información acerca del viaje sería aún más aproximada si hubiéramos leído las distancias recorridas cada media hora. Supongamos que son 15, 25, 25 y 35 km, respectivamente; esto indica que las velocidades medias (en cada caso) son 30, 50, 50 y 70 km/h. Esta información se ha indicado en el cuadro de la lám. A/2 en el que se supone que la hora de partida fue las 8 en punto.

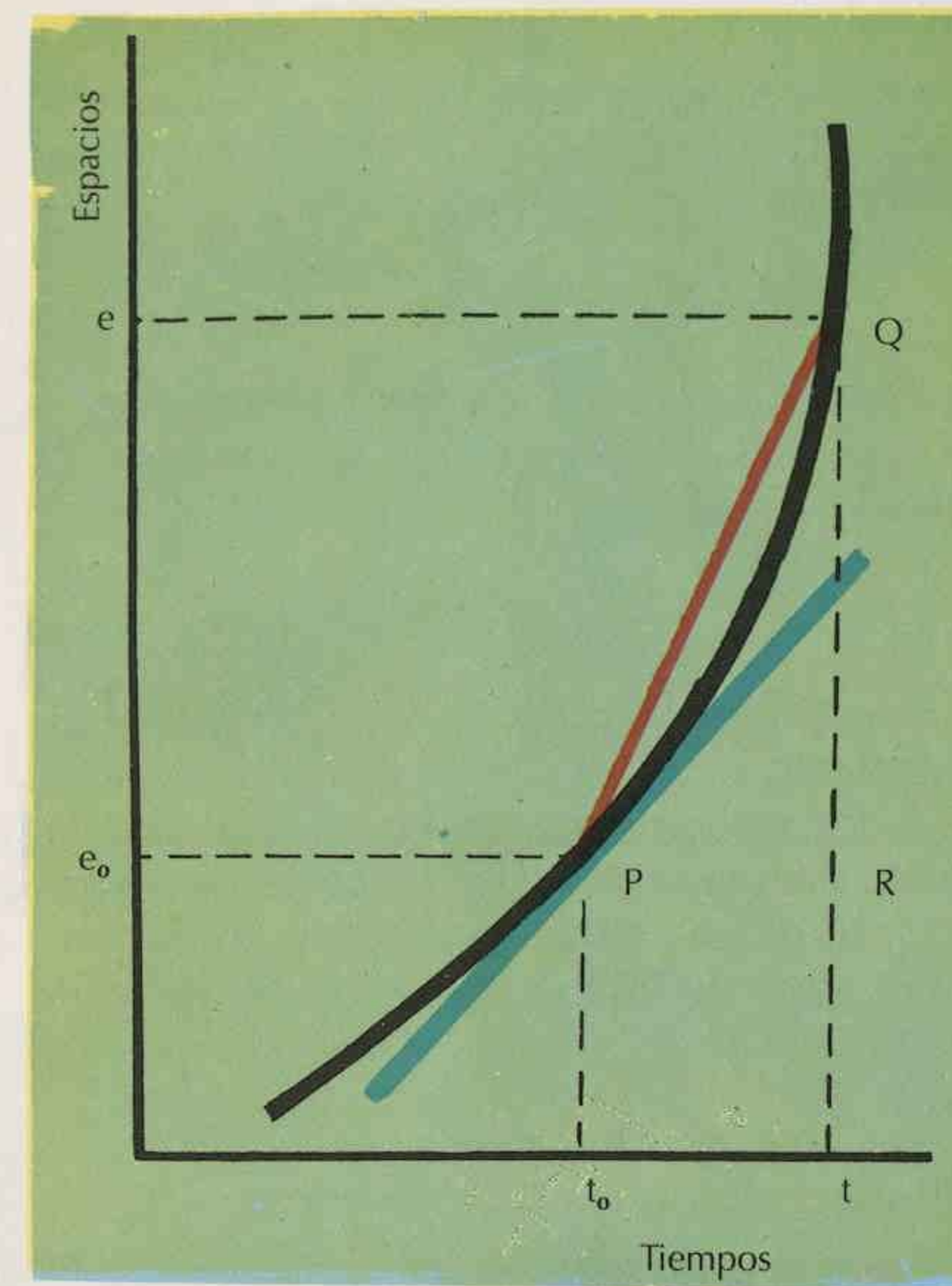
Si quisiéramos más pormenores, podríamos medir las distancias cubiertas cada cinco minutos, cada minuto, etc., y cuanto más restringido sea el intervalo de tiempo para el cual determinamos la velocidad media, tanto mayor será el detalle que obtengamos. Podemos, pues, imaginar que esta partición del tiempo la proseguimos hasta saber la distancia recorrida en cada segundo e incluso en una fracción de segundo tan pequeña como queramos. Cuanto menor sea, tanto más exactamente conoceremos el movimiento. La velocidad media correspondiente a un tiempo infinitamente corto recibe el nombre de *velocidad instantánea* correspondiente al instante dado. Se comprende que, en los movimientos uniformes, la velocidad instantánea es siempre la misma y lo propio ocurre con la velocidad media correspondiente a un intervalo de tiempo cualquiera.

Supongamos que tenemos suficiente información de un movimiento para poder representar (véase figura adjunta) las posiciones del móvil en función del tiempo mediante una curva. En un instante  $t_0$  el móvil ha recorrido un espacio  $e_0$  y su posición está representada por el punto  $P$  de la curva. En otro instante posterior  $t$ , el espacio recorrido será  $e$  y la posición será la representada por el punto  $Q$ . El espacio recorrido será  $e - e_0 = QR$  y el tiempo empleado en recorrerlo es  $t - t_0 = PR$ , con lo que la velocidad media será  $QR/PR$ , que es la pendiente de la recta  $PQ$ , como ya se indicó antes. Si queremos hallar la velocidad instantánea correspondiente a la posición  $P$  hay que tomar  $t - t_0$  cada vez más pequeño, y ver a qué valor tiende la velocidad media. Pero al hacer cada vez menor  $t - t_0$ , el punto  $Q$  se va acercando al  $P$  siguiendo

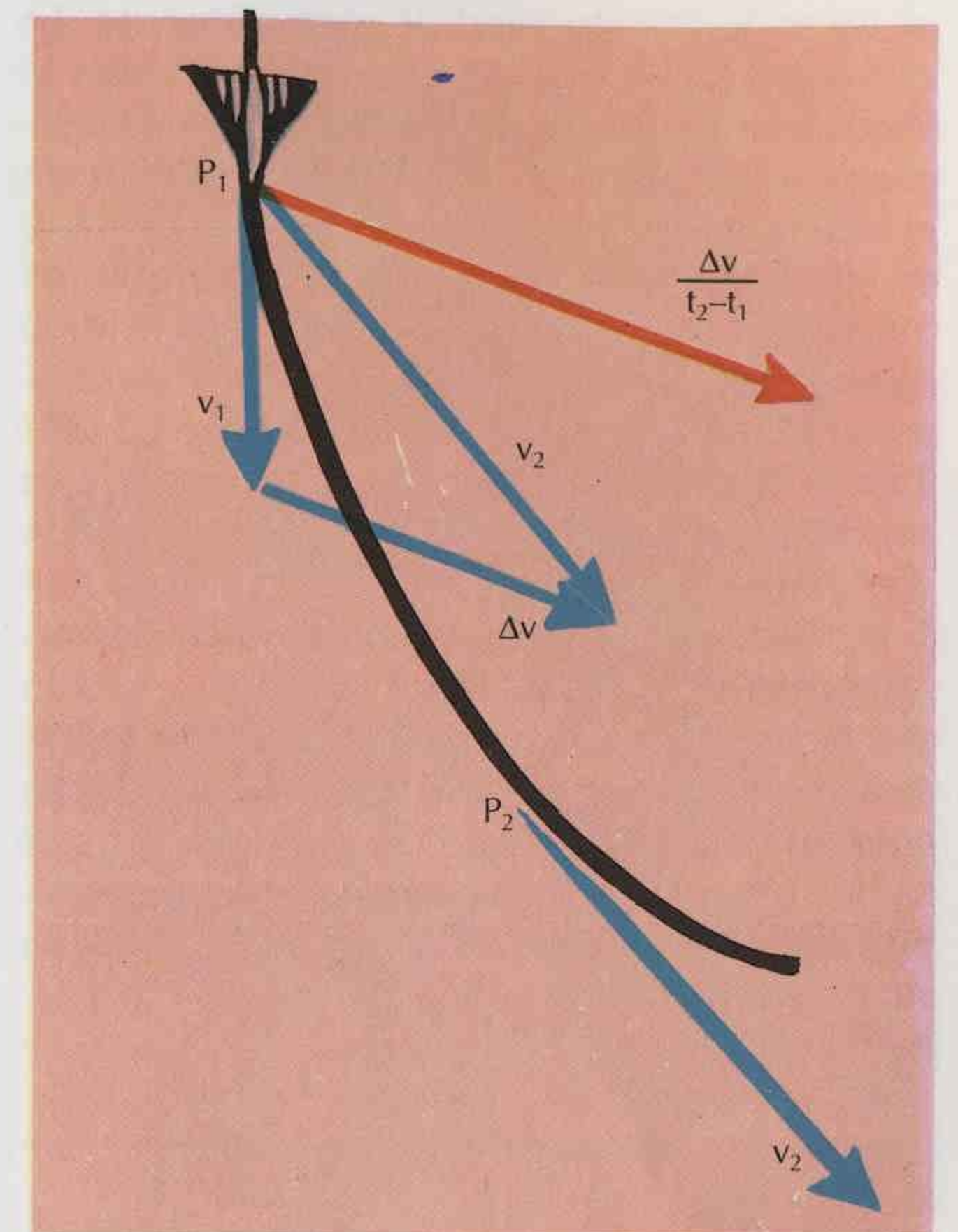
do la curva, la recta  $PQ$  tiende a la tangente a la curva en  $P$  y su pendiente, que es la velocidad media, tenderá a la pendiente de la tangente. Luego, la velocidad instantánea en una posición cualquiera será igual a la pendiente de la tangente a la curva representativa del espacio en función del tiempo, trazada en el punto que representa dicha posición.

**ACELERACIÓN**

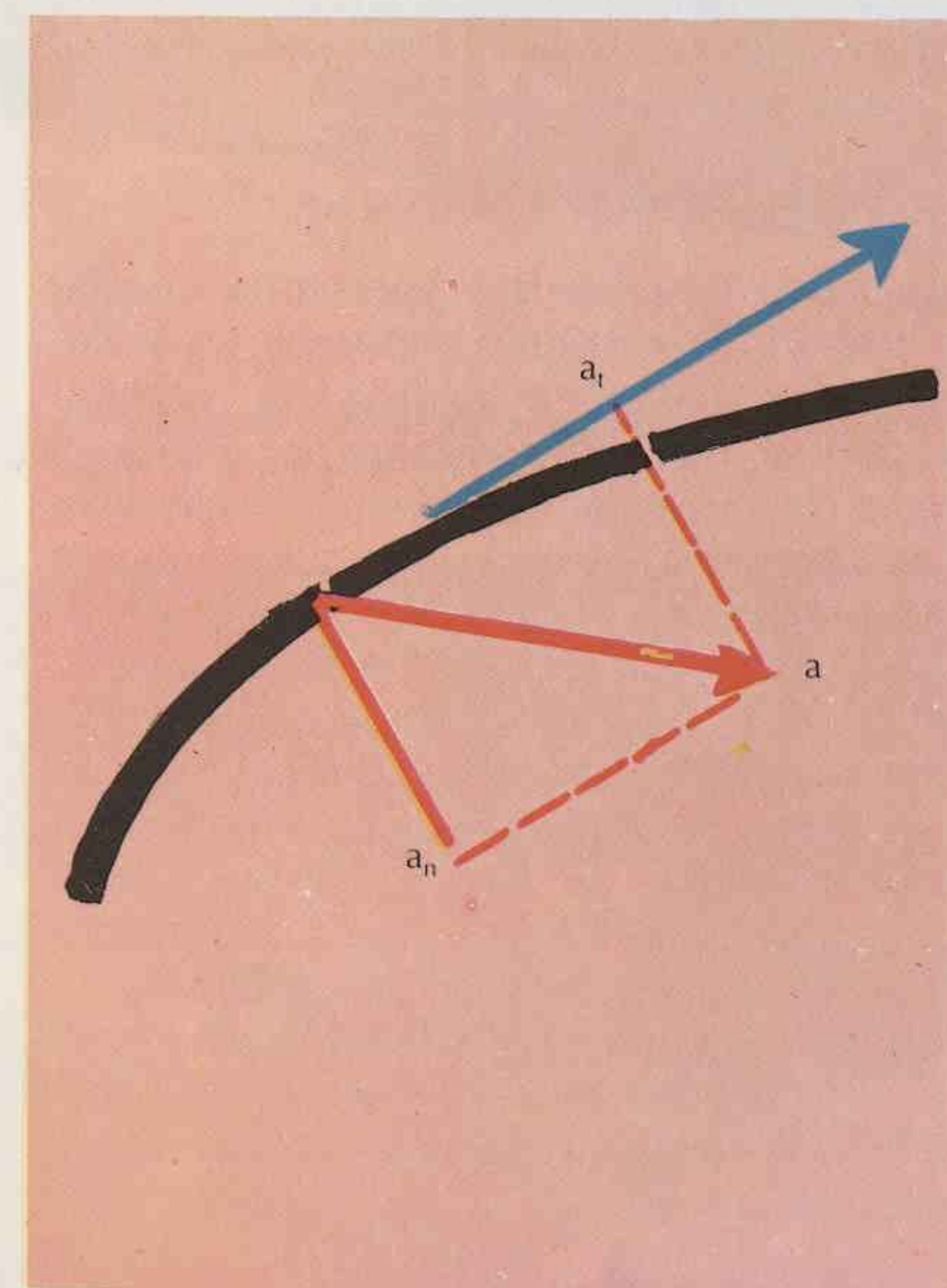
En los razonamientos anteriores no ha sido necesario considerar los cambios de dirección del móvil, porque ya se dijo que la velocidad es un vector de la misma dirección y sentido que el movimiento. Por eso, el vector velocidad es un vector tangente a la trayectoria del móvil y dirigido en el sentido del avance. Por tanto, la variación de velocidad puede deberse a variación de su módulo, pero también a cambio en la dirección del movimiento. En la figura adjunta se han representado la trayectoria de un móvil y sus velocidades  $v_1$  y  $v_2$  en dos posiciones  $P_1$  y  $P_2$  ocupadas en los instantes  $t_1$  y  $t_2$ , respectivamente. El vector  $\Delta v$  representa la variación de velocidad en dicho intervalo de tiempo, y el vector paralelo a él y cuyo módulo es el resultado de dividir el suyo por el tiempo  $t - t_0$  en que ha tenido lugar dicha variación de velocidad, recibe el nombre de *aceleración media* entre los instantes  $t_1$  y  $t_2$ . Tomando el instante  $t_2$  más y más próximo al  $t_1$ , el vector aceleración media tenderá al vector *aceleración instantánea*, correspondiente al instante  $t_1$ , o sea a la posición  $P_1$  del móvil. Puede demostrarse que este vector aceleración se halla en el plano determinado por la tangente y la norma principal a la trayectoria en  $P_1$  dirigido hacia la concavidad, y a las proyecciones del vector aceleración sobre dichas direcciones se les da el nombre de *componentes tangencial y normal*, respectivamente, de la aceleración. Los valores de estas dos componentes se demuestra que son los siguientes: la aceleración tangencial en un punto es igual al aumento en unidad de tiempo que sufre el módulo de la velocidad en el punto considerado; la aceleración normal en un punto es igual al cuadrado de la velocidad dividido por el radio de curvatura de la trayectoria en dicho punto. Veamos qué significa todo esto. Representamos mediante una curva, no las posiciones del móvil, sino sus velocidades en función



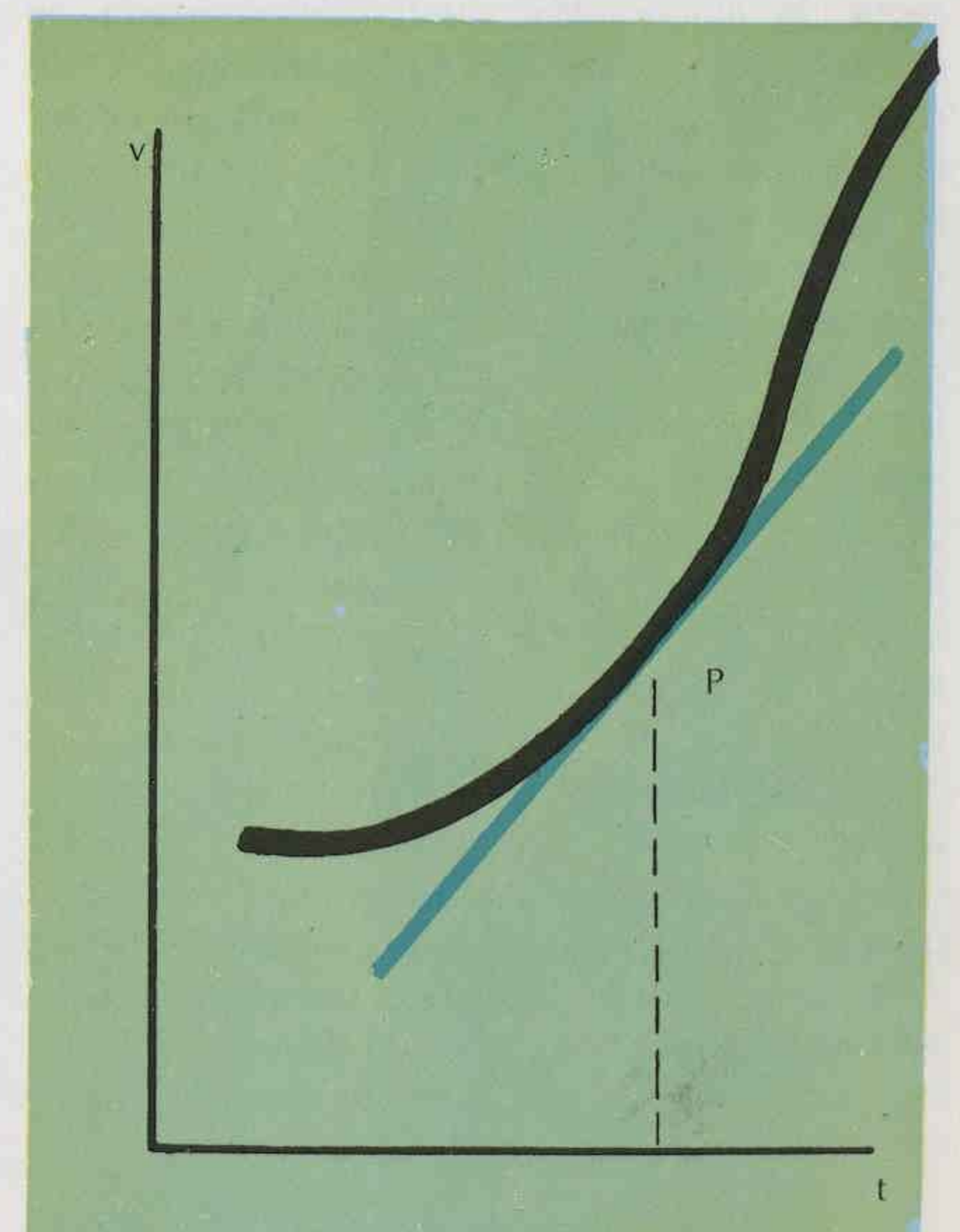
La pendiente de la tangente en P es la velocidad en el instante  $t_0$ .



La aceleración media es el vector rojo.



Acceleraciones tangencial  $a_t$  y normal  $a_n$ .



La pendiente de la tangente a la curva es la aceleración tangencial en el instante correspondiente al punto de tangencia.

del tiempo. A cada instante, pues, corresponderá un punto de la curva cuya ordenada será el valor de la velocidad de dicho instante. Lo que antes teníamos para los espacios, ahora lo tendremos para las velocidades, y como la pendiente de la tangente a la curva en un punto era el aumento del espacio en unidad de tiempo, en el nuevo diagrama será el aumento del módulo de la velocidad en unidad de tiempo (aceleración tangencial). Si la velocidad conservara constante su módulo (movimiento uniforme), la gráfica sería una recta horizontal y su pendiente, nula; luego, los *movimientos uniformes tienen aceleración tangencial nula*.

Si la trayectoria fuera rectilínea, el radio de curvatura sería infinito en todos sus puntos, por lo que la aceleración normal sería nula; luego, los *movimientos rectilíneos tienen aceleración normal nula*. Así, el *único movimiento que carece de aceleración es el rectilíneo y uniforme*, pues, si no fuera rectilíneo tendría, por lo menos, aceleración normal, y si no fuera uniforme, aceleración tangencial.

**MOVIMIENTO RECTILÍNEO UNIFORMEMENTE ACCELERADO**

Se llama así el movimiento rectilíneo que tiene constante su aceleración. Por ser rectilíneo, la aceleración será puramente tangencial y como la dirección de la tangente es siempre la de la recta, la aceleración queda determinada de antemano en dirección. Asignando un sentido positivo de recorrido a la trayectoria, la aceleración podrá quedar determinada por su módulo afectado de signo + o -, según que su sentido sea el asignado como positivo o como negativo, respectivamente, a la trayectoria. La constancia de la aceleración, pues, se reduce a la invariabilidad de su módulo y del signo asignado. Por coincidir en este caso con la aceleración tangencial, será igual al aumento de velocidad en unidad de tiempo y, como es constante, en intervalos de tiempo iguales los aumentos de velocidad serán iguales. Se entiende que un aumento negativo es una disminución. Con esto, si representamos por  $a$  la aceleración (positiva o negativa), por  $v_0$  la velocidad que lleva el móvil en el instante en que ponemos en marcha nuestro cronómetro y por  $v$  la velocidad al cabo de un tiempo  $t$ , el aumento (positivo o negativo) de velocidad en ese tiempo es  $v - v_0$ , y en un tiempo unidad será  $t$  veces menor; luego, tendremos:

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

o sea,  $v = v_0 + at$ . Si queremos hallar el espacio recorrido en un tiempo  $t$ , bastará que multipliquemos este tiempo por la velocidad media correspondiente,  $v_m$ ; luego:

$$v_m = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} = v_0 + \frac{1}{2} at,$$

y multiplicando esta velocidad media por  $t$ , tendremos la distancia  $e - e_0$  recorrida en el tiempo  $t$ ; luego

$$e - e_0 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

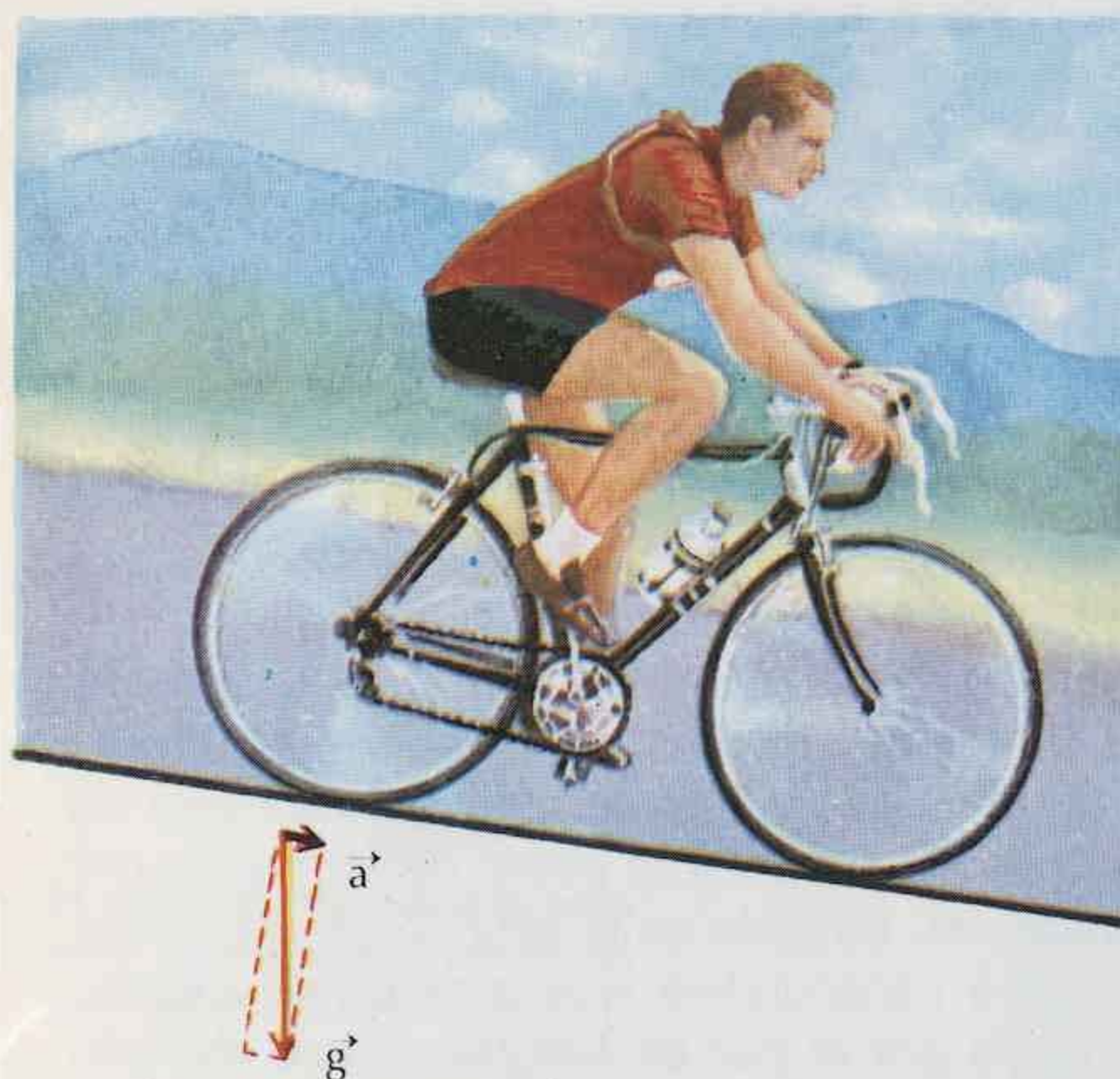
De la expresión que da la aceleración de un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado se derivan inmediatamente las unidades de medida para la aceleración. En el sistema internacional, dicha unidad es el metro por segundo por segundo ( $m/m^2$ ), que es la aceleración que tendría un móvil que, animado de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, incrementara su velocidad en 1 m/s cada segundo. En el sistema c.g.s. se tiene el centímetro por segundo por segundo, que es la aceleración de un móvil que, animado de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, incrementa su velocidad en 1 cm/s cada segundo. Un cuerpo abandonado a cierta altura de la superficie terrestre cae con una aceleración de  $9,8 m/s^2$ , a la que se da el nombre de *aceleración de la gravedad*.

**MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME**

Si un móvil describe una trayectoria circular con velocidad de módulo constante, su aceleración tangencial será nula, pero no su aceleración normal, que será constante por serlo  $v^2$  y el radio de curvatura, que es el de la circunferencia trayectoria. Así, pues, la aceleración será puramente normal, y, como siempre está dirigida hacia el centro de la trayectoria, recibe el nombre de *aceleración centrípeta*. Recíprocamente, si un móvil tiene una aceleración puramente normal y constante, su movimiento será circular uniforme. En efecto, por ser nula la aceleración tangencial, la velocidad tendrá módulo constante, y la constancia de la aceleración normal  $v^3/R$  exige que sea constante el radio de curvatura  $R$ , lo cual sólo ocurre en el caso en que la curva resulte ser una circunferencia.



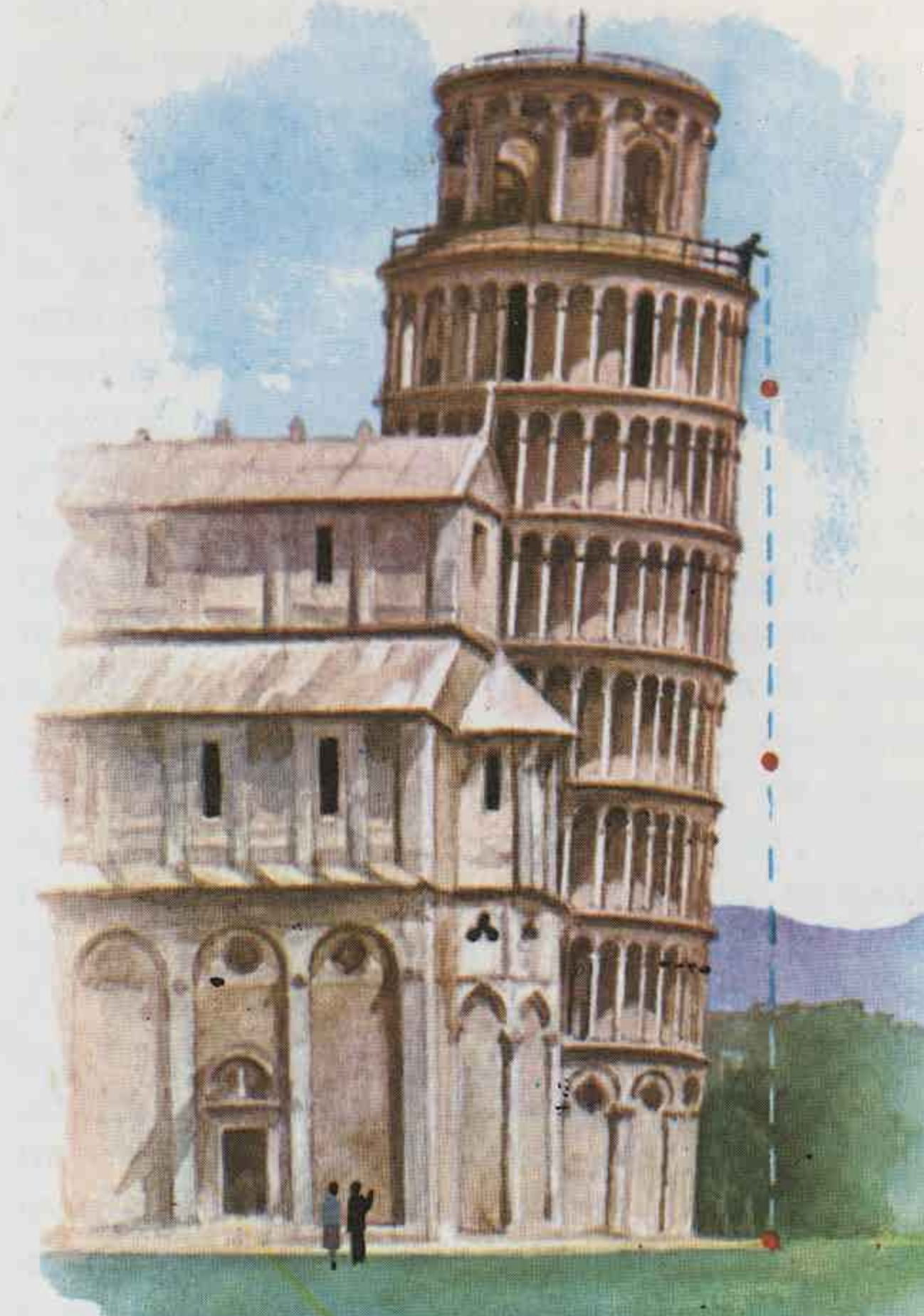
La caída de una manzana con movimiento uniformemente acelerado sugirió a Newton la teoría de la gravitación.



La aceleración de la bicicleta es la proyección, sobre la pendiente, de la aceleración  $g$  de la gravedad.



Frenar bruscamente supone una aceleración constante hacia atrás. Un objeto lanzado verticalmente, hacia arriba, tiene una aceleración constante hacia abajo.



Galileo descubrió que los cuerpos caen con aceleración constante.



**FUERZA**

La noción de fuerza la tenemos a través del esfuerzo muscular. Mediante un esfuerzo muscular lanzamos una pelota o sostenemos un cuerpo pesado. Es decir, mediante un esfuerzo muscular alteramos el estado de reposo de la pelota o evitamos el movimiento de caída del cuerpo pesado. También podríamos alterar el estado de movimiento de una pelota invirtiendo su sentido de movimiento, tal como se hace en el tenis al proporcionar un esfuerzo muscular a la raqueta. Toda circunstancia que pueda ser sustituida por la acción de un esfuerzo muscular o toda circunstancia cuyo efecto pueda ser contrarrestado por un esfuerzo muscular recibe el nombre de *fuerza*. Por los ejemplos anteriores, vemos que *fuerza es toda causa capaz de alterar el estado de reposo o movimiento de un cuerpo*. La aplicación de un esfuerzo muscular entraña una dirección y un sentido, aparte la mayor o menor intensidad del esfuerzo. Por tanto, las fuerzas serán magnitudes vectoriales. Como tales, cuando a un mismo punto se hallen aplicadas varias fuerzas, podrá contrarrestarse su efecto realizando un esfuerzo muscular que sería el mismo que fuera capaz de oponerse a una fuerza única igual a la suma vectorial de las fuerzas aplicadas. Esto equivale a decir que cuando sobre un punto actúen simultáneamente varias fuerzas, las podemos sustituir por la resultante de sumarlas vectorialmente.

Para medirlas, se puede aprovechar el hecho de que un resorte, al ser estirado, desarrolla una fuerza tanto mayor cuanto mayor sea su deformación. De esta manera, cuando la que opone el resorte sea igual y contraria a la que se le aplica, la suma de las fuerzas será nula, y el resorte quedará en equilibrio, pues, si aumentara su alargamiento, la fuerza que aplica sería mayor que la aplicada a él, y si disminuyera su alargamiento la fuerza sería menor, y en uno y otro caso la resultante no sería nula. Así, pues, podemos graduar el resorte haciendo corresponder a cada alargamiento una fuerza, y tendremos el instrumento de medida de fuerzas llamado *dinamómetro*.

Cuando una fuerza aplicada a un cuerpo lo deforma sin alterar su estado de reposo o movimiento, ocurre que la deformación del cuerpo

crea otra fuerza igual y opuesta, de la misma manera que lo hace el dinamómetro, por lo que la resultante es nula.

**MOMENTO DE UNA FUERZA**

Se llama momento de una fuerza respecto a un punto a una magnitud vectorial perpendicular al plano determinado por la fuerza y el punto, dirigida en el sentido en que avanzaría un sacacorchos situado en el punto y que girara en el sentido indicado por la fuerza y cuyo módulo es el producto del módulo de la fuerza por la distancia del punto a la recta soporte de la fuerza.

El concepto de momento tiene particular importancia en los casos en que intervengan sistemas que puedan girar en torno a un punto o a un eje. Por ejemplo, para cerrar una puerta lo mismo da aplicar una fuerza a su borde que aplicar una fuerza doble a su punto medio o una *n* veces mayor a una distancia de los goznes igual a la *n*-ésima parte de la anchura de la puerta.

**PAR DE FUERZAS**

Cuando a un cuerpo sólido se aplican dos fuerzas soportadas por la misma recta, las dos de igual módulo, pero de sentidos opuestos, sus efectos se contrarrestan y es como si no se aplicara fuerza alguna (salvo si el cuerpo fuera deformable). Pero si las fuerzas no tienen la misma recta soporte, sus momentos respecto a un punto cualquiera serán tales que el momento resultante será un vector perpendicular al plano determinado por las fuerzas, dirigido en el sentido en que avanzaría un sacacorchos que girase en la forma indicada por el *par de fuerzas* y cuyo módulo es igual al producto de la distancia de separación de las rectas soporte por el módulo común de dichas fuerzas.

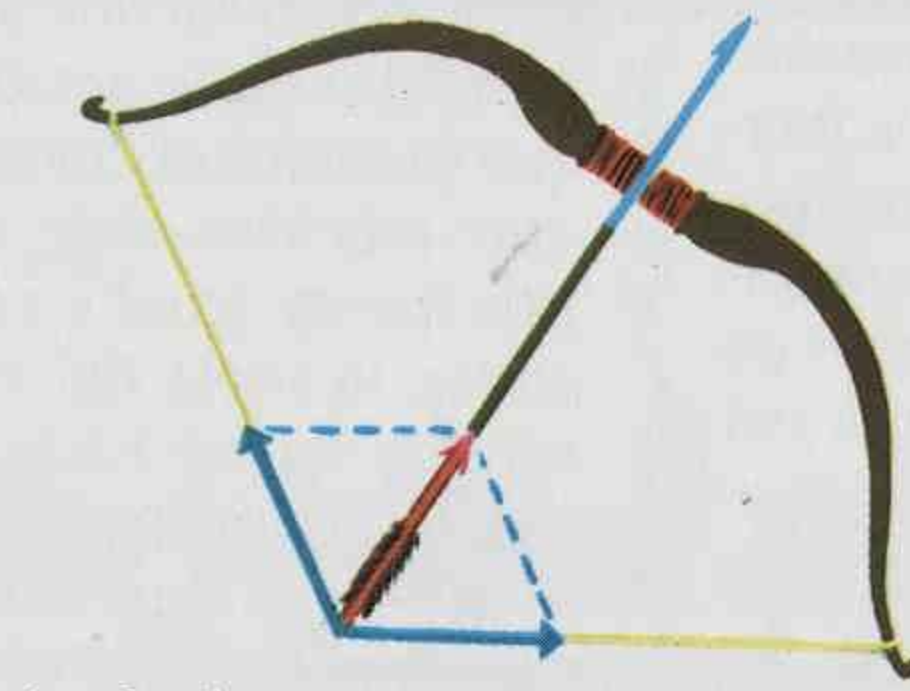
Puede demostrarse que cuando a un cuerpo se le aplica un sistema de fuerzas cualesquiera, el efecto es el mismo que si se le aplicara solamente una fuerza y un par. La fuerza sería igual a la que se obtendría sumando vectorialmente todas las fuerzas; y si la suponemos aplicada a un punto, el par tendría un momento igual a la suma vectorial de los momentos de todas las fuerzas respecto a dicho punto.



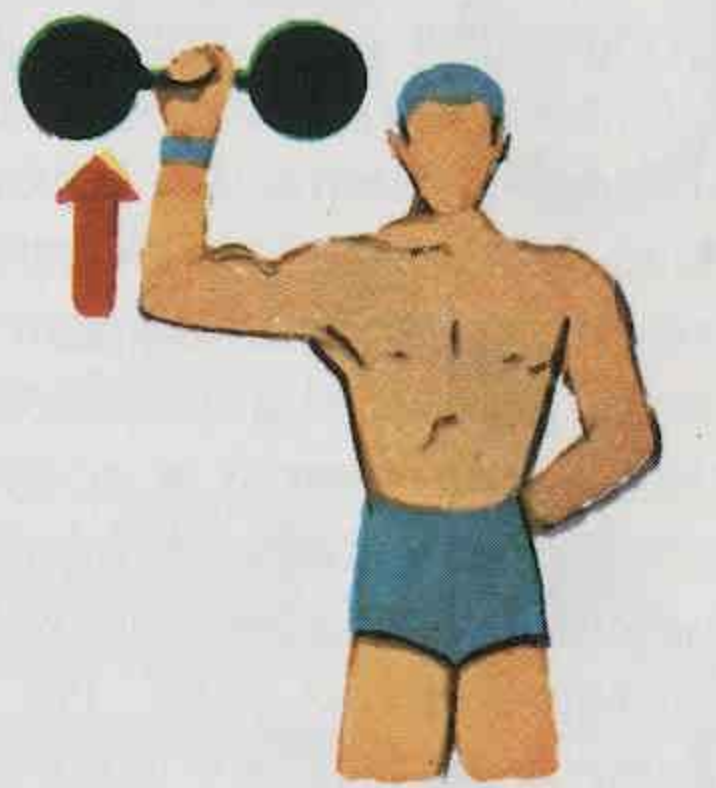
Ejemplos de fuerza.



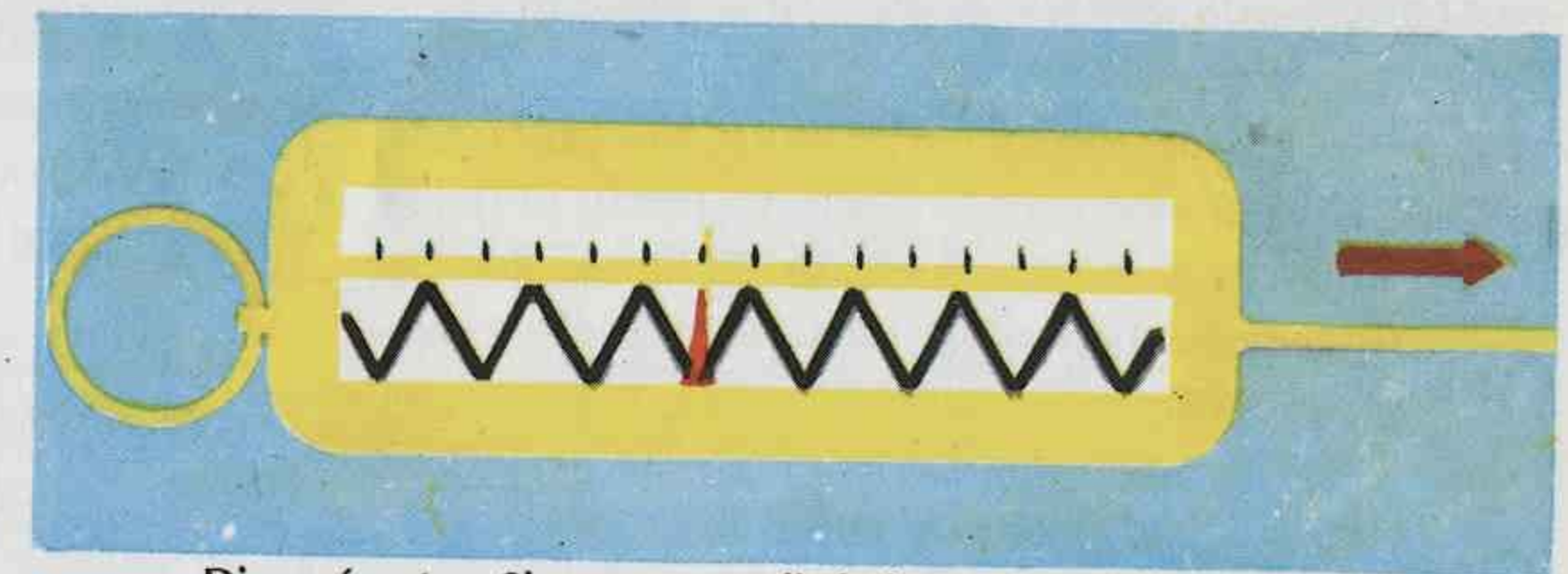
La aplicación del esfuerzo muscular contrarresta el efecto del peso (caída del cuerpo).



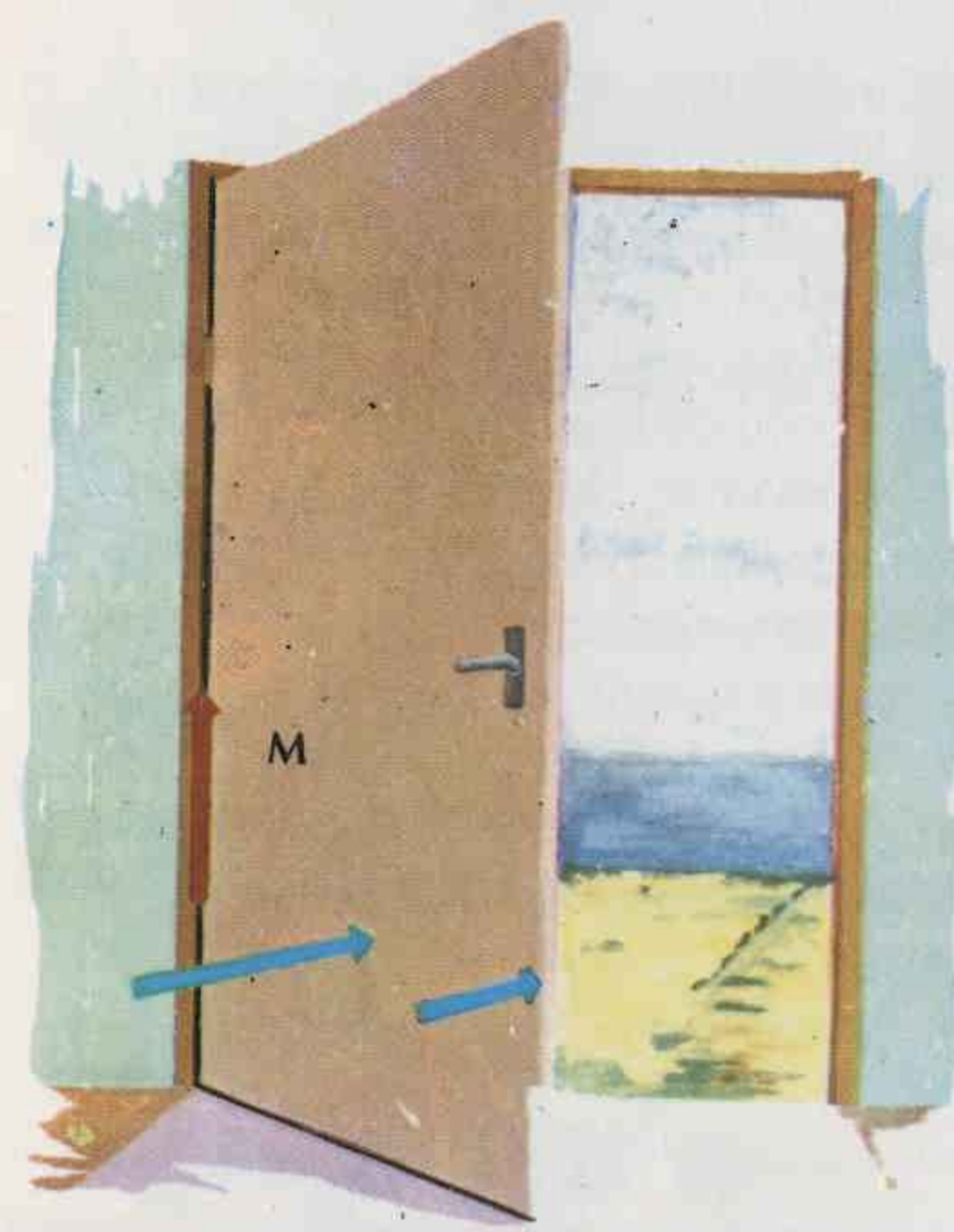
Las dos fuerzas que ejerce la cuerda de un arco sobre el dardo equivalen a una fuerza suma vectorial de ellas.



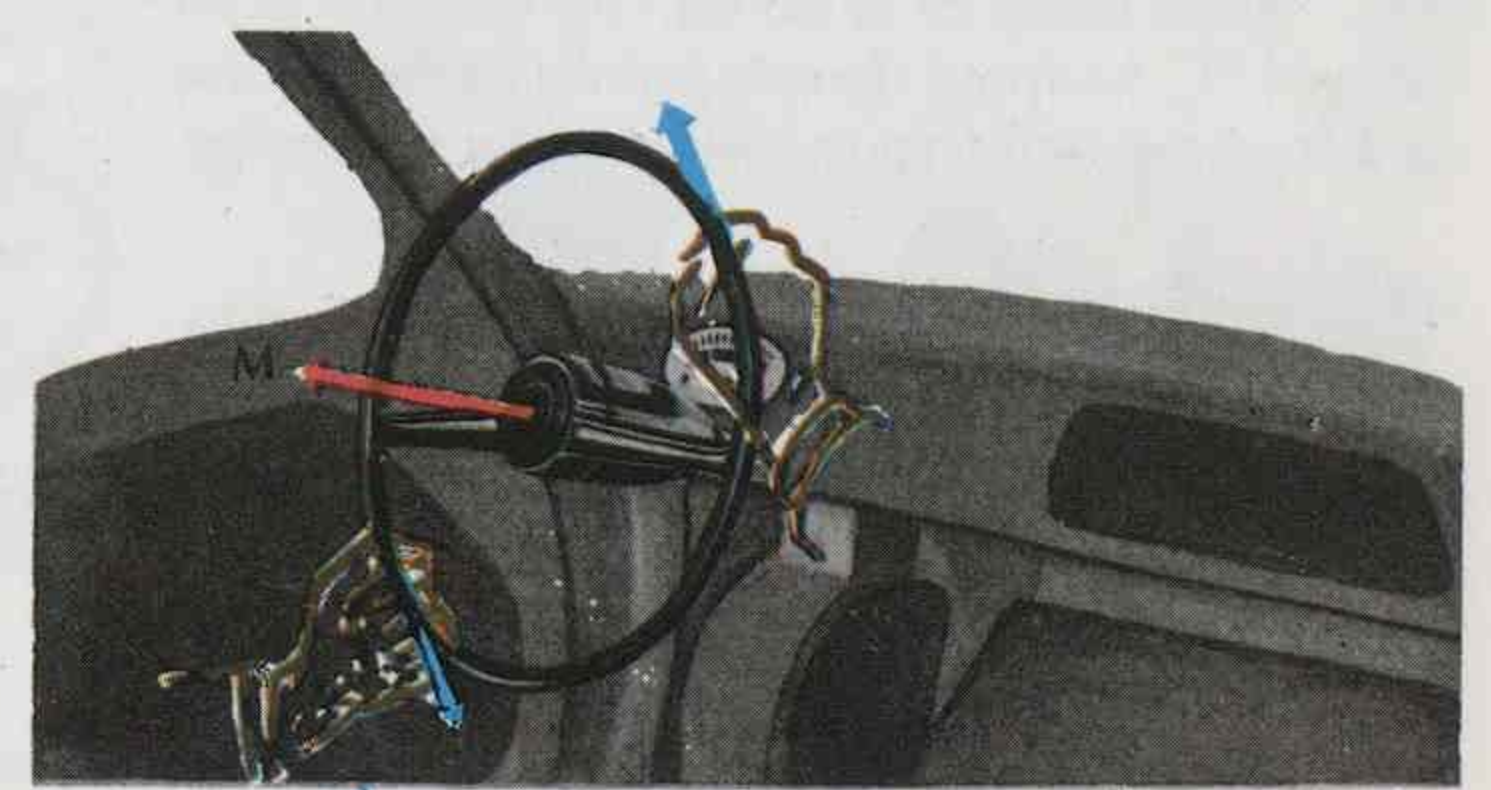
Ejemplo de fuerza.



Dinamómetro. Sirve para medir la intensidad de la fuerza.



Momento. En M, el eje de momentos.



Par de fuerzas. En M, el eje del par.



DINÁMICA

Lo anteriormente dicho nos indica que las fuerzas ocasionan desplazamientos, y los momentos, giros. La Dinámica estudia la relación que existe entre fuerza y movimiento y está regida por las llamadas leyes de Newton, que pasamos a describir.

Armémonos de un cinta métrica, de un cronómetro y de un dinamómetro. Sujeteros éste a una vagoneta, con lo cual, al tirar, nos marcará la fuerza con que lo hacemos, mientras que con el cronómetro y la cinta métrica podremos determinar la aceleración que toma la vagoneta al aplicarle la fuerza. Experimentalmente, se observa que, cualquiera que sea la fuerza aplicada a la vagoneta, el cociente entre ella y la aceleración es siempre el mismo, o sea que, si duplicamos la fuerza, la aceleración se duplica, si triplicamos la fuerza, se triplica la aceleración, etc. Es decir, las fuerzas son proporcionales a las aceleraciones que comunican. Como el cociente entre fuerza y aceleración es siempre el mismo, no dependerá ni de la fuerza ni de la aceleración. Depende sólo del cuerpo. En efecto, si cargáramos más la vagoneta y repitiéramos las medidas anteriores, obtendríamos un cociente entre fuerza y aceleración distinto del anterior, pero siempre el mismo. Lo único que se ha variado es la *cantidad de materia*, cuyo estado de movimiento se varía. Por tanto, el valor del cociente entre fuerza y aceleración debe tomarse como una cantidad característica de la materia sometida a fuerzas y se le da el nombre de *masa inerte* del cuerpo. Como  $F/a = m$ , donde  $F$  es la fuerza aplicada a la aceleración que toma el cuerpo y  $m$  la masa inerte, resulta que cuanto mayor sea ésta tanto menor será la aceleración que tome el cuerpo para una fuerza dada. Es decir, la masa inerte, o *inercia*, es una medida de la resistencia que ofrece el cuerpo al alterar su estado de movimiento o reposo.

Hemos presentado la masa inerte como una medida de la cantidad de materia existente, y ello permite adoptar un patrón de masa. Éste es un cilindro de platino iridiado que se conserva en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, de Sèvres, y cuya masa es la de un litro de agua destilada a 4 °C. La masa de este patrón es denominada *kilogramo* (kg) y su milésima parte, *gramo* (g).

LEYES DE NEWTON

Podemos definir la unidad de fuerza a partir de la ley de Newton,  $F = ma$ . Así, la unidad de

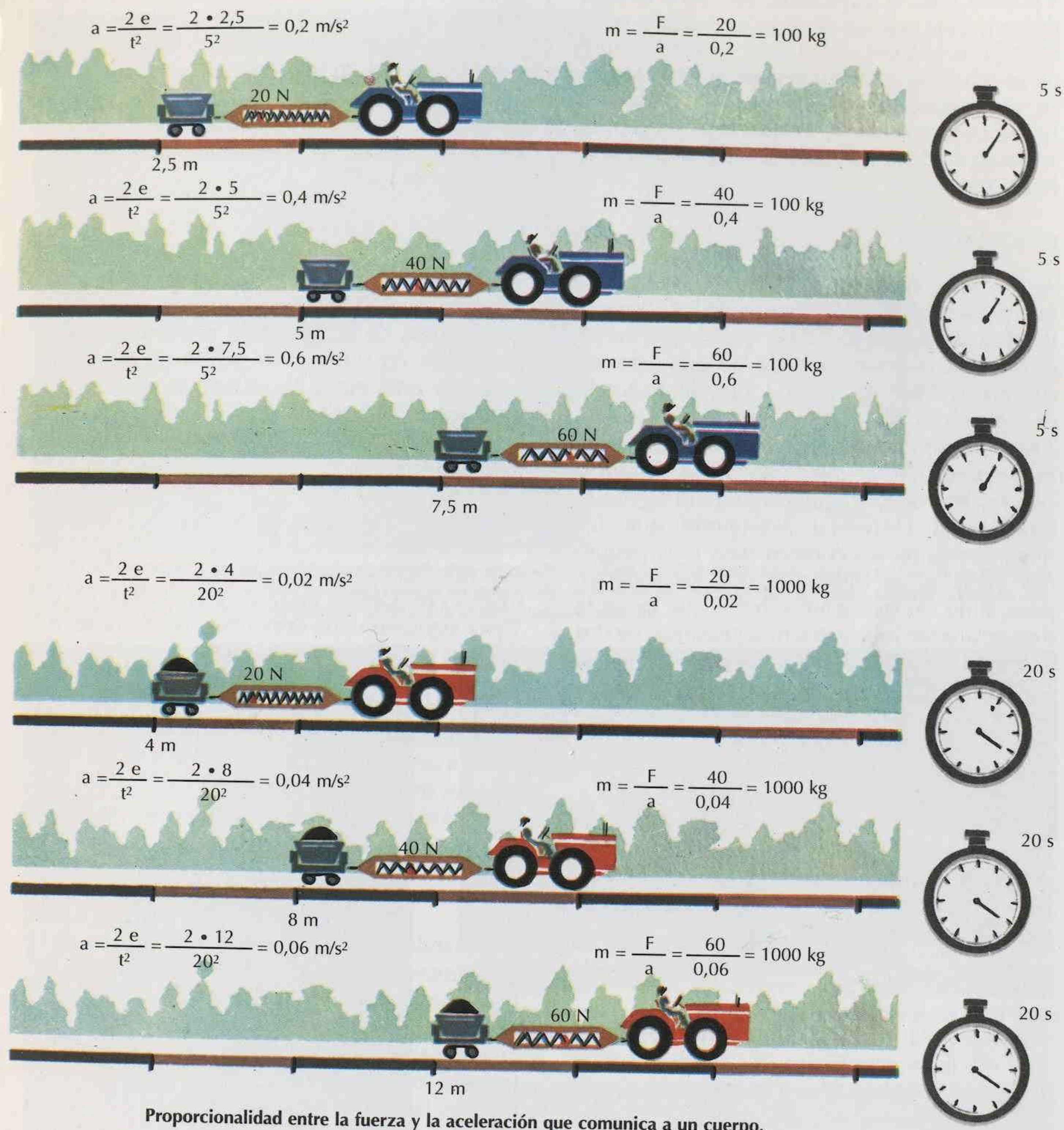
fuerza en el sistema internacional es el *newton* (N), y éste, la fuerza que, aplicada a una masa de 1 kg, le comunica la aceleración de 1 m/s<sup>2</sup>. También puede definirse otra unidad, llamada *dina*, como la fuerza que, aplicada a una masa de 1kg, le comunica una aceleración de 1 cm/s<sup>2</sup>.

De la anterior ley de Newton resulta que si sobre un cuerpo no actúan fuerzas, la aceleración de éste ha de ser nula. Este hecho era ya conocido por Galileo, quien lo enunció diciendo que *un cuerpo no puede tomar por sí mismo aceleración*. Es decir que, si tiene aceleración, debe habérsela comunicado otro cuerpo ejerciéndole una fuerza. Por tanto, si no tiene aceleración, *un cuerpo sobre el que no se ejerzan fuerzas se hallará en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme* (principio de la inercia).

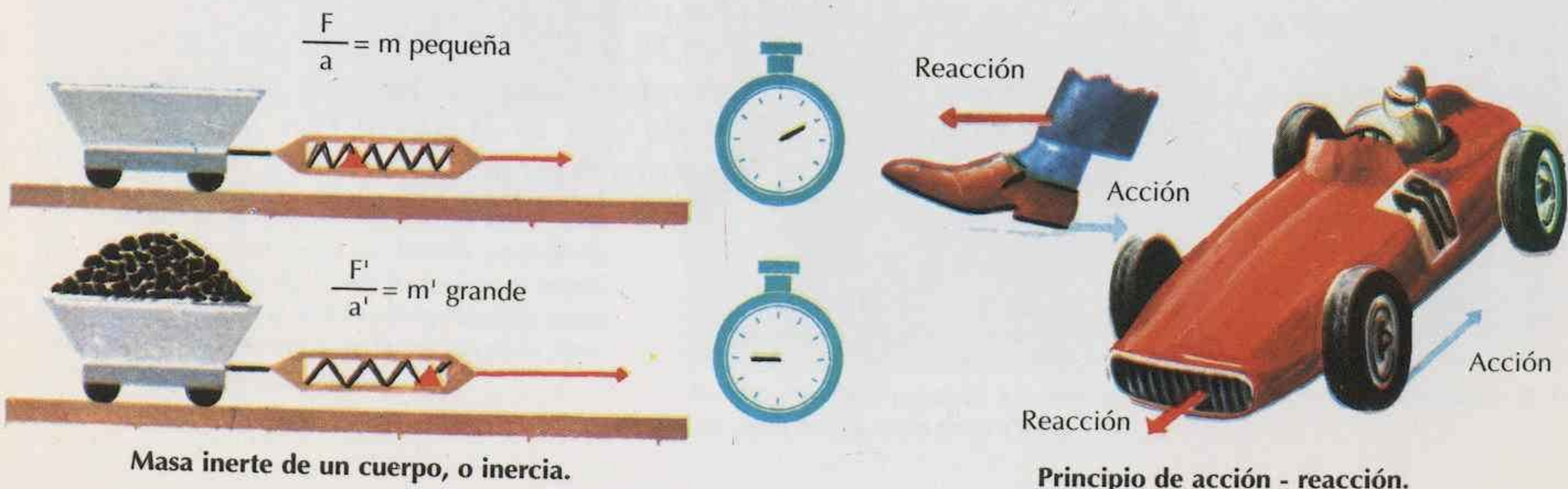
Para completar los postulados sobre los que se edifica la Mecánica de Newton se tiene el *principio de la acción y la reacción*, que dice que *cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro (acción), éste efectúa sobre el primero una fuerza igual y contraria (reacción)*. Así, al andar, la suela del zapato ejerce sobre la Tierra una fuerza hacia atrás, y la Tierra efectúa sobre el peatón una fuerza igual hacia adelante que es la que le hace avanzar. *El hecho de que la acción no se anule con la reacción se debe a que están aplicadas a cuerpos diferentes*. Las ruedas motrices de un automóvil ejercen sobre la Tierra una fuerza hacia atrás y la Tierra le aplica otra igual hacia adelante, que lo acelera.

DINÁMICA DEL MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME

Al estudiar la Cinemática, vimos que el movimiento circular uniforme tiene una aceleración puramente normal, o centrípeta,  $v^2/R$ , debida a la variación continua de dirección de movimiento. La ley fundamental de la Dinámica nos indica que si un punto de masa  $m$  está en movimiento circular uniforme, deberá estar sometido a una *fuerza centrípeta* de igual dirección y sentido que la aceleración centrípeta e igual a  $m v^2/R$ . Esto significa que si un cuerpo se halla sometido a una fuerza  $F$  dirigida siempre hacia un mismo punto, situado a una distancia  $R$  de él, y su velocidad es perpendicular al radio  $R$  y su valor  $v$  cumple con  $F = m v^2/R$ , proseguirá



Proporcionalidad entre la fuerza y la aceleración que comunica a un cuerpo.



Masa inerte de un cuerpo, o inercia.

Principio de acción - reacción.

en movimiento circular uniforme de velocidad  $v$  y radio  $R$  de la trayectoria. Éste sería el caso de un satélite que pusiéramos en órbita a poca altura, con una velocidad de 7,9 km/s. El radio de su órbita sería prácticamente el radio terrestre y, en estas condiciones, su peso igualaría a la fuerza centípeta, o, lo que es lo mismo, la aceleración de la gravedad sería igual a la aceleración centrípeta.

**GRAVITACIÓN**

Al ver caer una fruta de su árbol, Newton se interesó en la causa de la caída de los cuerpos, llegando a la conclusión de que caen a causa de una atracción por parte de la Tierra, pero en su estudio llegó más allá, al formular la teoría de que *todos los cuerpos se atraen con una fuerza proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa*. Este enunciado de la ley de la Gravitación Universal presupone que las dimensiones de los cuerpos sean muy pequeñas frente a las distancias que los separan, pues, si no, no sabríamos si había que tomar la distancia entre los puntos más próximos de dos cuerpos, entre los más alejados, o entre los intermedios. Afortunadamente, el cálculo demuestra que si los cuerpos están constituidos por una distribución de corpúsculos simétrica respecto a un punto, la atracción que ejercen en puntos exteriores a ellos es la misma que si toda la masa estuviera concentrada en su centro de simetría, pudiéndose sustituir, a efectos de cálculo, por un punto material. La ley de la Gravitación Universal puede formularse en la forma

$$F = G \frac{mm'}{d^2}$$

donde  $F$  es la fuerza de atracción gravitatoria;  $m$  y  $m'$ , las masas de los dos cuerpos que se atraen;  $d$ , la distancia que los separa, y  $G$  una constante universal que sólo depende del sistema de unidades adoptado.

**GRAVEDAD TERRESTRE**

Cuando uno de los cuerpos que se atraen es la Tierra y el otro es un cuerpo mucho menor situado en sus proximidades, la fuerza de atracción gravitatoria recibe el nombre de peso

del cuerpo, y la atracción, el de *gravedad terrestre*. En la ecuación anterior,  $m'$  será la masa de la Tierra ( $m' = 5,97 \times 10^{24}$  kg); y dividiendo la fuerza  $F$  que se ejerce sobre un cuerpo próximo por su masa  $m$  tendremos, en virtud de la ley de Newton, la aceleración que tomará el cuerpo, la cual se representa por  $g$  y recibe el nombre de *aceleración de la gravedad*, que será:

$$g = \frac{F}{m} = \frac{Gm'}{d^2}$$

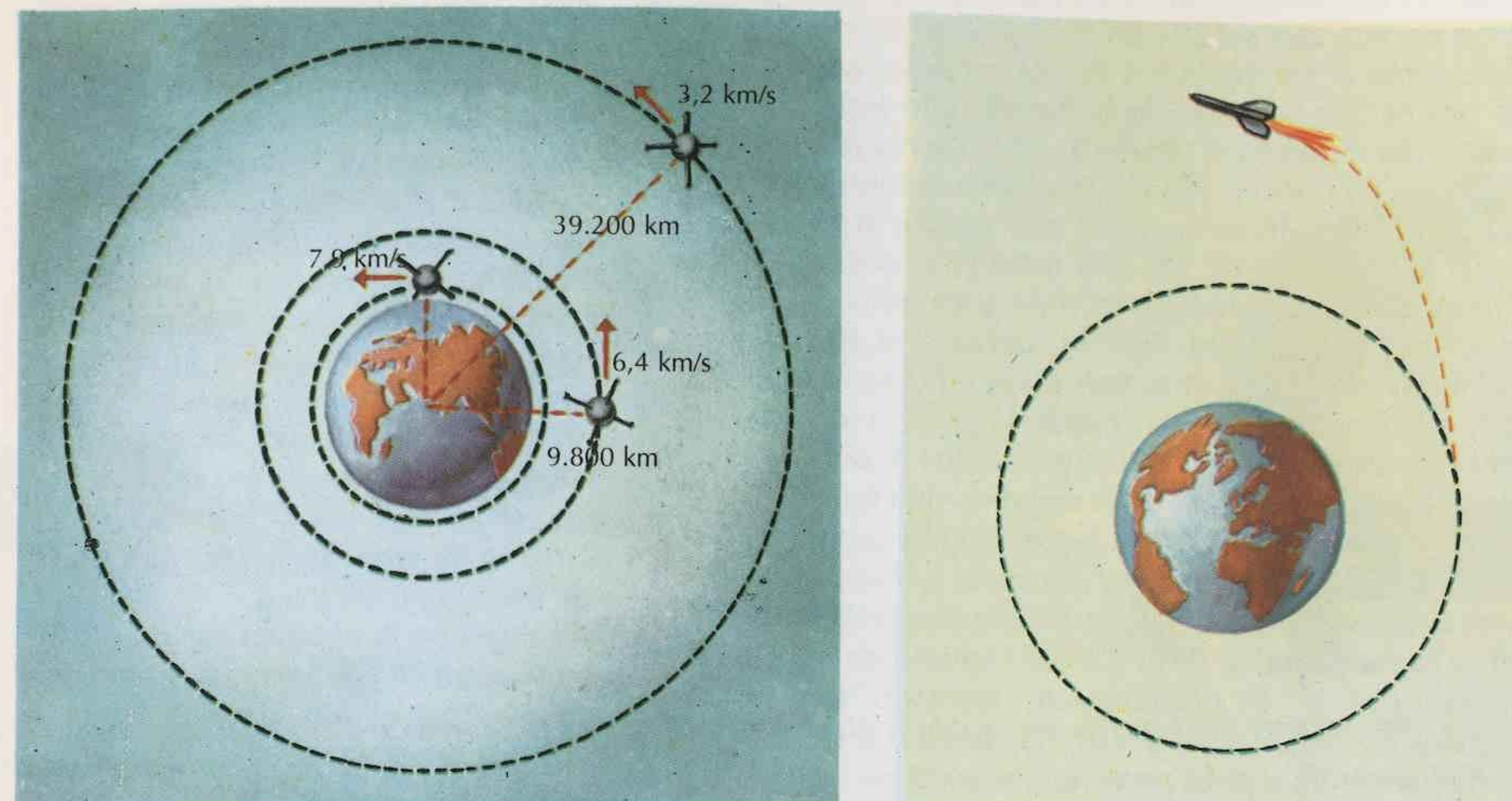
siendo  $d$  la distancia del cuerpo de masa  $m$  al centro de la Tierra, pues podemos considerar que la masa de la Tierra está distribuida simétricamente en torno a su centro. Si el punto estuviera próximo a la superficie terrestre,  $d$  sería aproximadamente igual al radio de la Tierra, y la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre:

$$g_0 = \frac{Gm'}{R^2}$$

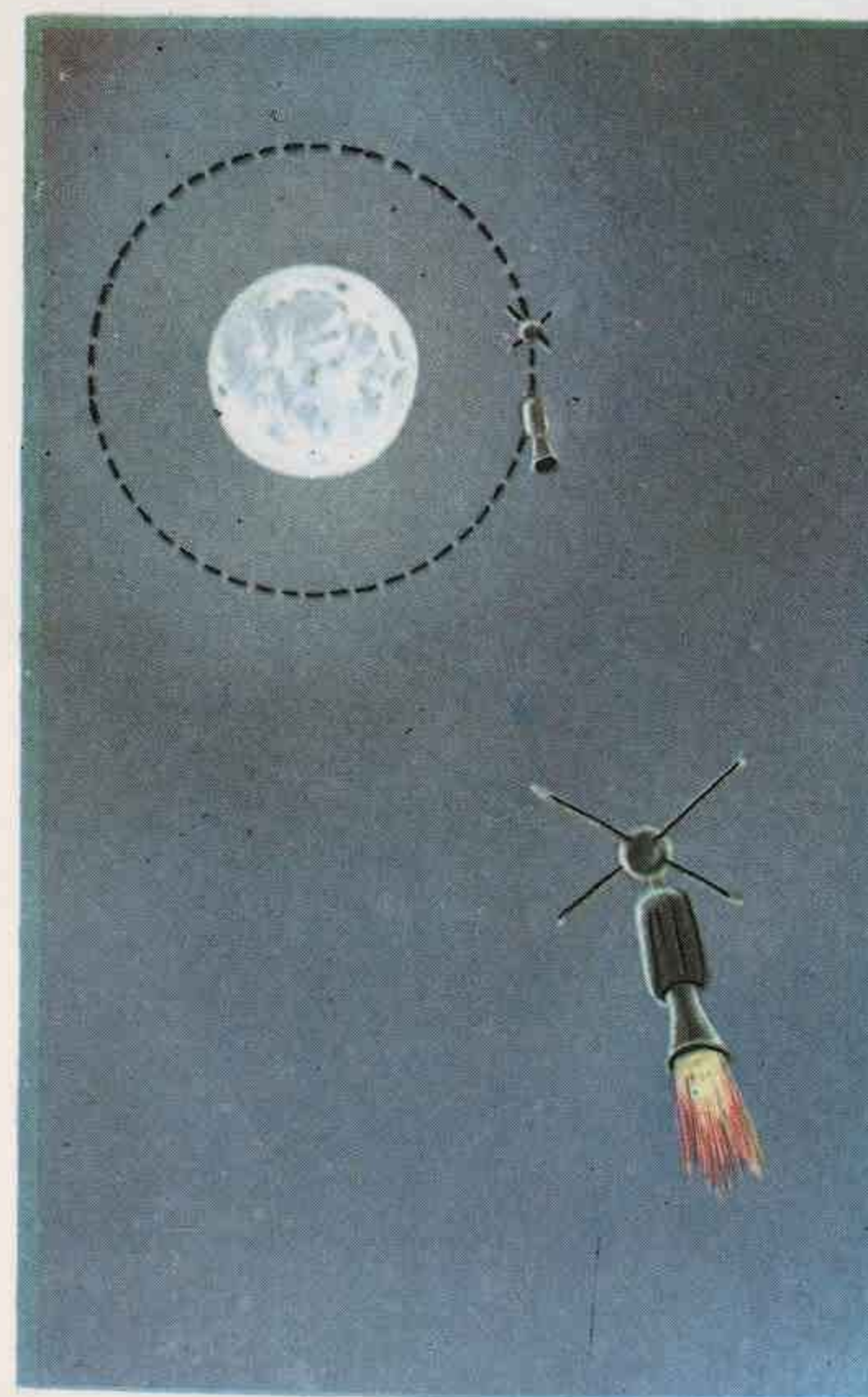
que vale, aproximadamente, 9,8 m/s<sup>2</sup>. Cuando un satélite artificial gira en torno a la Tierra siguiendo una órbita circular de radio  $d$ , su peso es la fuerza centrípeta que origina el movimiento circular, y  $g$  es la aceleración centrípeta  $v^2/d$ , o sea, que  $v = \sqrt{gd}$ . Por esto, la velocidad que corresponde a un satélite que vuele a poca altura ( $d = R = 6.400$  km;  $g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>) es de 7,9 km/s. Dividiendo las expresiones obtenidas para  $g$  y  $g_0$  resulta:

$$\frac{g}{g_0} = \frac{R^2}{d^2}$$

lo que indica que la aceleración de la gravedad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al centro de la Tierra. Así, a 6.400 km de altura, los cuerpos tienen un peso igual a la cuarta parte del que tienen en la superficie terrestre, porque su masa es la misma y en cambio  $g$  es la cuarta parte de 9,8 m/s<sup>2</sup>. También  $g_0$  puede sufrir pequeñas variaciones sobre la superficie terrestre, resultando máxima en los polos (9,83 m/s<sup>2</sup>) y mínima en el Ecuador (9,78 m/s<sup>2</sup>). Ello hace que para definir el *kilopond*, o kilogramo-fuerza, deba hacerse diciendo que *es la fuerza con que la Tierra atrae a una masa de 1 kg situada a nivel del mar y a 45° de latitud*.



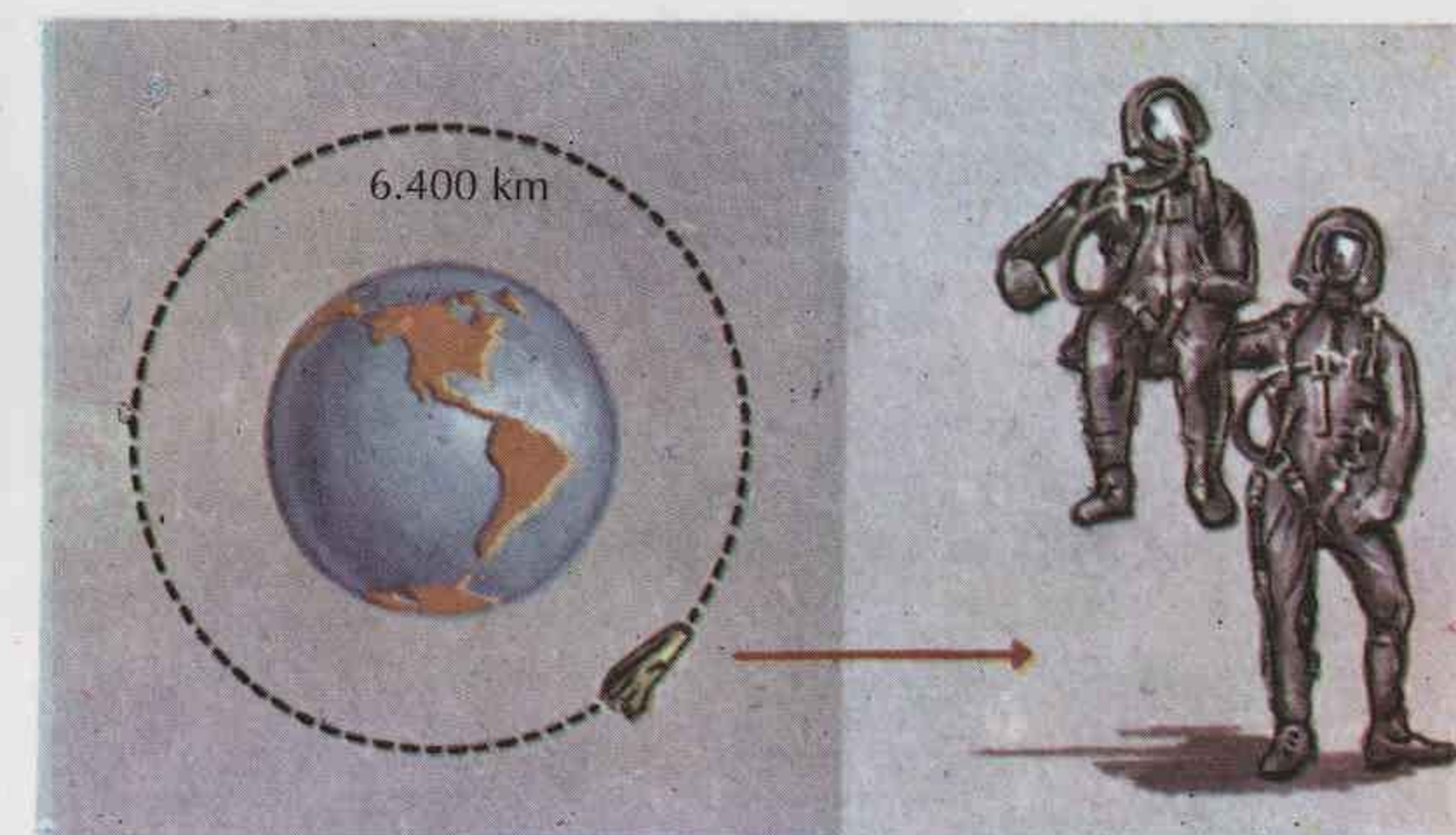
A cada órbita circular de los satélites corresponde una velocidad que haga igual la aceleración centrípeta a la de la gravedad (fig. de la izquierda). Si un satélite en órbita dispara un cohete (fig. de la derecha), su velocidad aumenta, se aleja buscando una órbita para la que  $v^2/R = g$ , y permanece en ella si la alcanza tangencialmente.



Poner en órbita circular un satélite consiste en dejarlo en un punto de la órbita prevista y moviéndose perpendicularmente al radio con una velocidad que haga la fuerza centrípeta igual a la atracción del astro. Entonces se suprimen los cohetes, y el satélite desprendido sigue en la órbita, solamente bajo la acción de la fuerza de atracción gravitatoria.



La gravedad lunar es 1/6 de la terrestre, por lo cual los saltos en su superficie podrán ser 6 veces mayores que en la Tierra.



En una estación espacial a 6.400 km de altura, un individuo que en la Tierra pesa 60 kg, sólo pesa 15 kg.

TRABAJO Y ENERGÍA

Cuando una fuerza mueve su punto de aplicación se dice que realiza un trabajo y se define éste como el producto del desplazamiento por la proyección sobre él de la fuerza. Ello equivale a decir que es el producto de la fuerza por la proyección sobre ella del desplazamiento de su punto de aplicación, pues este producto es igual que el anterior. De esta definición deducimos que: 1.º, el trabajo es nulo si es nulo el desplazamiento, si es nula la fuerza o si, no siéndolo ni uno ni otra, son perpendiculares; 2.º, el trabajo es positivo cuando la proyección del desplazamiento sobre la fuerza tiene el sentido de ésta; 3.º, el trabajo es negativo si la fuerza es de sentido contrario a la proyección sobre ella del desplazamiento; 4.º, cuando la fuerza y el desplazamiento siguen la misma dirección, el trabajo es igual al producto del módulo de la fuerza por el desplazamiento, afectado de signo + o - según sean del mismo sentido o de sentidos contrarios. La persona que sostiene un peso, sin subirlo ni bajarlo, no realiza trabajo, aunque se le canse el brazo, porque la fuerza con que sostiene el peso no desplaza su punto de aplicación.

La unidad de medida del trabajo es, en el sistema internacional, el *joule* (J), que se define como el trabajo que realiza una fuerza de 1 N al desplazar su punto de aplicación 1 m en su propia dirección y sentido. Si en lugar de una fuerza de 1 N se considerara una fuerza de 1 kilopond, la unidad sería el *kilopondmetro* (kmp) o *kilográmetro*, que será igual a 9,8 J. En el sistema c.g.s. la unidad es el *erg*, trabajo que realiza una fuerza de una dina al mover su punto de aplicación 1 cm en su propia dirección y sentido.

ENERGÍA

Cuando un cuerpo, o un sistema de cuerpos, es capaz de realizar un trabajo, se dice que posee una energía. Un automóvil que choca contra una barrera yendo muy despacio no la romperá, porque no será capaz de realizar el trabajo necesario para vencer las fuerzas de cohesión de la barrera, pero si choca contra ella llevando una velocidad grande, sí será capaz de romperla. Quiere esto decir que el automóvil, debido a su velocidad, posee una energía, a la que se da el nombre de *energía cinética*. Ésta no

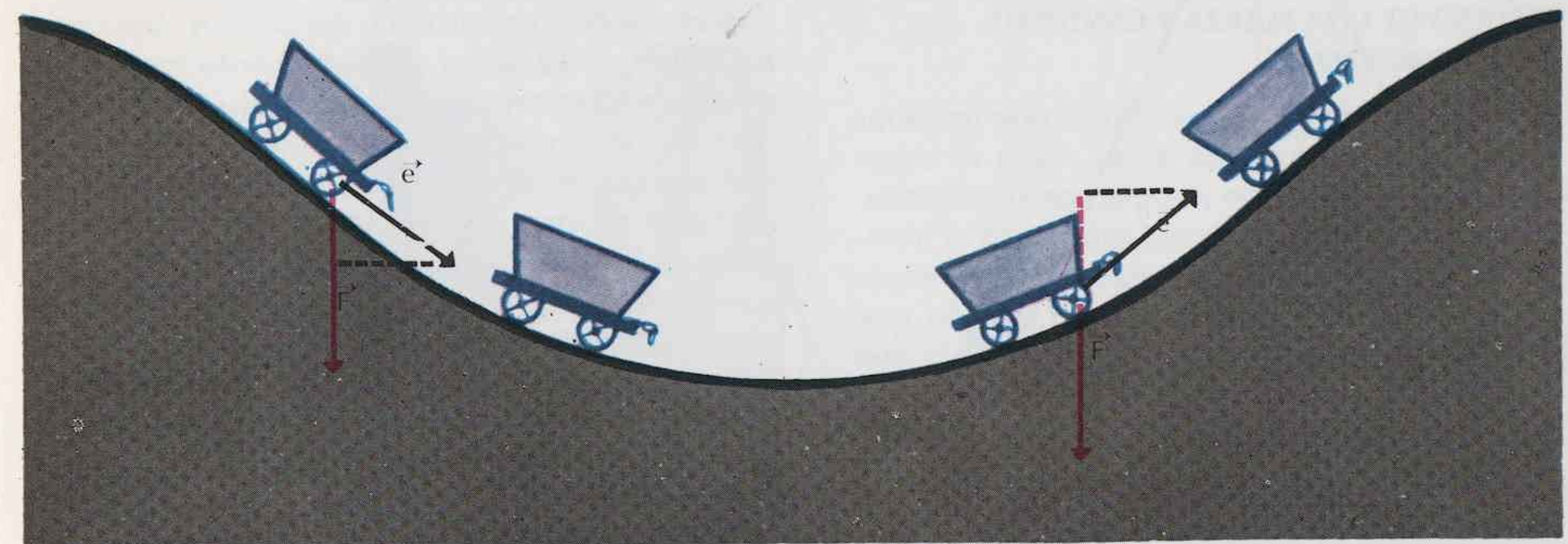
sólo depende de la velocidad, sino también de la masa. Puede demostrarse que el trabajo máximo que puede realizar un cuerpo a causa de su estado de movimiento es  $1/2 mv^2$ , donde  $m$  es la masa del cuerpo y  $v$  su velocidad. Después de haber roto la valla, el coche lleva menor velocidad, porque el trabajo máximo que puede realizar ahora es el anterior menos el que ya ha realizado. Ese trabajo máximo es la energía cinética del coche, y lo anterior se expresa diciendo que el trabajo realizado contra las fuerzas exteriores es igual a la disminución de su energía cinética. Si, por el contrario, en lugar de trabajar *contra* las fuerzas exteriores, éstas se aplican al móvil, favoreciendo el movimiento, el trabajo de dichas fuerzas es igual al aumento de energía cinética del móvil (teorema de las fuerzas vivas).

El aumento de energía cinética de un balón representa un aumento de velocidad y mayor capacidad de realizar el trabajo necesario para doblar hacia atrás las manos del guardameta al tocar la pelota.

Un cuerpo situado a una cierta altura es capaz de efectuar un trabajo debido a su posición, pues, si cayera, su peso realizaría un trabajo al mover su punto de aplicación. Luego, todo cuerpo posee una energía debida a su posición, a la cual llamaremos *energía potencial* del campo gravitatorio terrestre. Como el peso es  $mg$  y la proyección sobre la dirección del peso (vertical) del camino recorrido es el desnivel o altura  $h$ , la energía potencial mencionada vendrá medida por  $mgh$ . Un resorte comprimido (o estirado) una longitud  $x$  es capaz, al soltarlo, de realizar un trabajo, porque, como ocurre con las escopetas de salón (lámina A/9), ejerce una fuerza sobre el balín que, al mover su punto de aplicación, realiza un trabajo que será igual al aumento de energía cinética del balín, en virtud del teorema de las fuerzas vivas. En este caso, la fuerza no es constante sino que, como ocurre en el dinamómetro, es proporcional al valor  $x$  de la deformación. Éste variará desde un valor  $x$ , que es la longitud que se comprime el resorte al cargar la escopeta, hasta 0, que es el valor de la deformación cuando se despega el balín del resorte. El valor medio de la fuerza será  $kx/2$  y multiplicado por el recorrido nos da, como valor del trabajo que realiza el resorte,  $1/2 kx^2$ . Luego, ésta será la energía potencial del resorte deformado. En un instante en que la



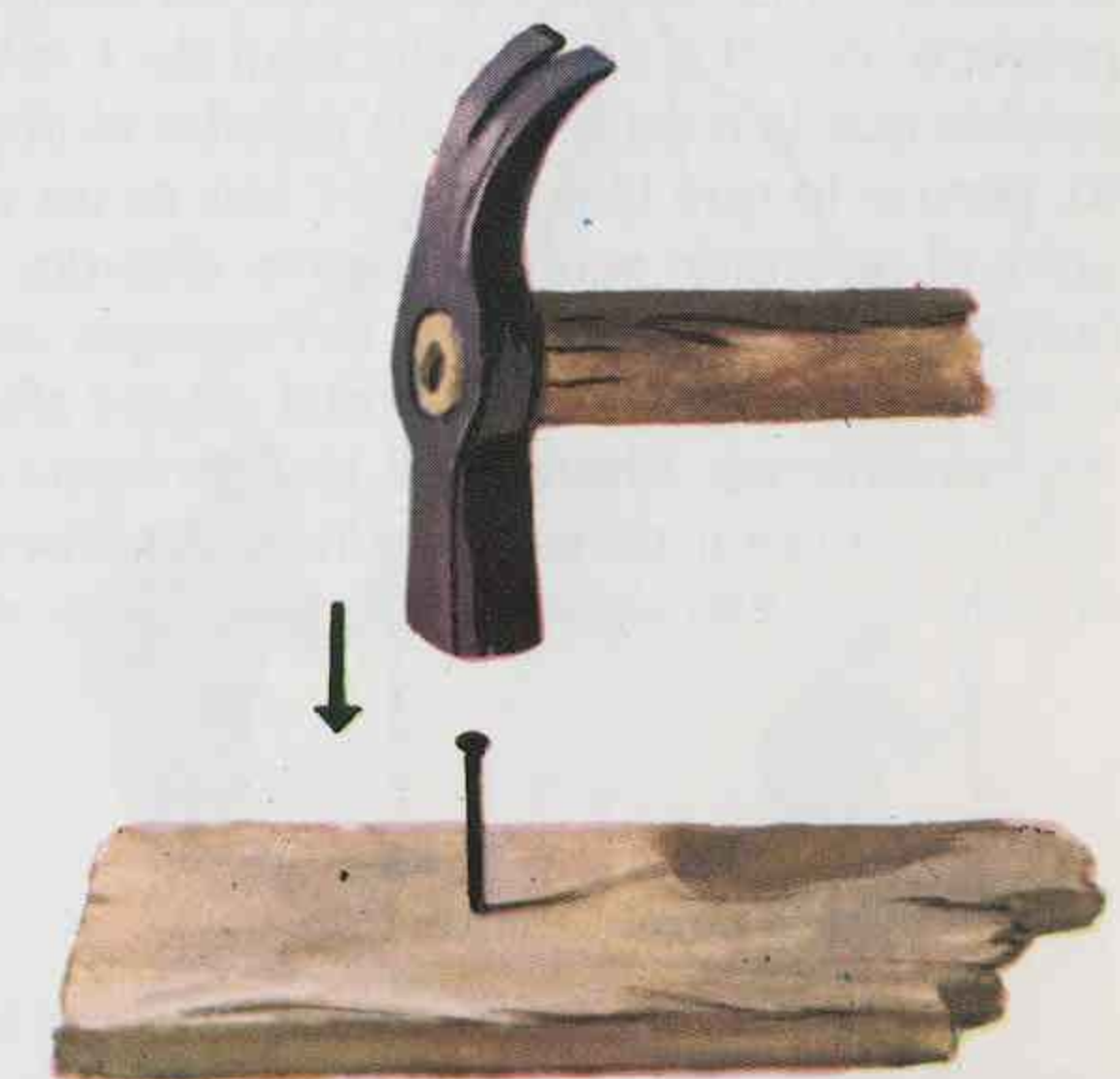
El vector rojo es la fuerza, y el vector negro, el desplazamiento. En los dos primeros casos (izquierda), el trabajo es nulo, y en el tercero (derecha), el trabajo es positivo.



El peso de la vagoneta realiza un trabajo, que es positivo en la de la izquierda y es negativo en la de la derecha.



Energía cinética.



La energía cinética del martillo se transforma en trabajo para hincar el clavo.

deformación sea intermedia, la energía potencial de deformación inicial se habrá transformado, en parte, en trabajo realizado sobre el balón, el cual habrá adquirido una energía cinética igual; luego, la suma de energía cinética y energía potencial se mantiene constante. A la suma de energías cinética y potencial se le da el nombre de *energía mecánica*, y en los casos en que las fuerzas que intervienen realizan un trabajo nulo cuando su punto de aplicación parte de una posición y vuelve a la misma, la *energía mecánica se conserva*. En cambio, cuando intervienen fuerzas como las de rozamiento, tales que, al mover su punto de aplicación partiendo de una posición y volviendo a la misma, el trabajo no sea nulo, no se conserva la energía mecánica. Las fuerzas de rozamiento siempre se oponen al movimiento, y al invertir éste invierten su sentido, por lo que el trabajo que realizan es siempre negativo. Las fuerzas para las cuales se conserva la energía mecánica se llaman *fuerzas conservativas*.

**IMPULSO DE UNA FUERZA Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO**

La ley de Newton,  $F = ma$ , indica que mientras esté aplicada una fuerza a una masa  $m$  existe una aceleración  $a$  que desaparece simultáneamente con la fuerza. Cuanto mayor sea el tiempo de existencia de la aceleración tanto mayor será la variación de la velocidad, por lo que será interesante definir una magnitud en la que intervenga, junto con la fuerza, su tiempo de actuación, que es el de existencia de la aceleración. Dicha magnitud es el *impulso de la fuerza*, que se define como un vector de igual dirección y sentido de la fuerza, y cuyo módulo es el producto del de la fuerza por el tiempo durante el cual ésta actúa.

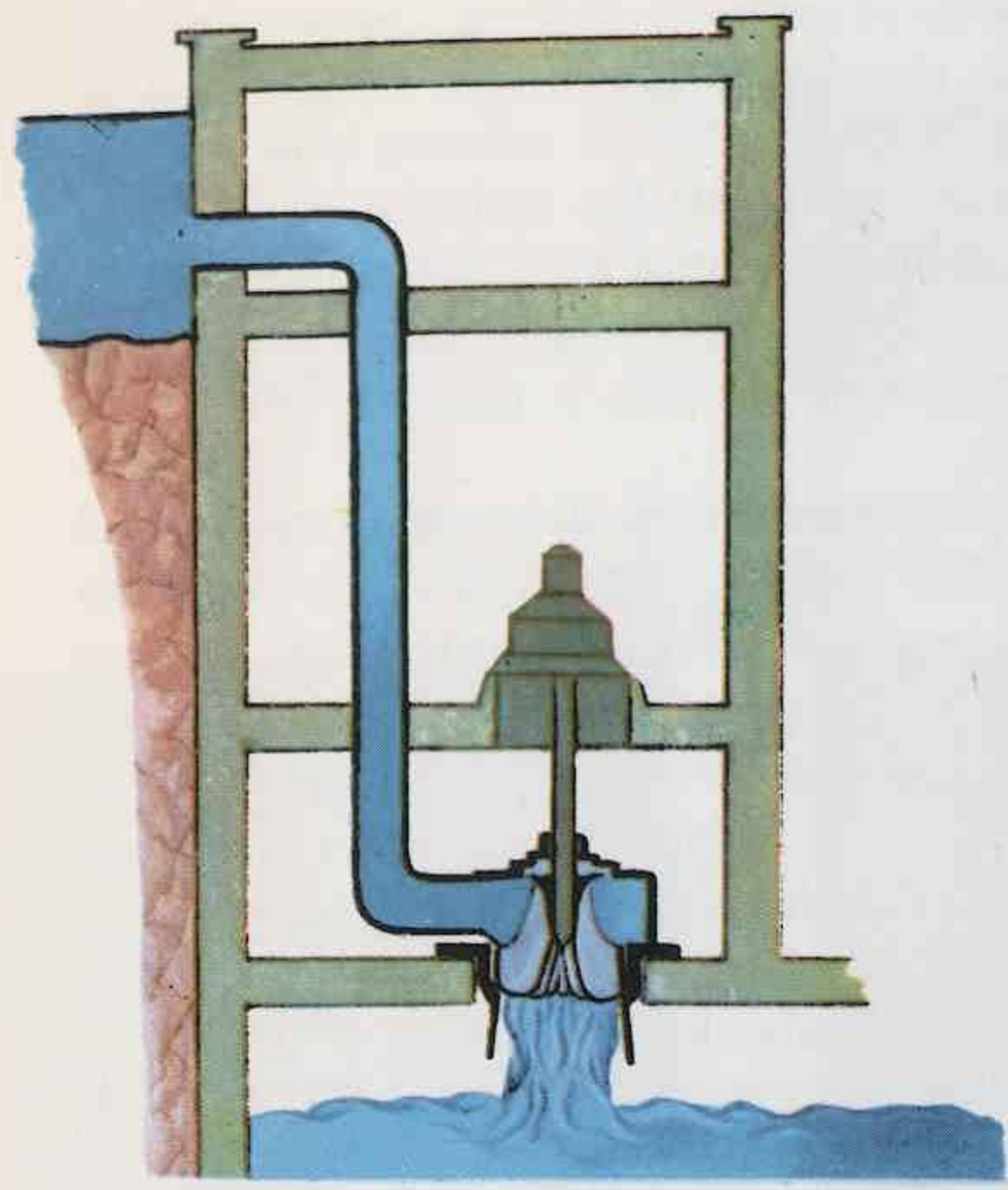
Si lanzamos contra la espalda de un amigo un proyectil de 30 g a una velocidad de 1 m/s, es posible que la ropa le impida percibir el impacto, pero si lo que lanzamos a 1 m/s es un vehículo, el resultado será totalmente distinto. Esto quiere decir que la masa del cuerpo móvil desempeña un papel primordial en los efectos del movimiento. Ahora bien, si el proyectil va a 400 m/s, a pesar de su poca masa podrá matar al individuo. Eso significa que también la velo-

cidad desempeña un importante papel, por lo que definiremos la «cantidad de movimiento» de un cuerpo como un vector de igual dirección y sentido que la velocidad y de módulo igual al producto de la masa por el módulo de la velocidad. Si la fuerza  $F$  actúa durante un tiempo  $\Delta t$ , originando una aceleración  $a$ , la velocidad habrá variado en  $\Delta v = a \Delta t$ , lo que representa una variación de cantidad de movimiento  $m \Delta v = m a \Delta t = F \Delta t$ , en virtud de la ley de Newton. Luego, *el impulso de una fuerza es igual a la variación de cantidad de movimiento que origina*. El puntapié que el futbolista da al balón representa una fuerza aplicada durante un tiempo, y el producto de estas dos cantidades es igual, si el balón estaba parado, al producto de su masa por la velocidad que adquiere.

Si en lugar de un punto de masa  $m$  consideramos un sistema de puntos al cual no se aplican fuerzas desde el exterior, el impulso exterior total será nulo, y no habrá variación de la cantidad de movimiento *total* del sistema. Es decir, *cuando sobre un sistema no actúan fuerzas exteriores, la cantidad de movimiento total del sistema se conserva*. Así, por ejemplo, en el disparo de un arma de fuego no intervienen más que fuerzas interiores al sistema, por lo que la cantidad de movimiento se ha de conservar. Antes del disparo era nula, y después del disparo, como el proyectil tiene una cantidad de movimiento  $mv$  hacia adelante, el arma deberá llevar una cantidad de movimiento  $MV$  hacia atrás de igual valor, o sea que retrocede con una velocidad

$$V = \frac{m}{M} v,$$

donde  $m$  y  $v$  son la masa y la velocidad, respectivamente, del proyectil y  $M$ , la masa del arma. De igual manera se explica el aumento de velocidad de un cohete en vuelo horizontal; la expulsión de un chorro por la cola representa una disminución de cantidad de movimiento, pues el chorro va hacia atrás. Como no intervienen fuerzas exteriores al sistema cohete-chorro, el cohete debe incrementar su velocidad para compensar esta disminución de la cantidad de movimiento del sistema.



El agua situada a nivel elevado puede realizar un trabajo al caer: tiene energía potencial.



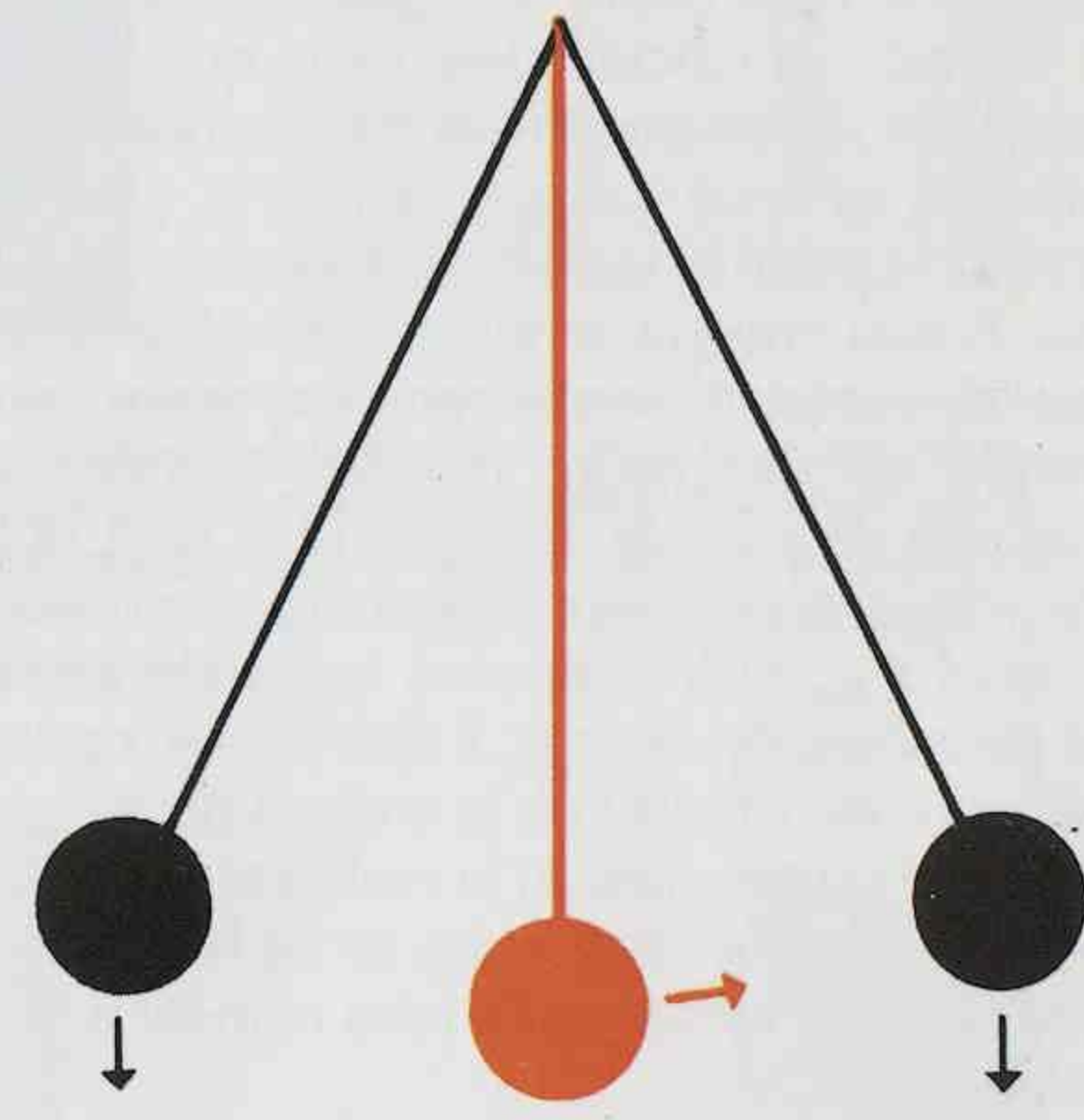
El resorte comprimido puede realizar un trabajo, si se suelta; posee energía potencial.



La energía potencial del resorte se ha transformado totalmente en energía cinética del balón (conservación de la energía).



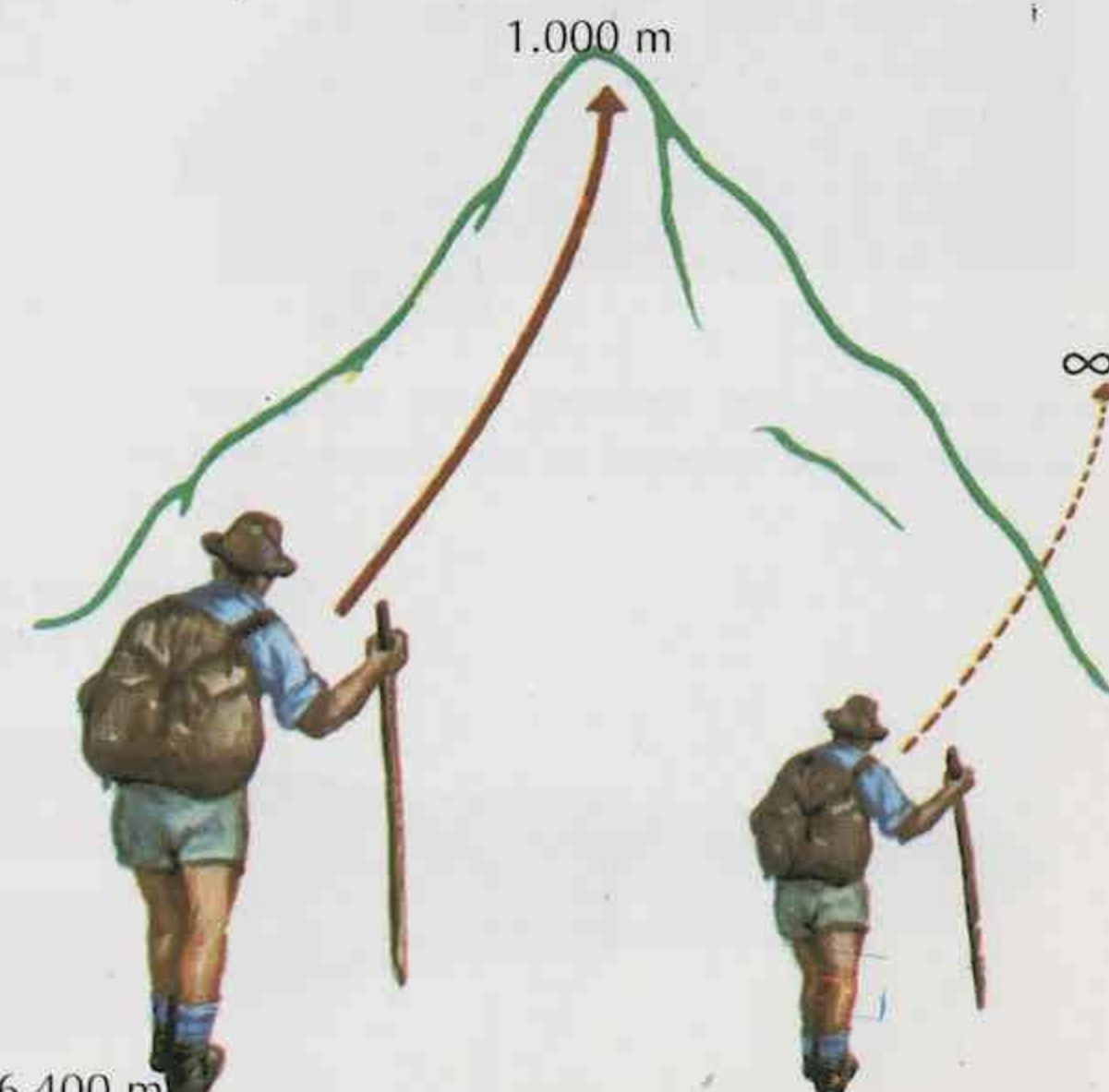
La gasolina puede realizar un trabajo al encenderse: tiene energía potencial (química).



El peso del péndulo realiza, al bajar, un trabajo positivo, y otro igual, negativo, al subir. El trabajo total es, por lo tanto, nulo: el peso es una fuerza conservativa.



La fuerza de rozamiento es siempre opuesta al desplazamiento. Su trabajo es negativo. No es conservativa: es una resistencia pasiva.



Si 6.400 excursionistas ascienden 1.000 m, realizan el trabajo necesario para mandar a uno de ellos al infinito.

ENERGÍA ORBITAL Y DE ESCAPE

Para elevar un cuerpo de 1 kg a 1 km de altura tenemos que realizar un trabajo de 1.000 kilopondmetros, o sea, de  $1 \times 9,8 \times 1.000$  J; si el peso tuviera una masa de  $m$  kilos, el trabajo sería  $m$  veces mayor, y, en general, para elevarlo a una altura de  $h$  metros, el trabajo que hemos de realizar es igual a  $mgh$  joules. Como el peso es una fuerza conservativa, el trabajo que realiza al caer el cuerpo hasta el suelo sería el mismo, por lo cual la masa  $m$  situada a una altura  $h$  tendrá una energía  $mgh$ . Ahora bien, el cálculo anterior considera el peso como fuerza constante, y así podremos hacerlo mientras no nos alejemos demasiado de la superficie terrestre, pues ya hemos visto que el peso disminuye con la altura. Esto quiere decir que cuanto más alejados estemos de la superficie terrestre, menos trabajo habrá que gastar para ascender 1 km más. El cálculo demuestra que, para alejarnos indefinidamente, el trabajo que hay que efectuar es igual a  $mg_0R$ , siendo  $g_0$  el valor de  $g$  en la superficie terrestre y  $R$  el radio de la Tierra. A esta energía se le da el nombre de *energía de escape*, y no es enormemente grande. Yendo de excursión, muchos lectores serán capaces de realizar una ascensión de 1.000 m. En ella,  $g$  permanece prácticamente constante e igual a  $g_0$ . El lector habrá realizado un trabajo de ascensión de  $mg_0$  1.000 joules, que tiene un valor de  $1/6.400$  de la energía de escape. O sea, que si la excursión la realizara un grupo de 6.400 excursionistas, entre todos habrían realizado el trabajo necesario para mandar a uno de ellos al infinito.

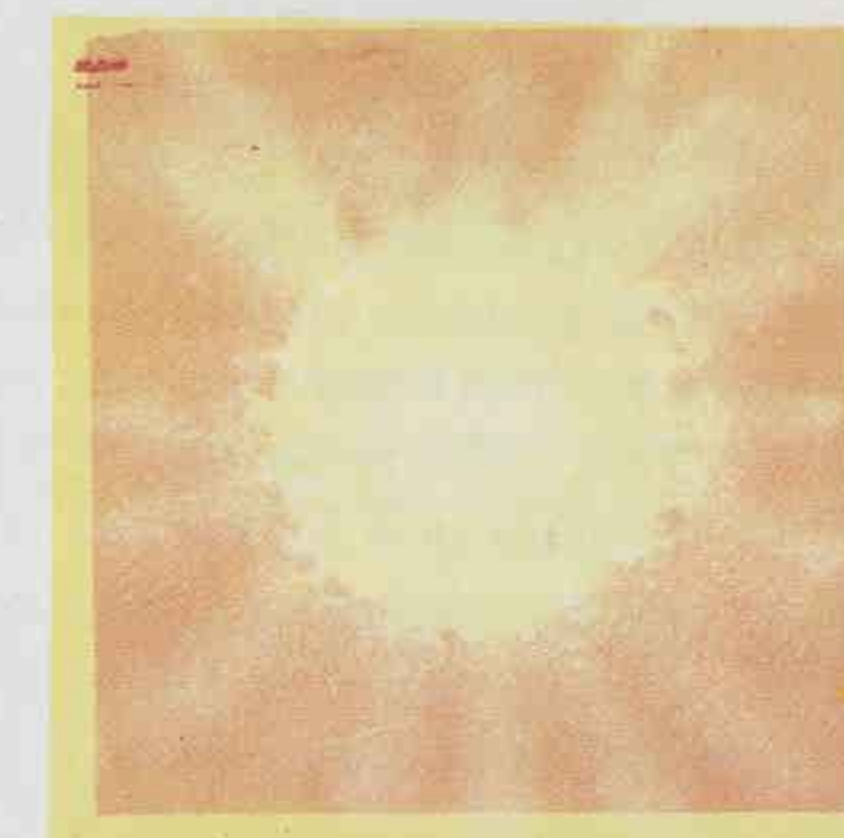
Si a un cuerpo se le da una energía cinética inicial igual a la energía de escape  $1/2 mv^2 = mg_0R$ ,

irá alejándose de la Tierra, con lo que aumentará progresivamente su energía potencial a expensas de su energía cinética, conservándose la energía mecánica. Su energía cinética no se anulará nunca (sólo en el infinito) y el cuerpo podrá alcanzar lugares tan alejados de la Tierra como se quiera. La velocidad correspondiente a la energía cinética de escape recibe el nombre de *velocidad de escape*, y para la Tierra vale 11,2 km/s.

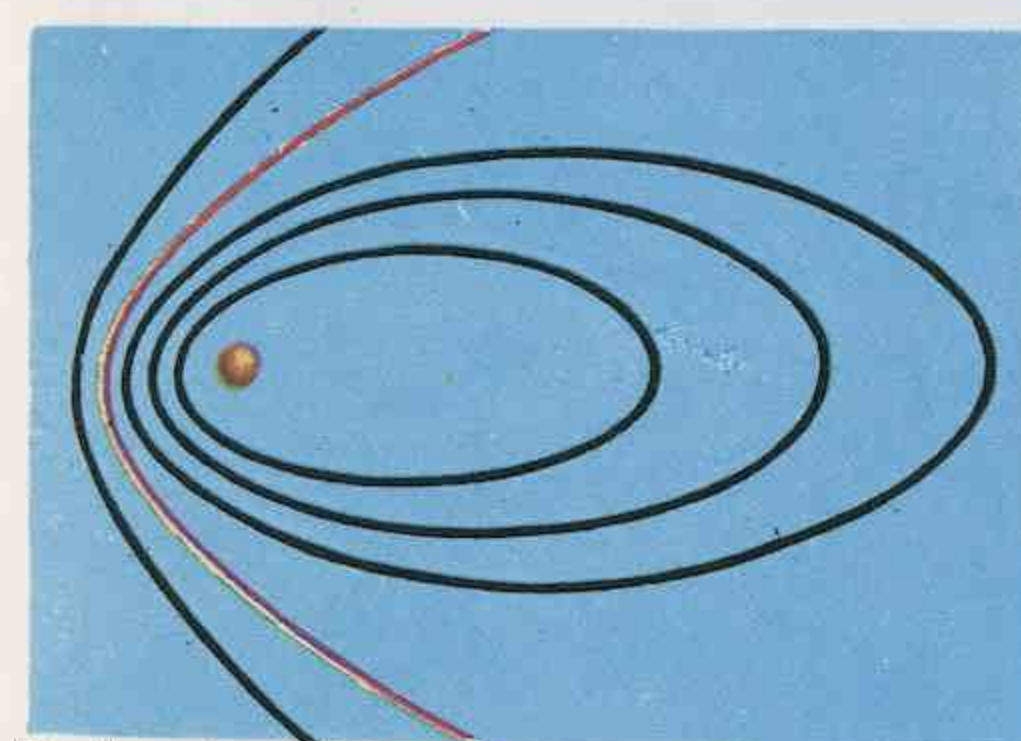
Hemos mencionado en diversas ocasiones el caso de los satélites artificiales que recorren órbitas circulares. Supongamos que, en un momento dado, uno de ellos aumenta su velocidad disparando un cohete. Como la aceleración normal no debe variar en un principio, aumentará el radio tratando de mantener constante la aceleración normal, y el satélite saldrá de su órbita. Como ya no se mueve perpendicularmente a la vertical, la nueva trayectoria no será circular, y vendrá regida por el hecho de que la energía mecánica total ha de ser constante. A la órbita corresponde, pues, una *energía orbital*, y la energía cinética se irá transformando en potencial, y recíprocamente, con lo que cuando el satélite se halla más próximo a la Tierra (energía potencial mínima) su energía cinética es máxima, y recíprocamente. La forma de la órbita es elíptica, según puede demostrarse, y si se aumentara la energía del satélite (disparando nuevos cohetes) recorrería órbitas elípticas de mayor excentricidad. Cuando la energía fuera igual a la de escape, la órbita sería parabólica, y la velocidad en el punto más próximo a la Tierra (perigeo) sería de 11,2 km/s. Si la energía fuera mayor que la de escape, la trayectoria sería una rama de hipérbola.



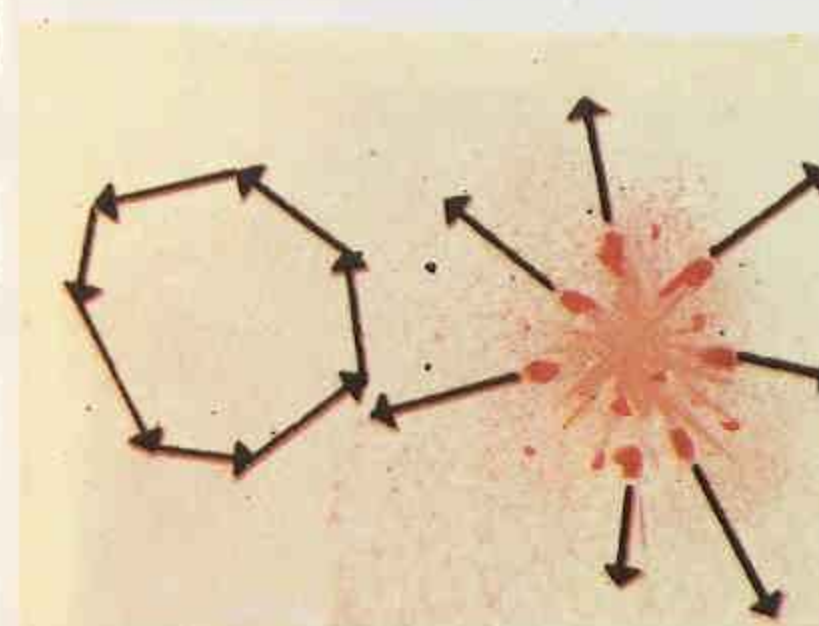
En 640 ascensos de 10 km, un avión de bombardeo habría realizado un trabajo igual a su energía de escape.



Según el valor que nos da la fórmula  $V = \sqrt{2g_0R}$ , la velocidad de escape de la Tierra es de 11,2 km/s. En su atmósfera no hay hidrógeno ni helio porque las moléculas de éstos, muy ligeras, pueden superar la velocidad de escape. La Luna tiene una velocidad de escape de 2,4 km/s, por cuanto la gravedad en su superficie vale  $1/6 g_0$ , y su radio tiene una longitud algo mayor que la cuarta parte del terrestre. No hay atmósfera porque todas las moléculas gaseosas pueden superar esta velocidad tan pequeña. En cambio, el Sol, por su gran tamaño y gravedad, posee una velocidad de escape de 617 km/s. Su atmósfera es rica en hidrógeno y helio porque ni siquiera estas moléculas ligeras pueden superar una velocidad tan grande.



En el perigeo, la energía potencial es mínima y la cinética es máxima. En el apogeo sucede lo contrario.

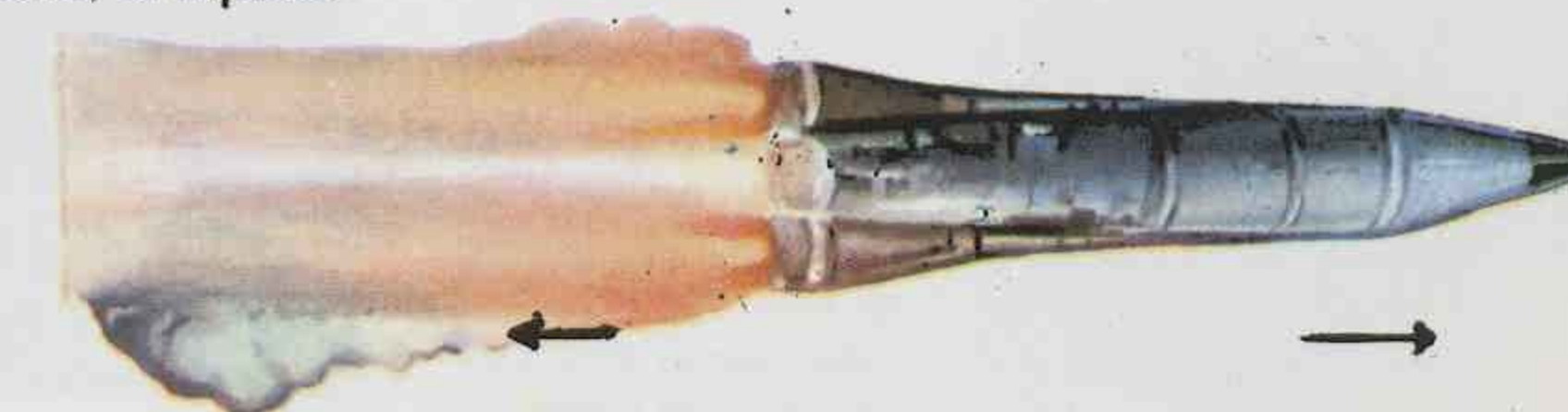


Casos en que no intervienen fuerzas exteriores. En la explosión de una bomba, la cantidad de movimiento es nula, por lo cual ha de serlo también la suma de los vectores cantidad de movimiento de la metralla. En un cohete, la cantidad de movimiento hacia adelante debe aumentar en una cantidad igual a la del chorro hacia atrás.



Un golpe seco requiere que la fuerza sea intensa para que su impulso resulte apreciable.

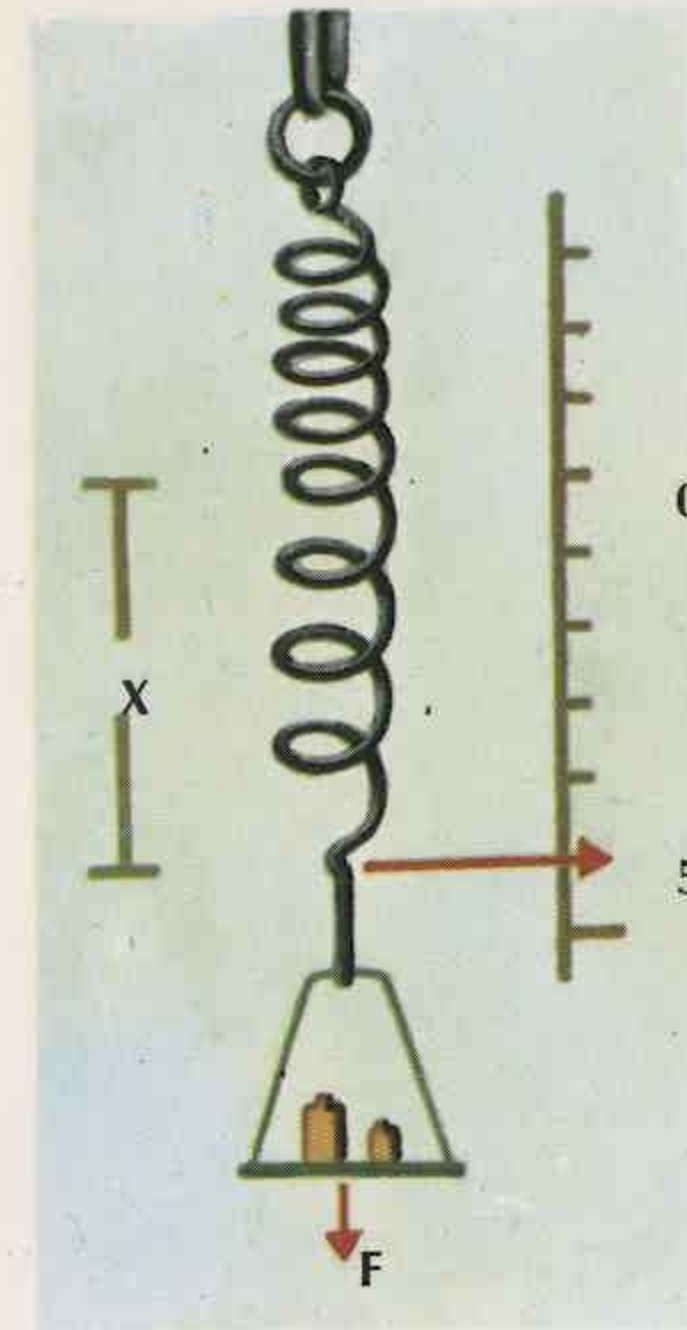
Al ceder el cordaje de la raqueta, se aumenta el tiempo de aplicación de la fuerza a la pelota y, por tanto, el impulso.



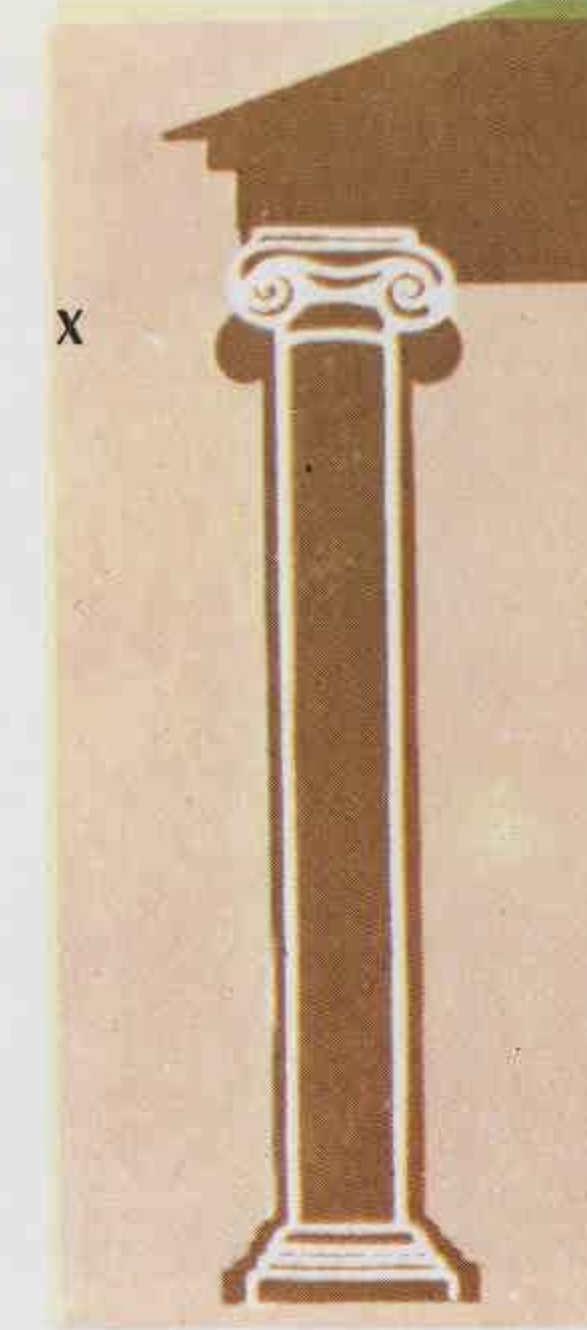
ELASTICIDAD

Para deformar un cuerpo, se le aplica una fuerza de una manera conveniente, y si al suprimir la fuerza deformadora el cuerpo recupera su forma primitiva, diremos que se trata de un cuerpo *elástico*. Esta deformación recibe el nombre de *deformación elástica* y, durante ella, *las fuerzas son proporcionales a las deformaciones* (ley de Hooke). Los cuerpos no son nunca perfectamente elásticos, pues si la deformación supera un cierto valor, llamado *límite de elasticidad*, las fuerzas ya no son proporcionales a las deformaciones, y, si las suprimimos, queda una deformación residual en el cuerpo. Si siguiéramos aumentando la fuerza deformadora hasta alcanzar el *límite de ruptura*, el cuerpo se rompería. Sólo vamos a considerar, en lo que sigue, deformaciones suficientemente pequeñas para que se cumpla la ley de Hooke. La proporcionalidad que ésta expresa exige la definición de dos magnitudes, una para las fuerzas aplicadas y otra para las deformaciones. Esta última será, por lo común, una magnitud geométrica. Si representamos por  $F$  la fuerza deformadora (que puede ser una presión) y por  $x$  la deformación, la ley de Hooke podrá escribirse en la forma  $F = kx$ , donde  $k$  será una constante de proporcionalidad característica del cuerpo. Es interesante indicar que al aplicar una fuerza deformadora, el cuerpo opone otra igual y contraria en virtud del principio de la igualdad de la acción y la reacción, por lo que también puede considerarse que la deformación de un cuerpo engendra una fuerza elástica. Entre deformación y esfuerzo no podemos asegurar a la ligera cuál es la causa y cuál el

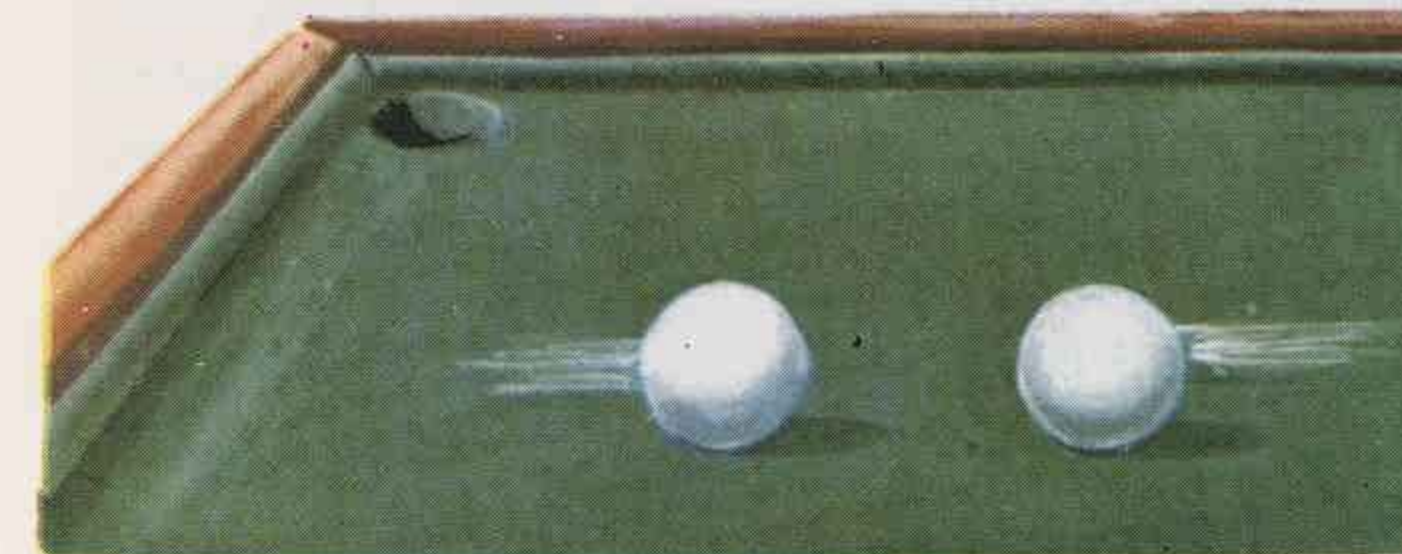
efecto. La fuerza deformadora desplaza su punto de aplicación durante la deformación, por lo que realiza un trabajo que, si el cuerpo se comporta como elástico, queda almacenado en forma de energía potencial de deformación, la cual volverá a convertirse en trabajo al recuperar el cuerpo su forma inicial. Ya vimos un ejemplo de esto al estudiar la conservación de la energía mecánica y tratar del caso de la escopeta de salón. Al pasar un cuerpo de deformación nula a deformación  $x$ , la fuerza pasa de 0 a  $kx$ , por lo que el valor medio de la fuerza será  $kx/2$ . El trabajo realizado por la fuerza lo podremos calcular multiplicando este valor medio por el recorrido  $x$  del punto de aplicación, con lo que el trabajo valdrá  $1/2 kx^2$ . Éste será, por tanto, el valor de la energía potencial correspondiente a una deformación  $x$ . En los topes de una estación, la poca energía cinética que lleva el tren al entrar en contacto con ellos se transforma en energía potencial de deformación de los muelles, y cuando el tren arranca de nuevo hacia atrás, la energía de deformación de los topes vuelve a transformarse en energía cinética que ayuda al tren en su arranque. Al chocar dos bolas de billar, se deforman, transformando su energía cinética inicial en energía de deformación. Ésta aumenta hasta que las bolas quedan quietas, en cuyo caso la deformación es máxima, y luego la energía de deformación disminuye a medida que las bolas van recuperando su forma, transformándose en la energía cinética que éstas llevan al irse alejando sus centros mientras están ambas en contacto. En el instante en que recuperan su forma primitiva se separan, la energía potencial de deformación es nula y la cinética no aumenta más.



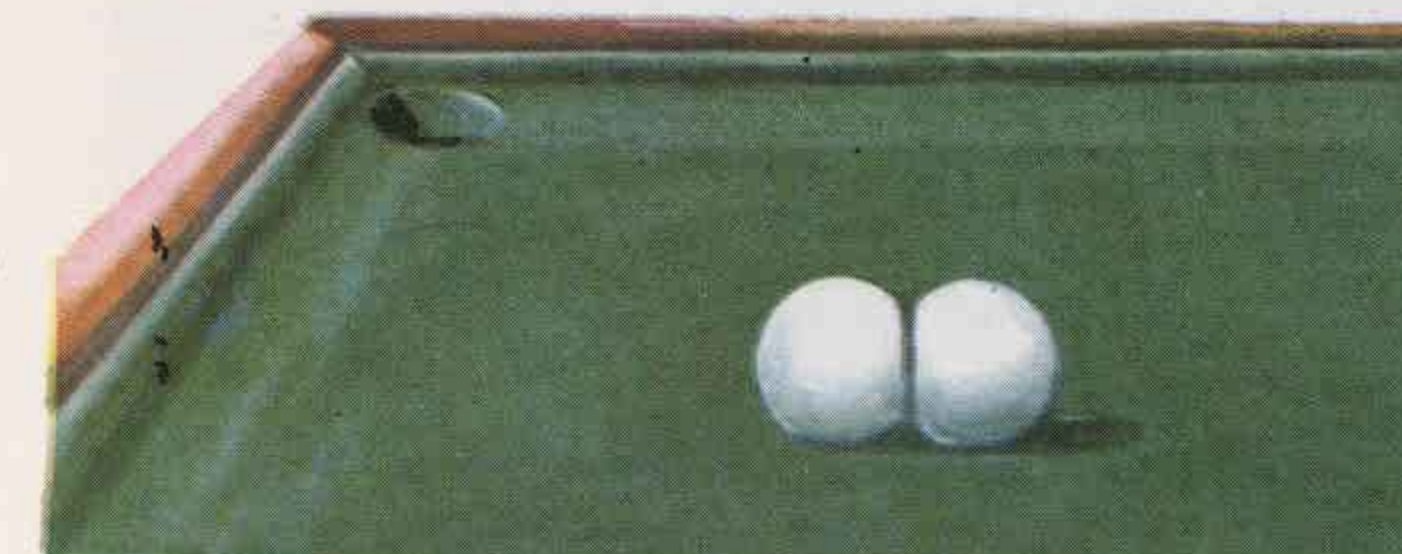
$F = kx$ . El alargamiento equis del resorte mide la deformación.



$F = kx$ . El acortamiento equis que sufre la columna al cargarla, mide la deformación.  $F$  es la parte del peso que soporta.



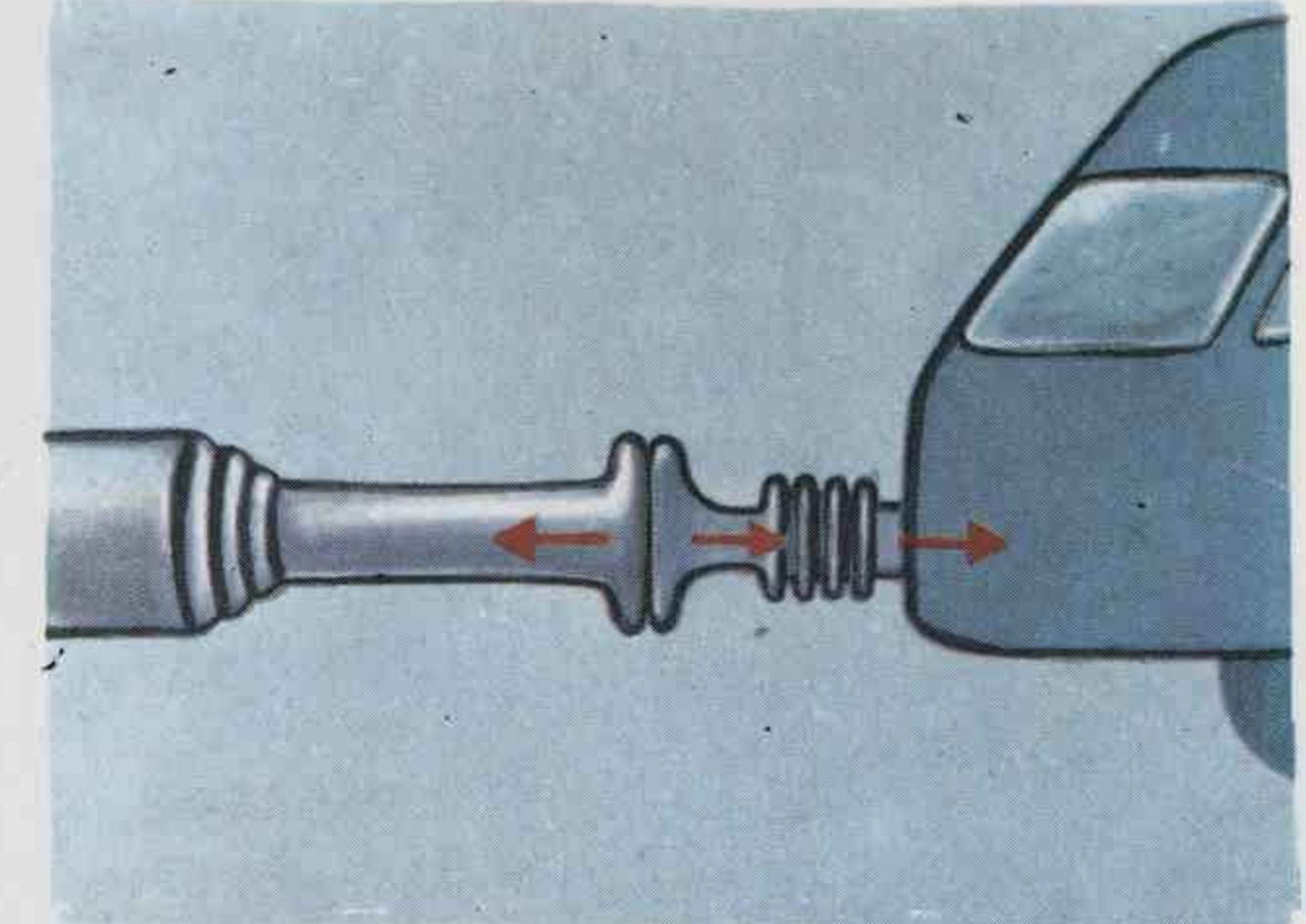
La energía cinética inicial de dos bolas que marchan una al encuentro de la otra



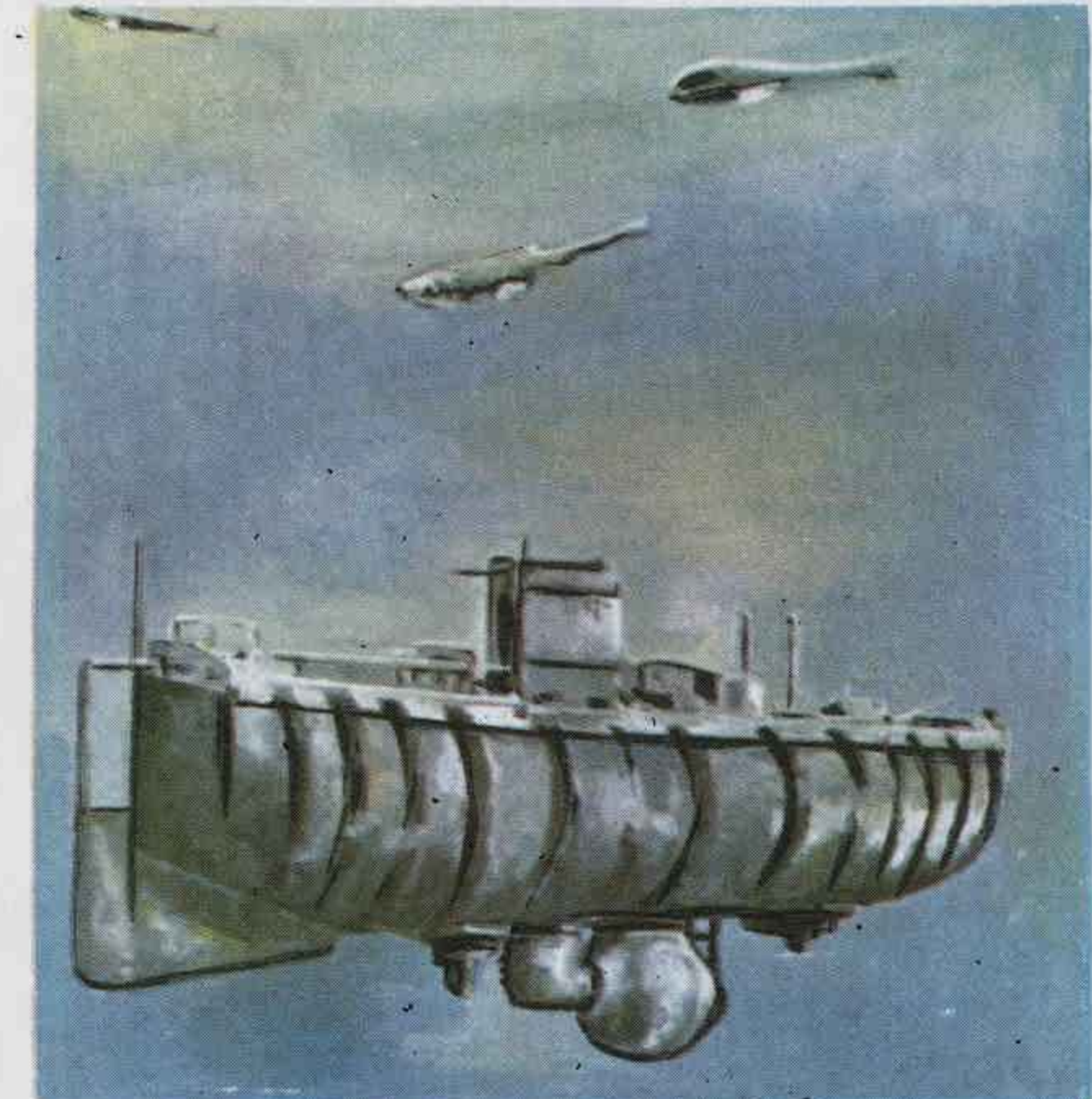
se transforma en la potencial de deformación en el instante en que están en reposo.



Ésta vuelve a transformarse en la energía cinética de alejamiento final. Todo ello ocurre en un tiempo cortísimo.



Al comprimir el muelle del tope, se ejerce sobre el tren una fuerza igual y contraria a la que éste ejerce sobre el muelle, y que es proporcional a la deformación. Cuanto más comprimido esté el muelle, mayor será el freno que ejerza.



El volumen del batiscafo es menor a grandes profundidades que en la superficie a causa de la presión. Ésta se toma como la medida de la fuerza deformadora, y como medida de la deformación se toma la disminución de volumen de cada  $m^3$  de batiscafo en superficie del mar. Ésta es proporcional a la presión.



Al hinchar un neumático aumenta su volumen. Como medida de la fuerza se toma el exceso de presión interior sobre la atmósfera y como medida de la deformación, el aumento de volumen de cada  $cm^3$  al pasar de la presión atmosférica a la final.

VIBRACIONES Y ONDAS

Imaginemos una varilla de acero clavada por un extremo en el suelo y separemos ligeramente el otro extremo de su posición de equilibrio. Si lo soltamos, la varilla vibrará. Veamos en detalle qué ocurre. Al separar el extremo de su posición de equilibrio habremos deformado la varilla, con lo cual le comunicamos una energía potencial de deformación. Al soltarlo, las fuerzas elásticas desarrolladas por la deformación tienden a llevar los distintos puntos de la varilla a su posición de equilibrio, y la energía potencial de deformación se va transformando en energía cinética de los puntos de la varilla (primera fase) hasta que, al hallarse en su posición de equilibrio, la energía potencial de deformación es nula, por lo que la energía cinética deberá ser máxima e igual a la energía de deformación comunicada inicialmente. La varilla, pues, no queda en su posición de equilibrio, sino que pasa al otro lado, deformándose y transformando la energía cinética en energía potencial de deformación, de manera que cada posición tiene la correspondiente (segunda fase). Cuando toda la energía cinética se haya transformado en potencial tendremos una posición de reposo instantáneo (velocidad nula) a la que corresponde una energía potencial de deformación igual a la inicial; luego, esta posición de reposo deberá ser simétrica de la inicial respecto a la posición de equilibrio. Si la separación inicial de un punto cualquiera de la varilla era  $a$ , su energía potencial de deformación será  $\frac{1}{2}ka^2$ , y, en la posición al final de la segunda fase, la separación será  $-a$ , y a ella corresponde la misma energía potencial. Se repite ahora todo lo anterior, con la única diferencia de que el movimiento tiene lugar en dirección opuesta, y al final de la cuarta fase el sistema se halla en las mismas condiciones que al principio. Cada punto de la varilla ha estado sometido a una fuerza dirigida hacia la posición de equilibrio de dicho punto, llamada *centro de vibración*, y que en cada instante es proporcional a la separación entre el centro de vibración y el punto, separación llamada *elongación*. El valor máximo de la elongación recibe el nombre de *amplitud* de la vibración; es la distancia entre la posición del punto al final de la segunda o cuarta fase y el centro de vibración. El tiempo que emplea el punto en dar una vibración completa (entre el principio de la pri-

mera fase y el final de la cuarta, por ejemplo) es el llamado *período* del movimiento, al que se da el nombre de *armónico simple* (m.a.s.). El número de vibraciones realizadas en unidad de tiempo se llama *frecuencia*, y será el número recíproco del que mide el período. Si se mide el período en segundos, la frecuencia viene dada en *hertz* (Hz), unidad que antes se llamaba ciclo por segundo. Puede demostrarse que el período del movimiento armónico simple de un punto de masa  $m$  sometido a una fuerza  $F = kx$  es

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

y que la relación entre la elongación  $x$  y el tiempo  $t$  viene dada por  $x = A \cos(\omega t + \phi)$ , donde  $A$  es la amplitud,

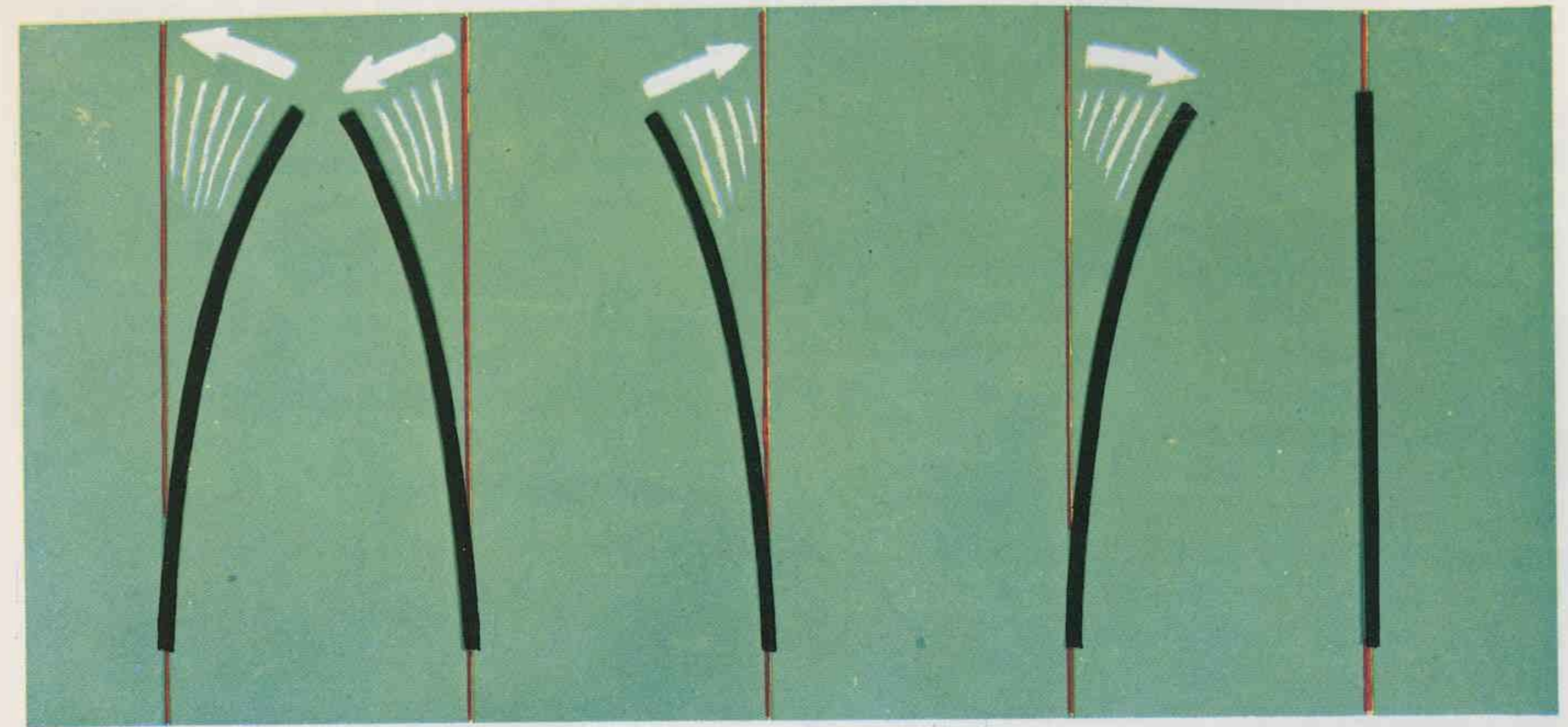
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

es la llamada pulsación del m.a.s. y  $\phi$  la fase inicial, que, en el ejemplo anterior, es nula.

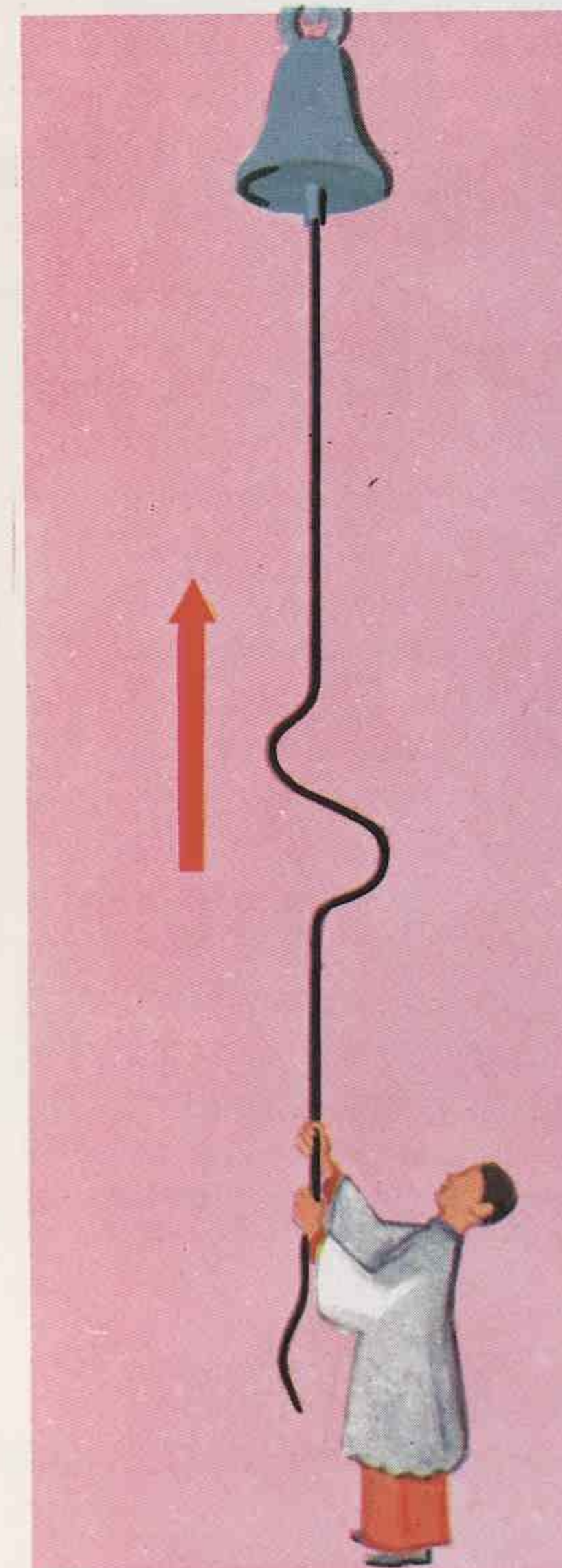
MOVIMIENTO ONDULATORIO

Imaginemos una cuerda que pende de un campanario y está en reposo. Si la sujetamos por el extremo suelto y le damos un desplazamiento transversal veremos cómo se propaga un pulso en toda su longitud. Lo que se propaga no es la materia de la cuerda, que permanece siempre en las proximidades de la posición de equilibrio inicial, sino el movimiento transversal que hemos originado o, mejor aún, la energía que hemos comunicado a la cuerda en el desplazamiento mencionado. En este ejemplo, la energía se propaga en una dirección perpendicular a la de vibración de los puntos, por lo cual se dice que se propaga por *ondas transversales*. En cambio, si cerramos un tubo con un émbolo y aplicamos a éste un movimiento brusco hacia el interior, comprimirá la capa de aire inmediata, haciendo que sus partículas sigan la misma dirección. Dicha capa alcanza una presión mayor que la inmediata, por lo que, a su vez, la comprime, trasladando sus partículas en la misma dirección; esta capa hace lo propio con la siguiente, y así sucesivamente. La onda de presión resultante se propaga en la misma dirección que las partículas, o sea que la energía comunicada a través del émbolo se propaga por *ondas longitudinales*.

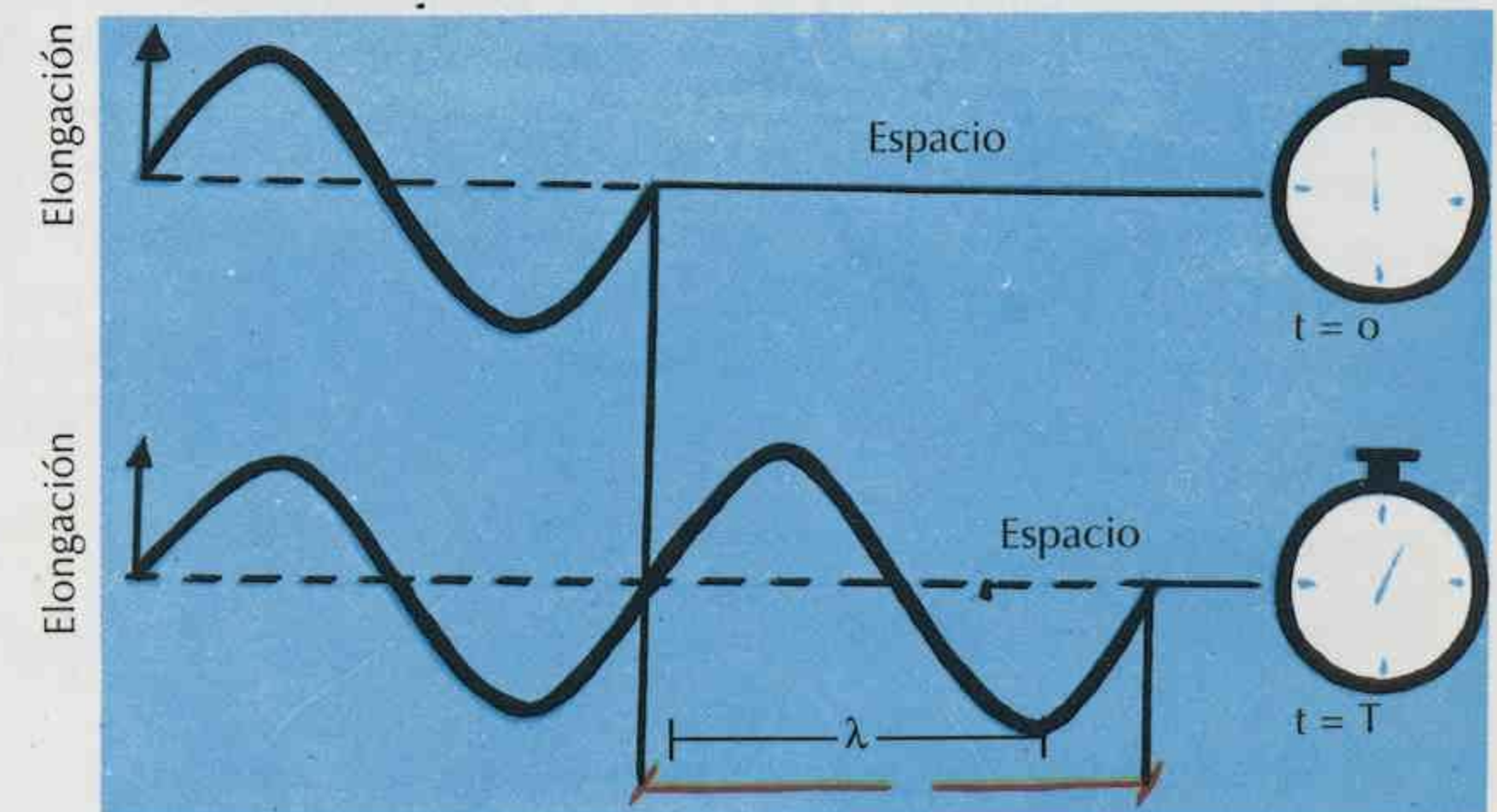
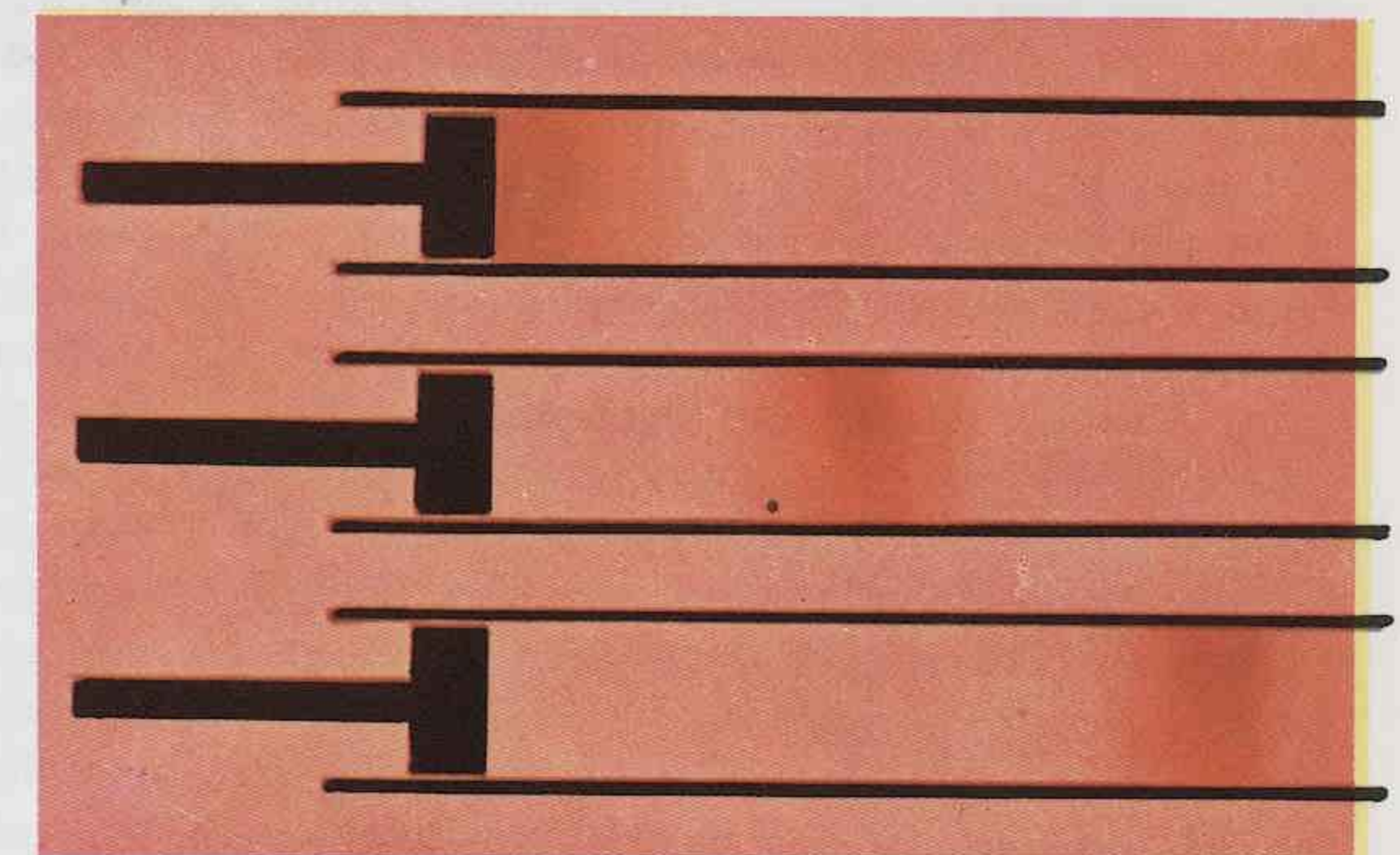
(Continúa en la TARJETA B/4)



1.ª fase 2.ª fase 3.ª fase 4.ª fase Varilla en equilibrio



El desplazamiento horizontal de la cuerda se propaga a lo largo de ella (ondas transversales).



T es el período, tiempo empleado en realizar una vibración completa y también el que emplea la perturbación en avanzar una longitud de onda.

ACÚSTICA

ONDAS SONORAS

El primer ejemplo que vamos a ver de ondas longitudinales lo constituyen las ondas sonoras. Imaginemos vibrando el cono de un altavoz. En un instante comprimirá la capa de aire inmediata a él, la cual, por este motivo, «apretará» la capa de aire inmediata; ésta, la siguiente, y así de manera sucesiva. Pero, en seguida, la membrana del cono invertirá el sentido de su movimiento a causa de la vibración, produciendo un enrarecimiento en la capa de aire inmediata, que efectuará una succión sobre su vecina, ésta sobre la siguiente, etc. Como podemos suponer que esta vibración del cono se repite periódicamente  $f$  veces por segundo, los distintos puntos del aire ambiente se hallarán sometidos periódicamente a  $f$  compresiones y expansiones por segundo. Las partículas de aire oscilarán en torno a sus posiciones de equilibrio, siendo la dirección de vibración la misma que la propagación de la perturbación, por lo que ésta se transmite por ondas longitudinales. Al llegar estas ondas al tímpano, producirán en él  $f$  compresiones y depresiones por segundo, las cuales lo harán vibrar. Esta vibración se transmite al interior del oído y, si  $f$  tiene un valor comprendido entre 16 Hz y 16.000 Hz, podrá percibirse como sonido. Estos valores límites de frecuencia varían mucho de unos individuos a otros y sólo deben considerarse como indicadores del orden de magnitud de las frecuencias audibles límite. Las frecuencias bajas corresponden a sonidos graves, y las altas a agudos.

Vemos, pues, que el sonido se propaga por ondas longitudinales que representan compresiones y expansiones del aire existente en su camino. Ahora bien, se comprende perfectamente que el instrumento productor del sonido puede ser una cuerda tensa (violín, guitarra) por la cual se propagan ondas *transversales*, pero la vibración de la cuerda origina compresiones y expansiones en el aire que la rodea, y éstas se propagan por ondas longitudinales. También una placa (platillos) o una varilla vibrantes pueden producir sonido de igual manera, y es de señalar que en este último

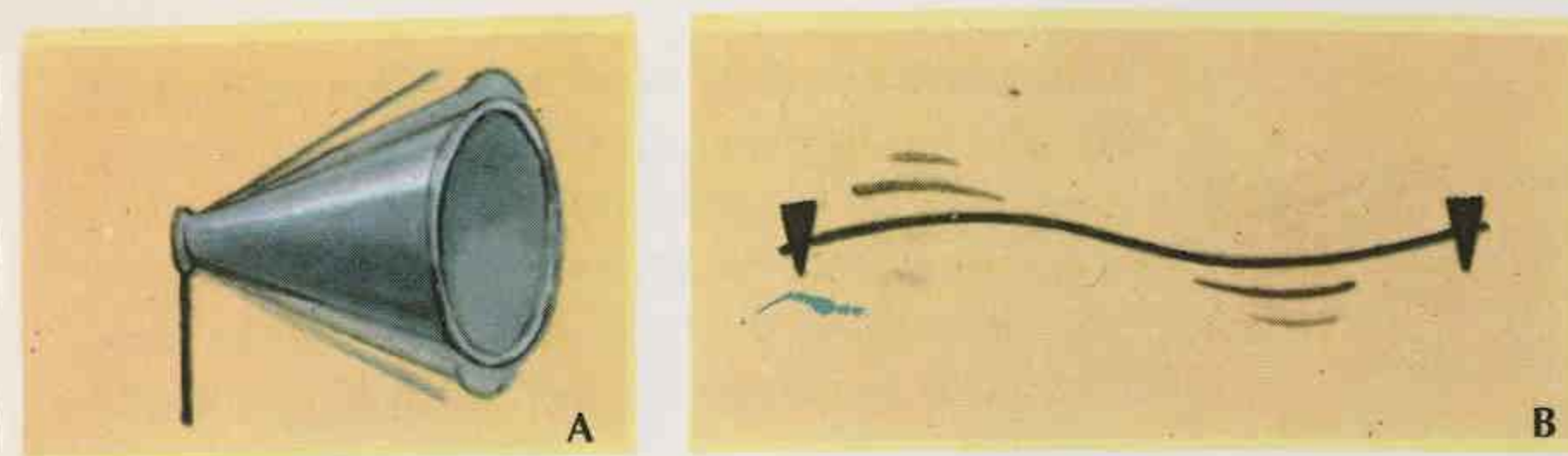
caso, dando a la varilla forma adecuada, se construye un diapasón, instrumento en el que la vibración de todos sus puntos es armónica simple. Las vibraciones de los puntos del espacio también lo son, dando lugar a lo que se llama un *sonido puro*. Los demás sistemas productores de sonido dan, en general, sonidos compuestos que pueden considerarse como superposición de un sonido puro con otros de frecuencias múltiplos de la de aquél. A estos sonidos de frecuencias múltiplos de la del llamado *armónico fundamental* se les da el nombre de *armónicos superiores*.

CUALIDADES DEL SONIDO

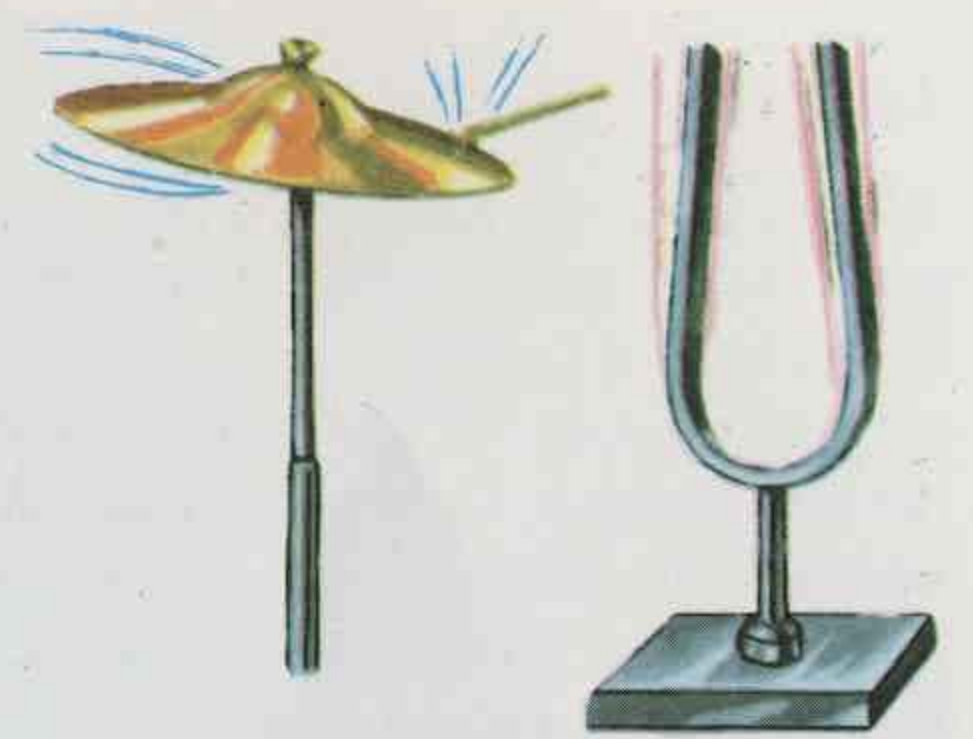
El sonido tiene tres cualidades: *intensidad*, *tono* y *timbre*. La intensidad es la cualidad por la que percibimos un sonido «fuerte» o «débil». El sonido emitido por un radioreceptor puede tener demasiada intensidad y sernos molesto, por lo que reducimos el volumen, lo cual significa que disminuimos la intensidad del sonido emitido. Un sonido será muy intenso cuando sea grande la energía de vibración de las partículas del medio por el que se propaga, y puede demostrarse que dicha energía es proporcional al cuadrado de la amplitud de vibración. Por tanto, la intensidad de un sonido dependerá de la amplitud.

El tono de un sonido es la cualidad que nos lo hace percibir como agudo o como grave, y ya se indicó que depende de la frecuencia. Digamos que esta frecuencia será la del armónico fundamental. Dos notas musicales distintas se diferencian en el tono.

El timbre de un sonido es la cualidad que nos permite distinguir una misma nota emitida por desiguales instrumenteos. Un violín y una trompeta pueden emitir una misma nota (un mismo tono), y esto significa que emiten sonidos que tienen el mismo armónico fundamental; pero los armónicos superiores es posible que ofrezcan intensidades *relativas* diferentes, es decir, el segundo armónico poco intenso en un instrumento y mucho en el otro, y puede ocurrir lo contrario con los terceros armónicos, etc., por lo que el timbre de un instrumento depende de la importancia de los armónicos superiores.



La vibración de una membrana (fig. A) se transmite al espacio, en ondas de compresión y expansión. Por la cuerda tensa (fig. B) se propagan ondas transversales; éstas originan compresiones y expansiones en el aire, que se propagan en ondas longitudinales.



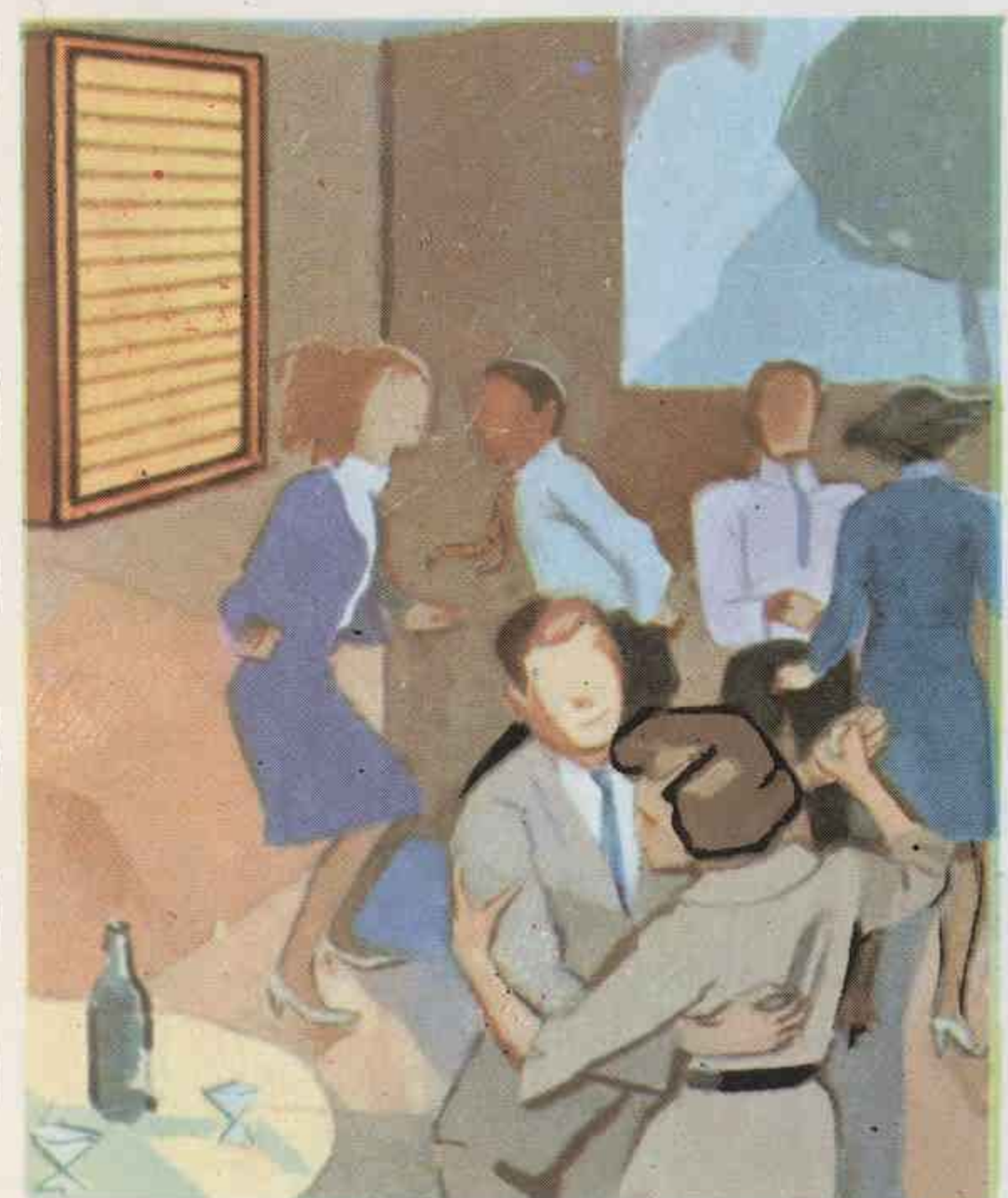
La vibración de una placa metálica origina un sonido. La de un diapasón da armónicos simples.



Frotando las cuerdas del violín con un arco, se las hace vibrar para emitir un sonido compuesto.



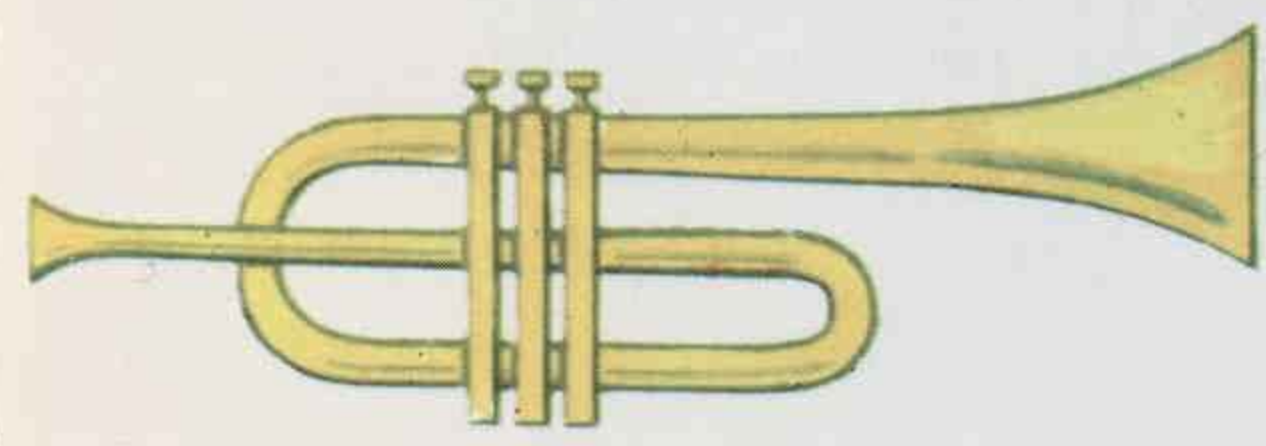
Un sonido agudo es debido a una frecuencia alta.



El cono de un altavoz de una verbena vibra con mayor amplitud que el de un transistor, por ser mayor la intensidad del sonido emitido por el primero.



Un sonido grave se debe a una frecuencia baja.



Aunque la trompeta y la guitarra toquen la misma nota musical, el timbre de los sonidos es diferente, por no tener la misma importancia cada armónico superior en uno y otro instrumento.



# Termología

## TEMPERATURA Y CALOR

Al estudiar la Mecánica nos familiarizamos con la magnitud física llamada fuerza, cuyo concepto se presentó a través del de esfuerzo muscular, que es una sensación fisiológica. Ahora, de una manera análoga, vamos a exponer otra magnitud física, la *temperatura*, cualidad que poseen todos los cuerpos y de la cual nos damos cuenta a través de uno de nuestros sentidos corporales. Un cuerpo que tenga una temperatura elevada lo notamos «caliente», mientras que otro a temperatura baja lo notamos «frío». Tocando sucesivamente dos objetos, podemos decir cuál tiene temperatura más elevada, y si son varios, es dable ordenarlos por temperaturas, aunque no nos será posible medirlas, al igual que tampoco lo haremos con una fuerza por el esfuerzo muscular que hay que ejercer para contrarrestarla. En uno y otro caso, debemos recurrir a efectos originados por la magnitud física: en el caso de la fuerza, al alargamiento (o acortamiento) que origina sobre un resorte (dinamómetro), y en el de la temperatura, a la dilatación que provoca sobre diversas sustancias.

## ESCALA TERMOMÉTRICA

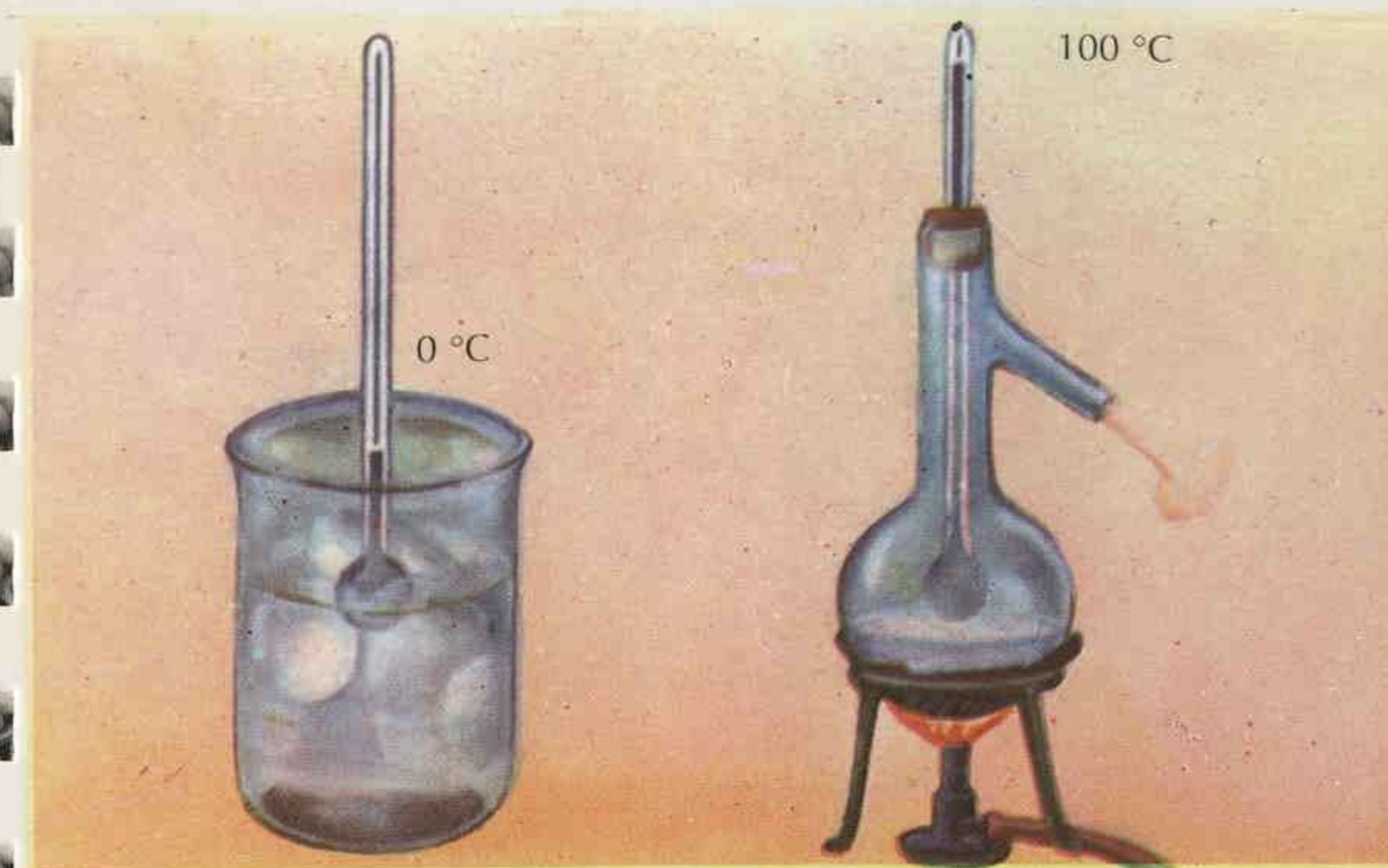
Todos saben que, al calentar un cuerpo, éste se dilata, y que cuando se enfría, se contrae. Esta propiedad puede aprovecharse para definir una escala de temperaturas, y el instrumento en que se la utilice para medir la temperatura recibe el nombre de *termómetro*. Consideremos un tubo estrecho de vidrio, cerrado en un extremo y que termine por el otro en un depósito que contenga un líquido (agua, alcohol, petróleo, mercurio, etc.). Introduzcamos dicho depósito en un recipiente con agua y hielo en equilibrio, es decir, que posea una mezcla de agua y hielo desde un tiempo relativamente largo. El líquido contenido en el depósito y parte del tubo forma, dentro de éste, una columna llamada *columna termométrica*, que llega hasta un lugar que marcaremos con un cero. Si introducimos a continuación el depósito en otro recipiente con agua hirviendo y que esté situado al nivel del mar, la columna termométrica se dilatará hasta llegar a un punto que señalaremos con un 100. La parte

de tubo comprendida entre estos dos puntos, 0 y 100, la dividiremos en cien partes iguales, a las que se da el nombre de *grados centígrados*. Cuando la columna termométrica se alargue en una de estas divisiones diremos que la temperatura del depósito ha aumentado un grado centígrado (1 °C).

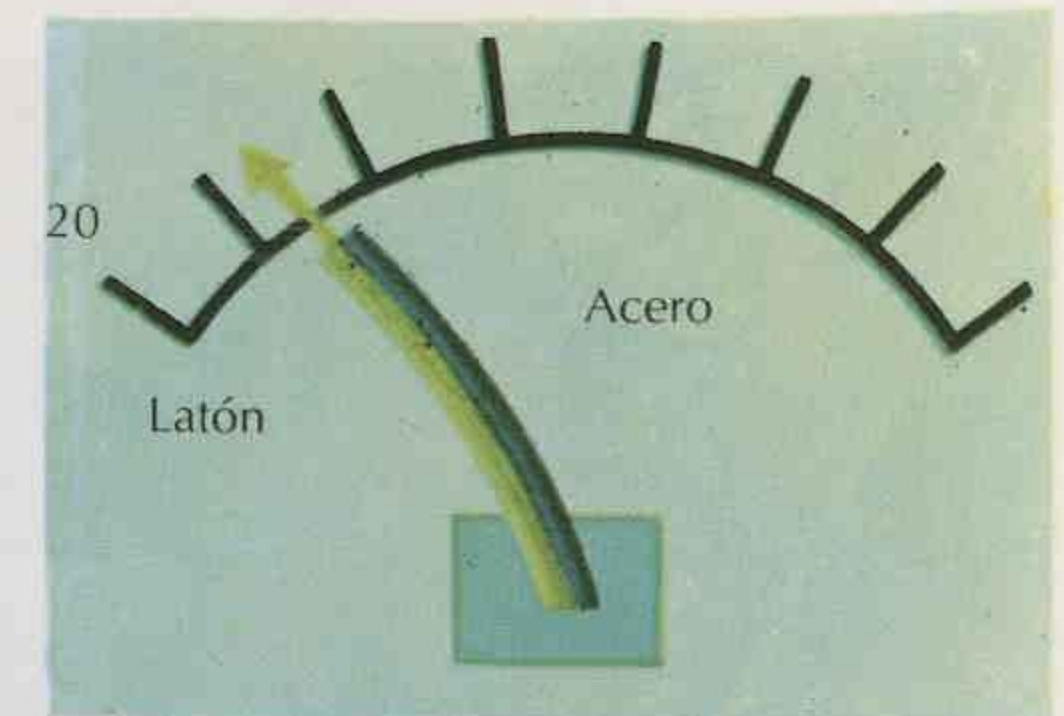
## CALOR

Al poner en presencia dos cuerpos de distinta temperatura, el que la posee más elevada cede al que la tiene más baja una energía a la cual se da el nombre de energía calorífica o, simplemente, *calor*. Durante muchos años se creyó que este calor era un fluido imponderable que contenían los cuerpos y que pasaba de los más calientes a los más fríos hasta que igualaban sus temperaturas. Los experimentos del conde de Rumford, de Davy y, finalmente, de Joule, echaron por tierra tal hipótesis, llegando este último a encontrar la equivalencia entre la unidad de calor (caloría) y la de energía. Así, pues, el calor no es sino una forma de energía, y, como tal, puede pasar fácilmente de unas formas a otras sin destruirse ni crearse (principio de la conservación de la energía). Con ello queremos hacer resaltar el hecho de que cuando un cuerpo absorbe calor no lo acumula en forma de tal, sino que lo transforma en otra clase de energía, que puede ser energía cinética de sus partículas, energía eléctrica de corrientes que en él se originen, trabajo que realice al dilatarse, etc. Por consiguiente, no se debe decir nunca que un cuerpo «contiene calor».

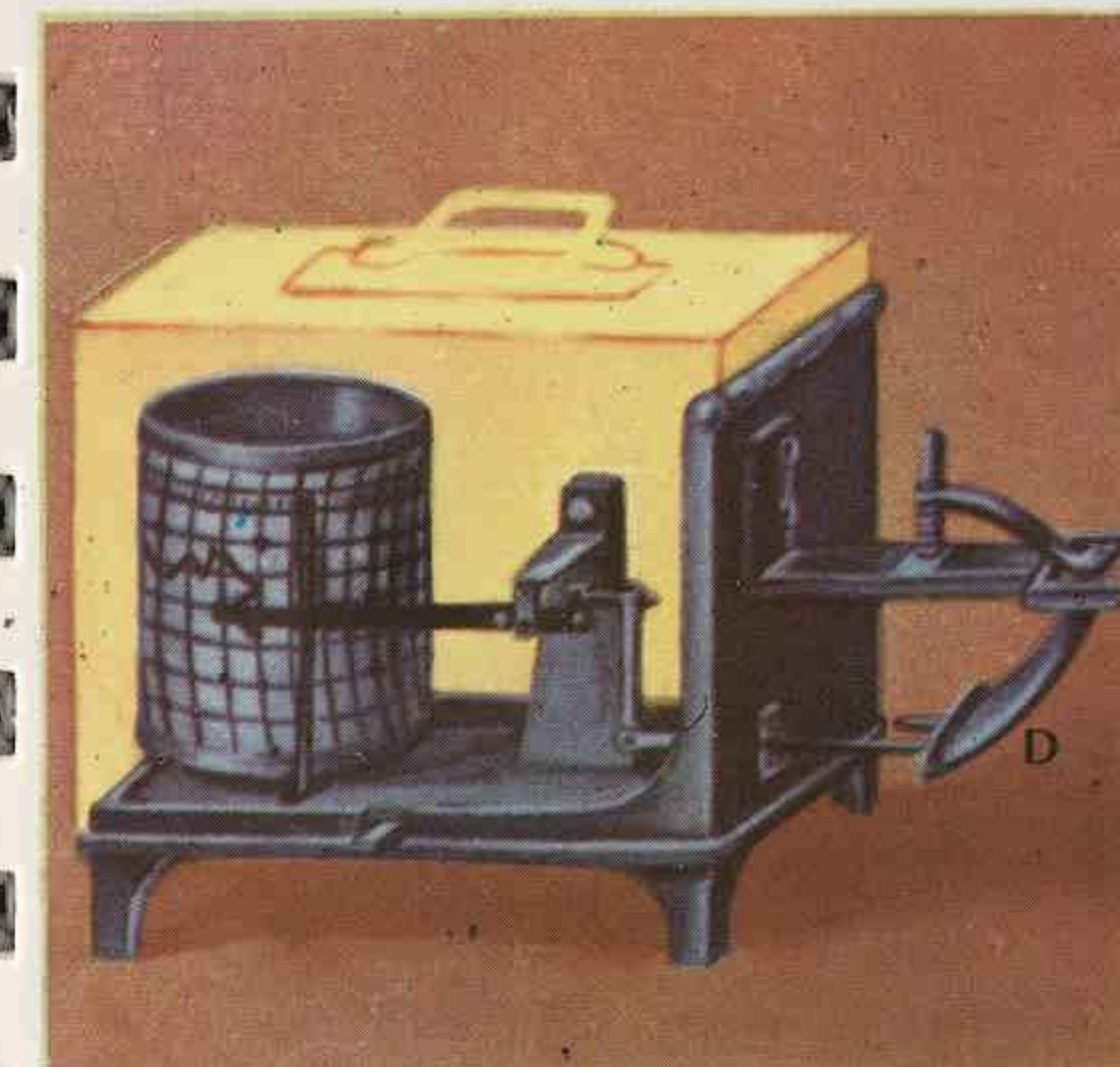
Esto sentado, indiquemos que, al ceder calor un cuerpo a otro sin que ninguno de ellos cambie de estado de agregación (sólido, líquido o gaseoso) y sin realizar trabajo alguno, el cuerpo que cede calor disminuye su temperatura, mientras el otro la eleva. Éste convierte la energía calorífica en energía cinética de sus partículas, mientras el primero, al ceder calor, disminuye esta energía de las partículas que lo constituyen. Como unidad de energía calorífica suele tomarse la *caloría*, que es la cantidad de calor que hay que suministrar a un gramo de agua para elevar su temperatura un grado centígrado. La energía de una caloría equivale a 4,18 joules.



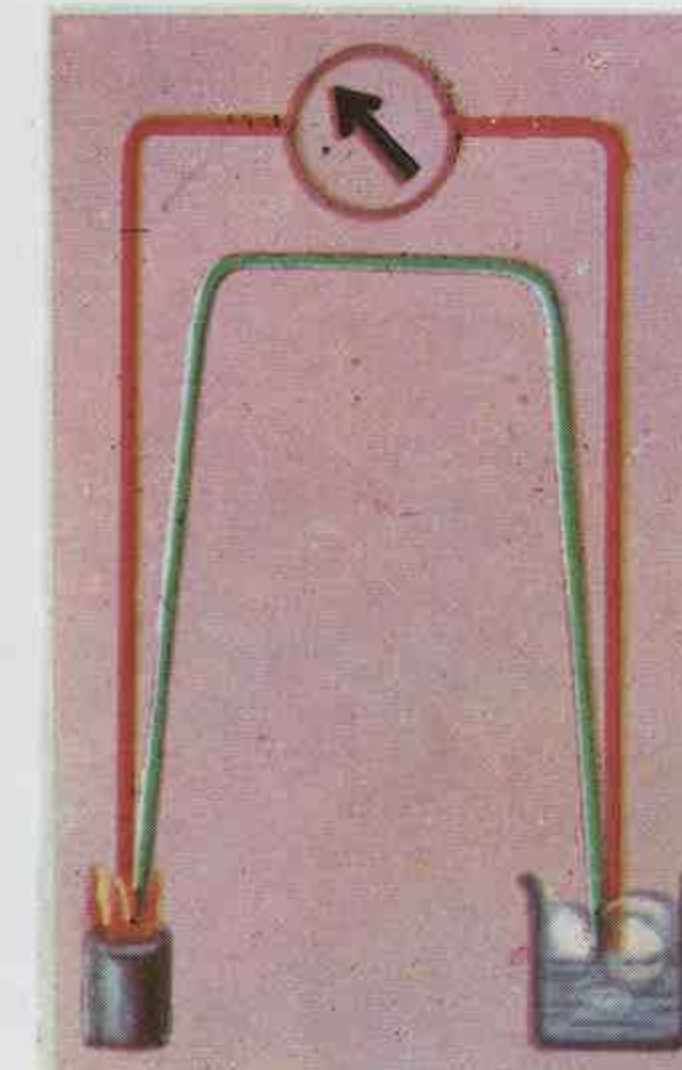
Puntos fijos de un termómetro. La temperatura del hielo fundente se toma como 0 y la del vapor de agua en ebullición a la presión atmosférica normal, como 100, en la escala centígrada.



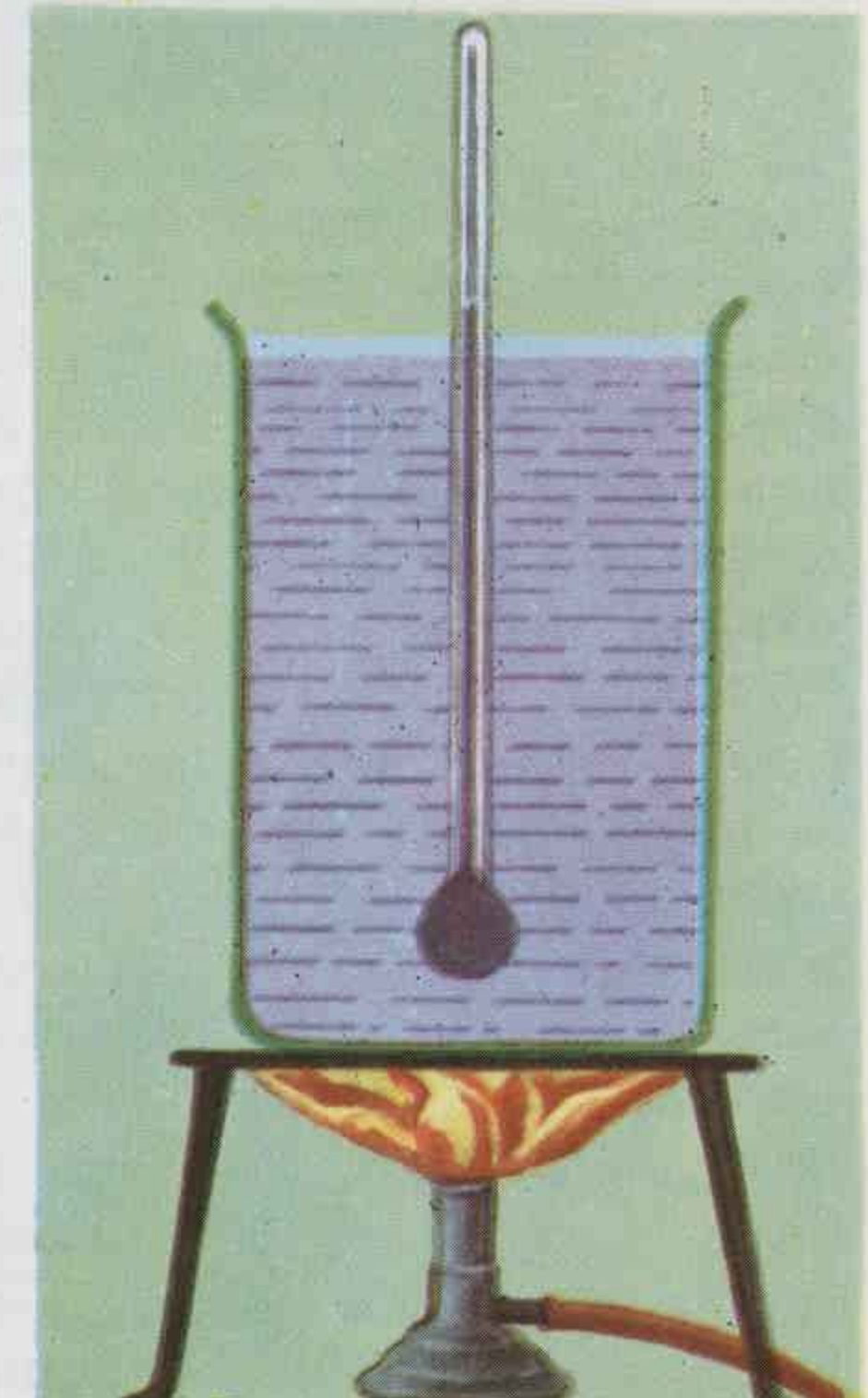
La diferente dilatación del acero y del latón de la tira bimetalica produce flexión, gracias a la cual puede graduarse una escala de temperaturas.



Al aumentar la temperatura, se dilata el petróleo contenido en la caja metálica D, arqueada, cerrada y de sección oval, por lo que ésta disminuye de curvatura.



Par termoelectrico. Cuando un circuito formado por dos metales diferentes tiene las soldaduras a temperatura distinta, conduce una corriente eléctrica.



Para elevar 1 °C la temperatura de 1 kg de agua, hay que suministrarle 100 calorías.



La presión ejercida por el esquí sobre la nieve, la funde aunque esté a menos de 0 °C, formando una capa de agua que ayuda al deslizamiento.



El rehielo. El agua fundida por la presión del alambre vuelve a congelarse, mientras aquél penetra paulatinamente.

CAMBIOS DE ESTADO

FUSIÓN Y VAPORIZACIÓN

Los cuerpos sólidos están compuestos de partículas distribuidas tridimensionalmente, como los ladrillos que se apilan ante un edificio en construcción. Dichas partículas, no obstante, conservan una cierta separación entre sí y sus vecinas y pueden vibrar en torno a determinadas posiciones de equilibrio. Al suministrar calor al cuerpo, crece la energía cinética de vibración de dichas partículas, las cuales aumentarán la longitud de su recorrido hasta que llega un momento en que su vibración es tan amplia y se alejan tanto de sus posiciones de equilibrio que se desmorona la distribución tridimensional, moviéndose libremente las partículas en todas direcciones y con velocidades cualesquiera: el cuerpo se halla entonces en estado líquido. El desmoronamiento de la distribución tridimensional ocurre a una temperatura característica de cada cuerpo, llamada *temperatura de fusión*, y el paso del estado sólido al líquido se llama  *fusión*. Durante la fusión, la temperatura permanece constante a pesar de que se siga suministrando calor. Éste se invierte en trabajo contra las fuerzas de cohesión que mantenían unidas las partículas, y se observa que para fundir una unidad de masa de un cuerpo hay que suministrar una cantidad determinada de calor, llamada  *calor de fusión*. Así, pues, para fundir una unidad de masa de un cuerpo son necesarias dos cosas: 1.<sup>a</sup>, que el cuerpo se halle a la temperatura de fusión; 2.<sup>a</sup>, que se le suministre el calor de fusión. Para el agua, por ejemplo, la temperatura de fusión es de 0 °C. Si calentamos hielo que se halle a una temperatura bajo cero hasta que alcance los 0 °C, pero no seguimos administrándole calor, no se fundirá. Ahora bien, si continuamos proporcionándole calor, la temperatura se mantendrá a 0 °C, y cada 80 calorías que le facilitemos se invertirán en fundir un gramo de hielo. El calor de fusión del hielo es 80 calorías/gramo. Recíprocamente, si enfriamos agua extrayendo calorías de ella, su temperatura irá disminuyendo hasta 0 °C, y, a partir de entonces, la temperatura se mantendrá en esta graduación, debiéndose las calorías que cede a la congelación del agua, que se produce a razón de un gramo por cada 80 calorías que pierda. El calor de congelación es igual al de fusión.

Los líquidos, pues, están constituidos por partículas que se mueven con cierta libertad, ejerciéndose entre ellas fuerzas atractivas o de cohesión. El calor que se suministra a un líquido se transforma en energía cinética de las partículas, las cuales se moverán más de prisa. Cuando una de ellas sale del líquido a través de su superficie libre, la atracción de las restantes tiende a hacerla volver al líquido, pero si la energía cinética que tenía es suficiente, podrá vencer dichas fuerzas y no volver a él. Estas partículas que salen del líquido se hallarán en el medio exterior muy separadas unas de otras, por lo que las fuerzas de cohesión entre ellas se hacen despreciables, constituyendo dichas partículas un *vapor*, que es como se llama a la fase gaseosa de un cuerpo líquido en las condiciones normales de presión y temperatura. El fenómeno del paso de la fase líquida a la gaseosa recibe el nombre de *vaporización*, y también en este caso, para vaporizar un gramo de líquido es necesario suministrarle la cantidad de calor característica del líquido, a la que se da el nombre de  *calor de vaporización*. Cuando el vapor se condensa, es decir, retorna a la fase líquida, devuelve una cantidad de calor exactamente igual a la que absorbió. El calor de condensación es igual al de vaporización. Además de los cambios de estado anteriormente señalados, debemos mencionar el paso directo del estado sólido al gaseoso y su inverso, que reciben el nombre de  *sublimación*.

INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LOS CAMBIOS DE ESTADO

La presión o fuerza por unidad de superficie que el medio exterior ejerce sobre un cuerpo sólido, líquido o gaseoso hace que la fusión o solidificación tengan lugar a temperaturas determinadas para cada valor de la presión. Estas temperaturas son características de la sustancia en evolución e influyen notablemente en los fenómenos de la vaporización y sublimación. Así, el hielo funde a una temperatura inferior a 0 °C cuando se le somete a una presión superior a la atmosférica (veáse lámina B/1), pero el efecto más marcado de la presión se ofrece en el fenómeno de la vaporización. Si tenemos un recipiente que contiene un líquido, las partículas de éste que escapan de él quedan formando una nube que contribuye a la presión que ejerce sobre el líquido la atmósfera exterior.



Habiendo colocado hielo en una bebida, cada gramo que se funde quita a ésta 80 calorías, enfriándola.



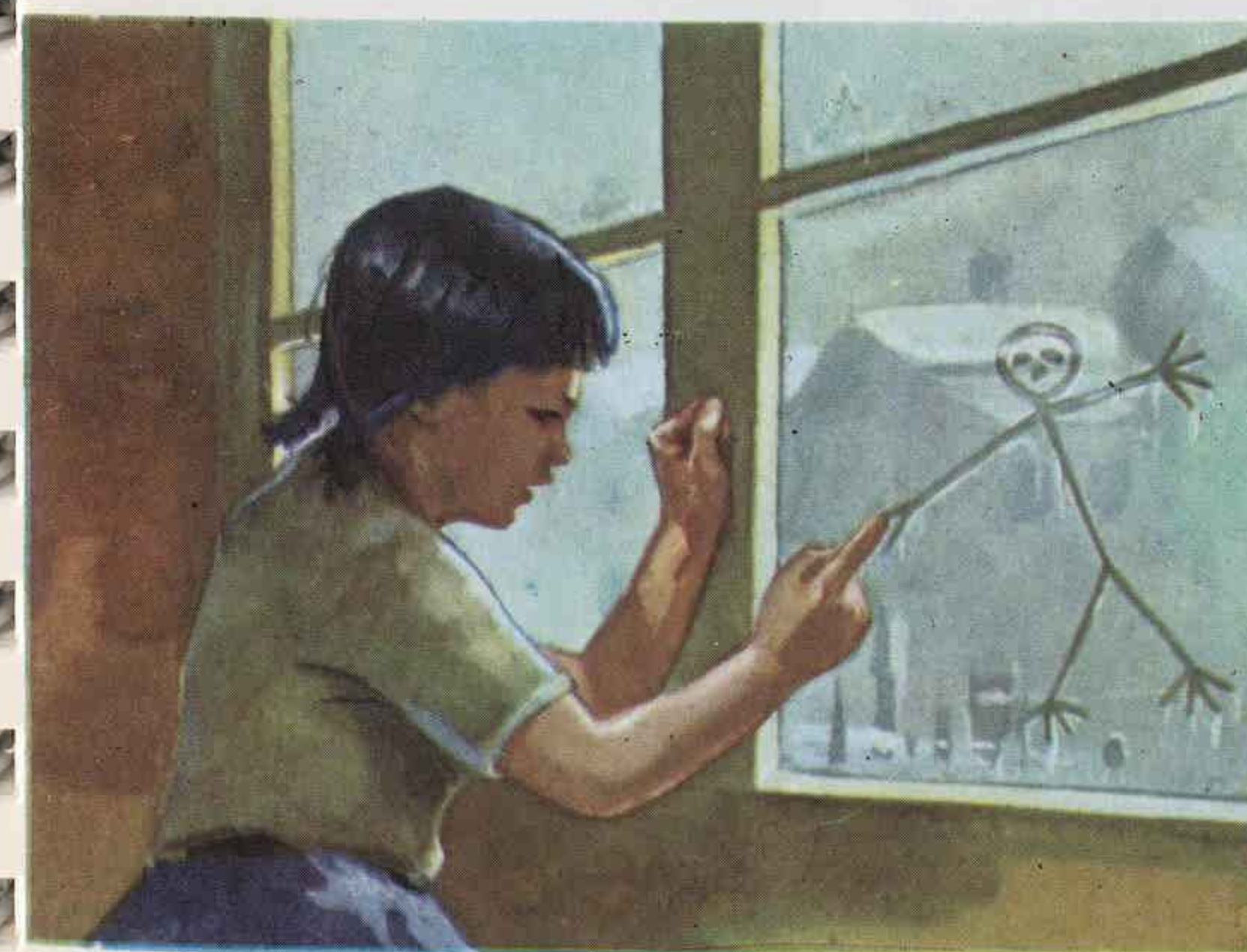
Cuando es de temer una helada nocturna, se colocan tinas de agua entre la fruta almacenada. Al descender la temperatura a 0 °C el agua se hiela, cediendo 80 calorías por cada gramo de agua, lo cual evita que la fruta se hiele.



Efecto refrigerante del sudor: al evaporarse, absorbe de la piel el calor de vaporización. Cada gramo de agua absorbe, al evaporarse, 537 calorías.



En los climas secos, el agua que transpira un botijo se vaporiza fácilmente, tomando de éste el calor de vaporización, con lo cual se enfría el agua del interior.



En invierno se empañan los cristales fríos, porque el vapor de agua del interior les cede el calor de vaporización, condensándose sobre ellos.



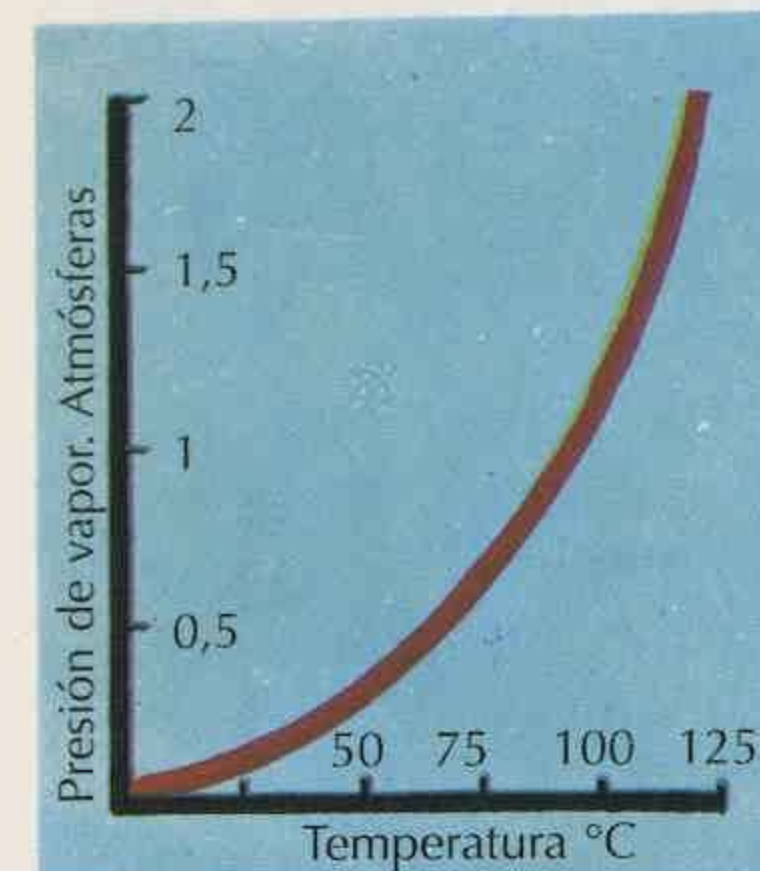
La nieve carbónica (CO<sub>2</sub> sólido) pasa al estado gaseoso sin licuarse (se sublima). Emplease para embalar helados.

Estas partículas se mueven en todas direcciones, y algunas de ellas vuelven al líquido, con lo cual se forma una doble corriente: unas que salen del líquido y otras que vuelven a él. Cuando sea mayor el número de las que salen, tenemos vaporización, y condensación en caso contrario. En la vaporización irá aumentando el número de partículas de vapor por unidad de volumen en el exterior, al mismo tiempo que progresará la participación de éstas en la presión, contribución llamada *tensión de vapor*. Con ello se acrecentará el número de las que vuelven al líquido en unidad de tiempo y llegará el momento en que será igual al de las que salen, diciéndose entonces que el líquido está en equilibrio con su vapor. A éste se le da el nombre de *vapor saturante*, y a la tensión correspondiente, *tensión de vapor saturante*. Pero si elevamos la temperatura, aumentarán la energía cinética de las partículas de líquido y el número de las capaces de escapar, con lo cual se destruye el equilibrio y prosigue la vaporización, hasta que el aumento del número de partículas de vapor haga que se restablezca el equilibrio, si bien para un nuevo valor de la tensión de vapor saturante. Esto nos indica que la tensión de vapor saturante depende de la temperatura. La temperatura a la cual el vapor de agua de la atmósfera se convierte en saturante recibe el nombre de *punto de rocío*, pues cualquier superficie a temperatura no mayor que ella, situada en la atmósfera, condensará sobre sí el vapor de agua atmosférico, produciendo rocío. Llevando a una gráfica, en abscisas, temperaturas, y en ordenadas, tensiones de vapor, los valores correspondientes a los distintos equilibrios entre líquido y vapor, se obtiene una curva llamada *curva de vaporización*. A una temperatura dada, las tensiones de vapor inferiores a la saturante indican la presencia de vapor, mientras a tensiones superiores el vapor no puede subsistir, pues todas las partículas gaseosas habrán pasado a la fase líquida. También podrí-

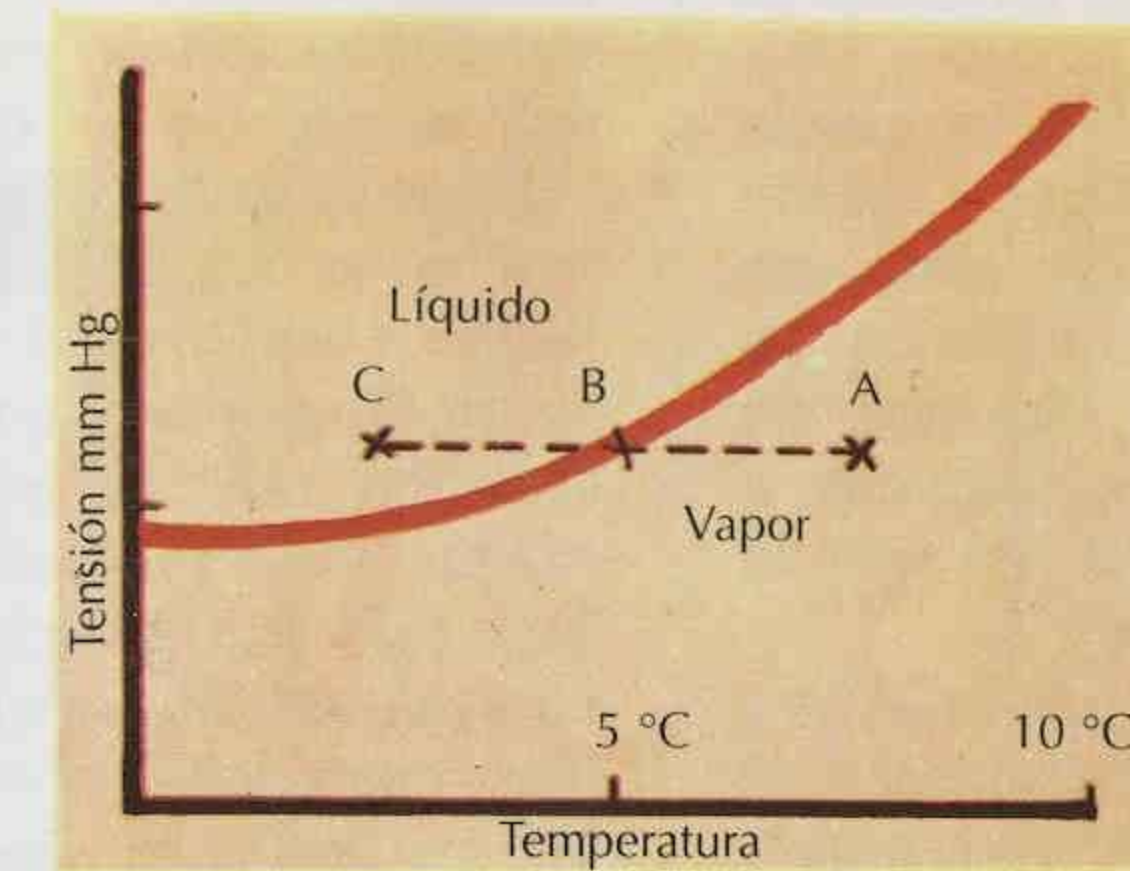
amos representar los estados de equilibrio entre el cuerpo en estado líquido y en estado sólido, y tendríamos la *curva de fusión*. Estas dos curvas se cortarían en un punto que representa, por hallarse sobre la curva de vaporización, un estado de equilibrio entre el líquido y su vapor; y por encontrarse sobre la de fusión, un estado de equilibrio entre los estados líquido y sólido; luego, en dicho estado se hallan en equilibrio las tres fases, y por tanto la sólida y la gaseosa, por lo que deberá pertenecer a la curva de sublimación. Tal posición recibe el nombre de *punto triple*.

**EBULLICIÓN**

Los líquidos suelen tener aire disuelto en forma de burbujas invisibles por su pequeñez. Puede comprenderse que, en el interior de dichas burbujas, el vapor de agua será saturante y, si su tensión es inferior a la presión que se ejerce sobre la superficie libre del líquido, la burbuja está sometida a una presión exterior mayor que la interior, por lo que su volumen permanece muy pequeño. Pero al elevar la temperatura llegará un momento en que la tensión de vapor saturante será igual a la presión exterior, y a partir de entonces esta presión será superada por la interior, haciendo que la burbuja se hinche, flote y que, al llegar a la superficie, revienta, liberando el vapor que contenía. Esto ocurre simultáneamente en todas las burbujas del líquido, y el fenómeno recibe el nombre de *ebullición*. A cada temperatura se produce la ebullición para una presión exterior determinada (la que sea igual a la tensión de vapor saturante correspondiente), y así, en el caso del agua, la ebullición se produce a 100 °C si la presión exterior es la atmosférica normal (1 atmósfera), pero, si la presión es inferior, el agua hervirá a menos de 100 °C y si fuera superior, a temperatura más elevada que los 100 °C, como ocurre en las calderas.



Curva de vaporización del agua.



De noche, la planta se enfría más deprisa que el aire. El vapor de agua atmosférico en contacto con ella, se enfría de A a C, sin variar su tensión. Al alcanzar la temperatura B, la tensión es la de saturación y el vapor se condensa sobre la planta (rocío).

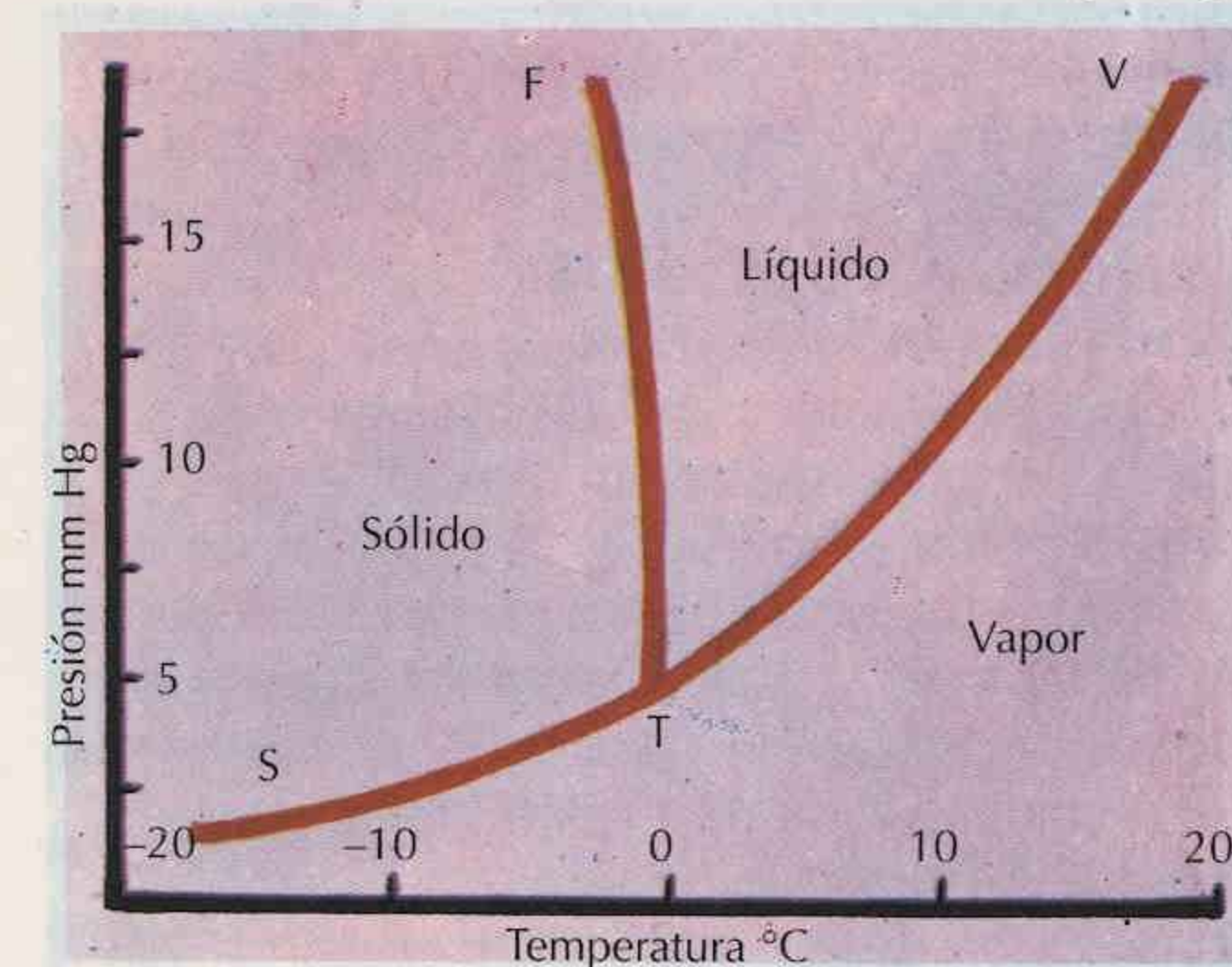
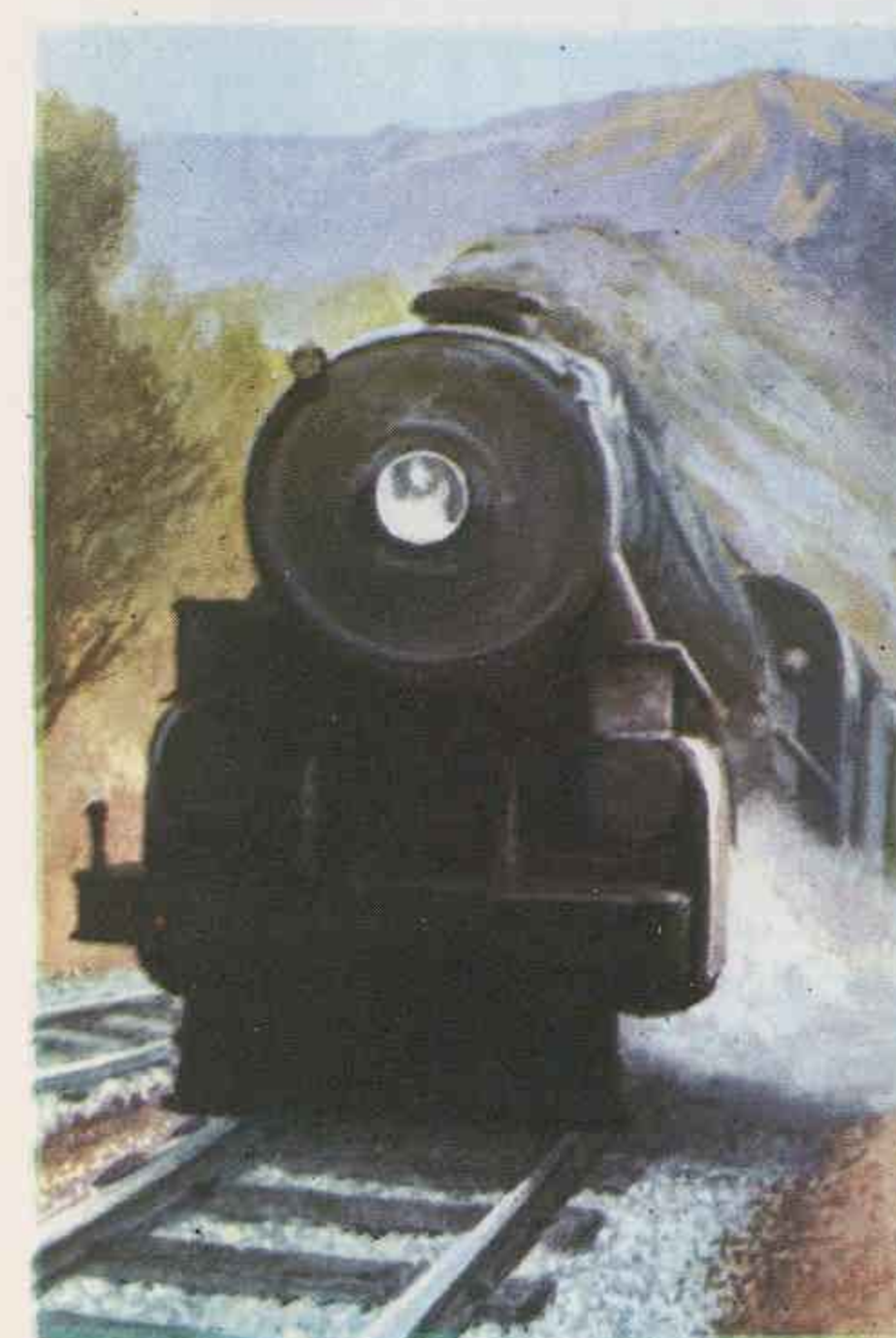


Diagrama del punto triple del agua. Curvas: S, de sublimación; F, de fusión; V, de vaporización; T, punto triple 0,01 °C y 4,6 mm Hg.



En una cumbre elevada, la presión es inferior a 1 atmósfera, y el agua hierve a menos de 100 °C.



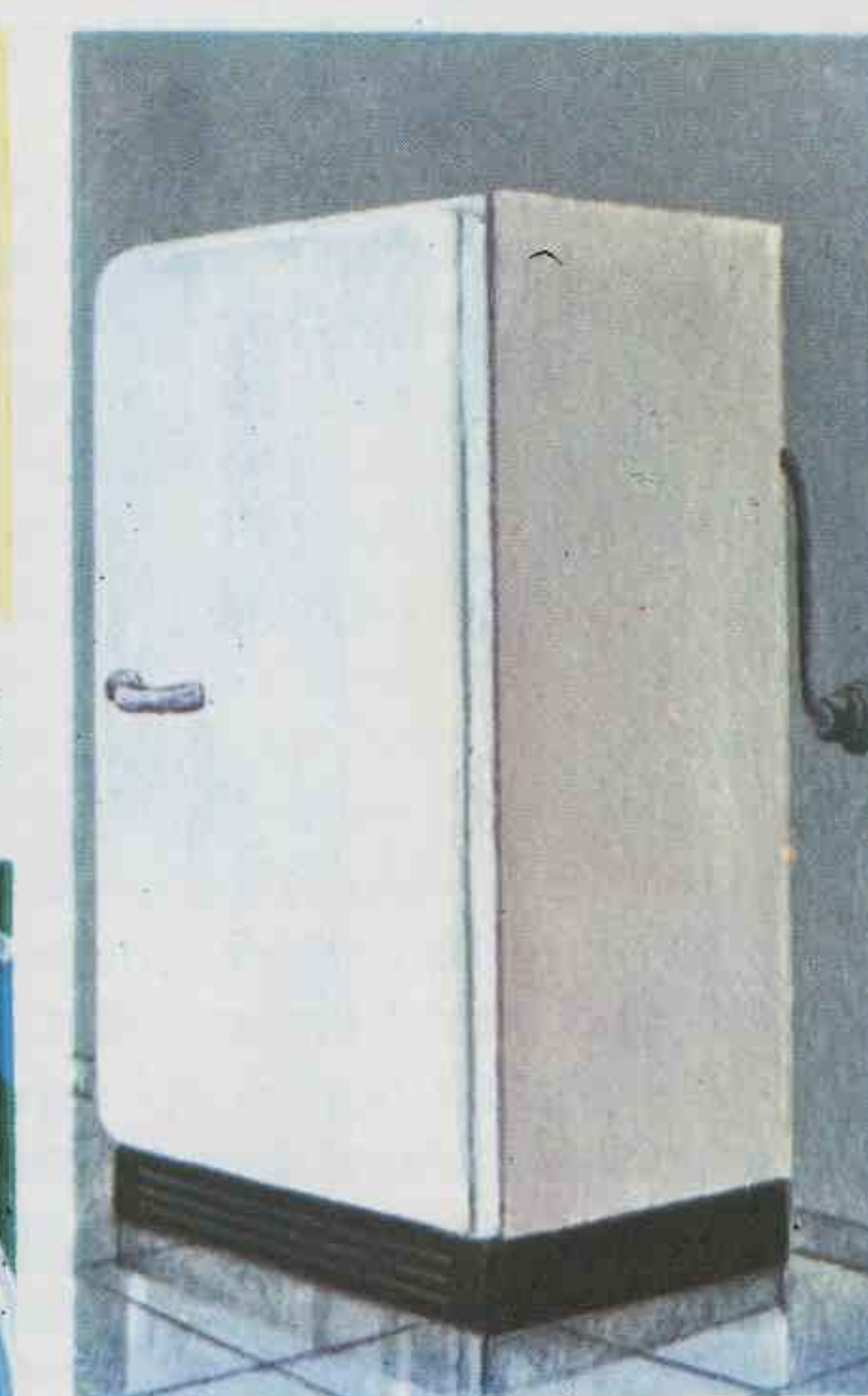
En una caldera de locomotora que trabaja a 17 atmósferas, el agua hierve a unos 400 °C.



Si en el interior de una olla a presión ésta es de 2 atms, el agua hierve a 120 °C.



La disminución de energía cinética es igual al calor desprendido en los frenos.



El frigorífico extrae el calor de los cuerpos, más el equivalente al trabajo del motor.

TERMODINÁMICA

Ya se ha dicho que el calor es una forma de la energía. Puede transformarse en trabajo y, recíprocamente, gastando un trabajo se puede hacer circular calor entre dos cuerpos. La parte de la Física que se ocupa de las relaciones entre calor y trabajo es la Termodinámica. Su estudio requiere conocimientos elevados de Matemáticas y Física; con todo, pasamos a enunciar y explicar dos principios en que se basa.

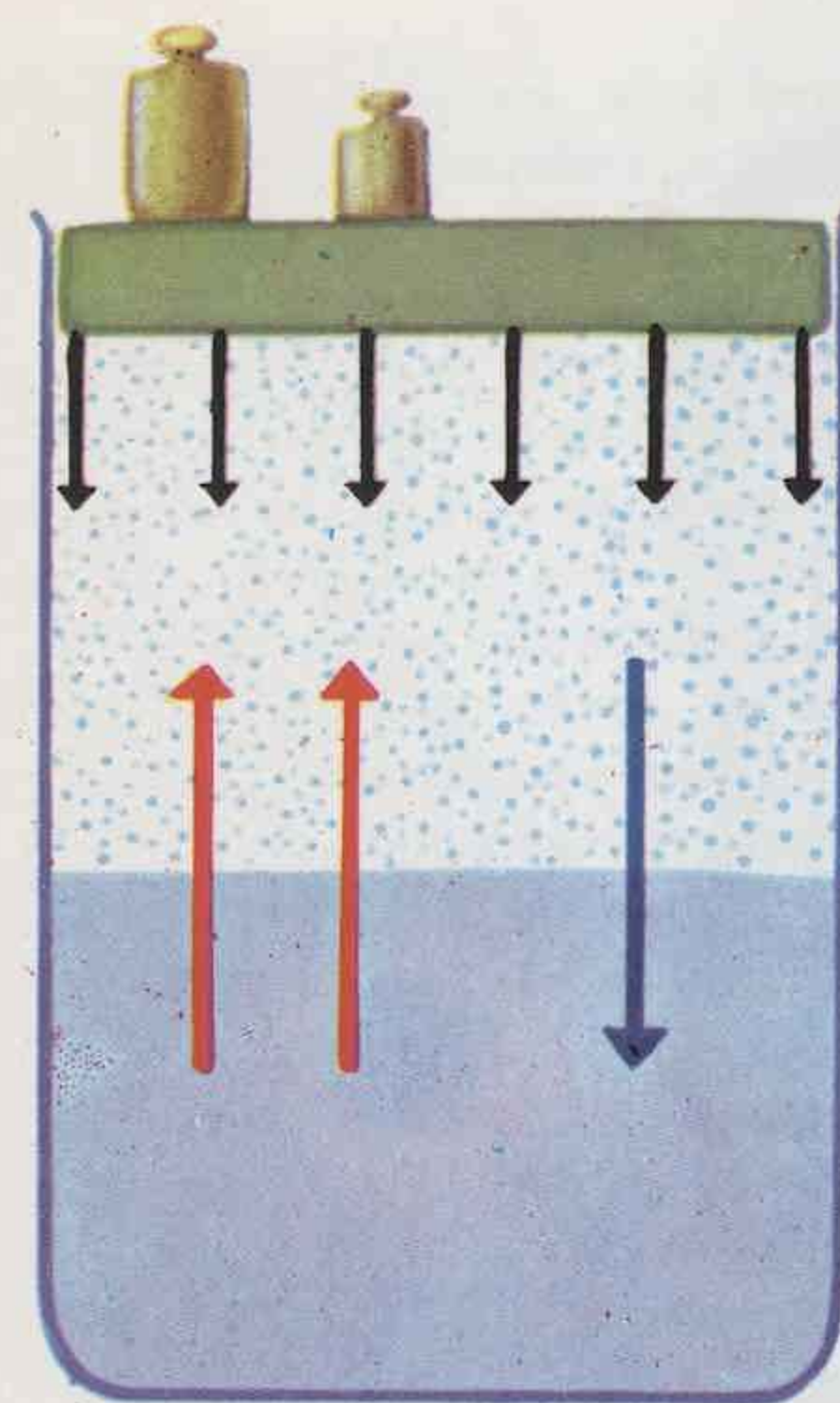
El primero no es sino una variante del principio de conservación de la energía, que dice que la energía no se crea ni se destruye, pero puede pasar de una forma a otra. Esto nos explica por qué no se conserva la energía mecánica en un sistema con rozamientos: parte de ella aparece en forma de calor en los rozamientos, y lo que se conserva es la energía total. No se podrá, pues, realizar una máquina térmica de funcionamiento periódico que realice un trabajo sin absorber una cantidad equivalente de calor. Así, si aplicamos un freno (rozamiento) a una rueda que gira, disminuirá su energía cinética y, según el teorema de las fuerzas vivas, esto representa un trabajo negativo de las fuerzas de rozamiento. Este trabajo deberá ser igual a la cantidad de calor absorbida por la rueda, cantidad que es negativa, en efecto, pues el desprendimiento de energía calorífica en el freno es una absorción negativa de calor. Ahora bien,

según el primer principio, también sería posible que la rueda, estando parada, se pusiera en marcha espontáneamente, enfriándose. Esta transformación no es real, por lo que vemos que es preciso un criterio de evolución que indique cuál de los dos sentidos de la transformación es el verdadero. Dicho criterio de evolución constituye el segundo principio de la Termodinámica, que podemos enunciar diciendo que es imposible que exista una máquina de funcionamiento cíclico que no haga más que realizar trabajo tomando el calor equivalente de un solo foco calorífico. Si no fuera cierto este principio, podríamos construir buques que se movieran transformando en trabajo el calor que tomaran del mar, inmenso almacén de energía. Otro modo de enunciar este principio, equivalente al anterior, según se puede demostrar, es diciendo que el calor pasa siempre espontáneamente de los cuerpos calientes a los fríos. Esto no quiere decir que no pueda pasar de un cuerpo frío a uno caliente (como en las máquinas frigoríficas), sino que el paso no es espontáneo, o sea que para forzarlo hay que gastar trabajo. En el ejemplo de la rueda frenada, que se creía posible ponerla en movimiento al enfriarse, hay que tener en cuenta que el cuerpo frío debe ceder calor para transformarlo en trabajo contra las fuerzas de freno; es decir, pasaría calor espontáneamente de la rueda cada vez más fría al freno caliente, en contra del segundo principio.

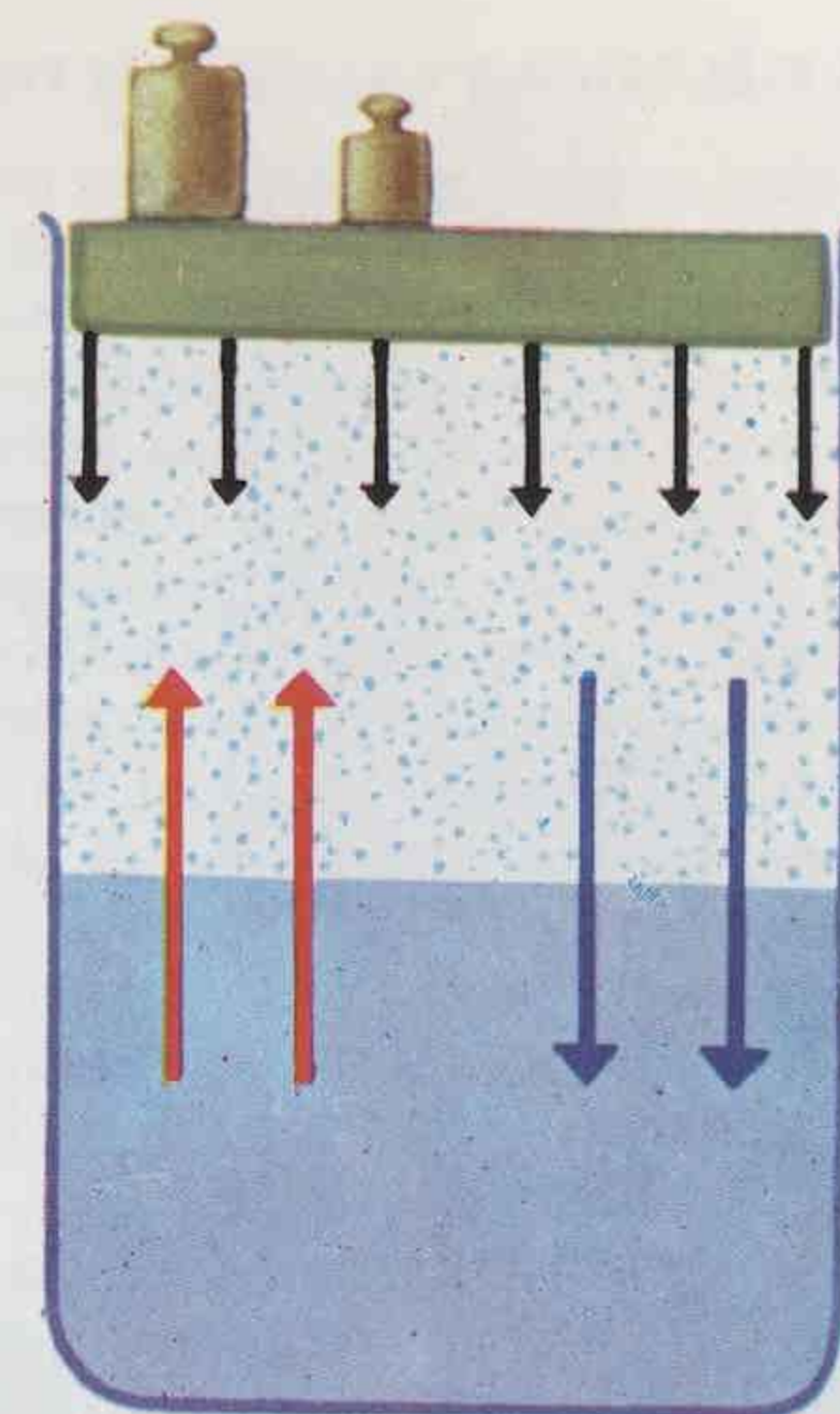
(Continuación de la Tarjeta A/12)

Téngase en cuenta que, en este proceso, el desplazamiento de las partículas es muy pequeño, mientras que la perturbación se va propagando a lo largo de todo el tubo. Tanto en este caso como en el citado anteriormente al referirnos a las ondas transversales, el espacio a que se traslada la perturbación en unidad de tiempo recibe el nombre de velocidad de propagación. Podríamos suponer que la perturbación consistiera en un movimiento armónico simple de una partícula del medio, y lo anteriormente dicho se repetiría periódicamente; con lo cual al cabo de cierto tiempo todos los puntos de una determinada región del espacio se hallarían vibrando. Ahora bien, mientras unas partículas se hallarían en su amplitud máxima, otras estarían pasando por su centro de vibración, y otras se encontrarían en posiciones intermedias. El lugar geométrico de los puntos que estén en un mismo estado de vibración

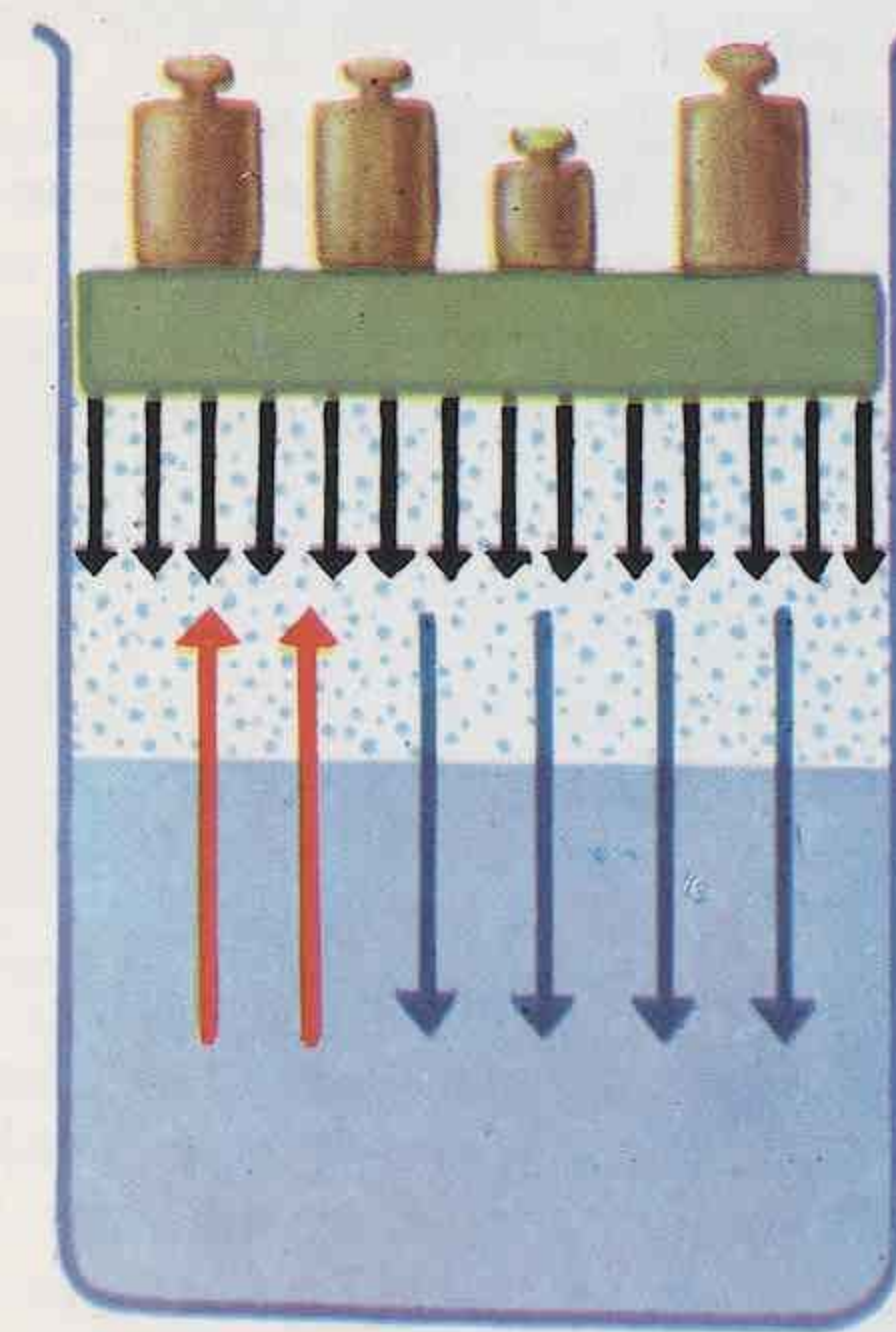
recibe el nombre de superficie de onda. Si el medio es isótropo, es decir, tiene iguales propiedades en todas direcciones, la perturbación originada por la partícula se propagará, en un mismo tiempo, a igual distancia en todas direcciones, y el frente de onda tendrá forma esférica. Durante un tiempo igual a un período de vibración, la perturbación habrá avanzado una distancia  $\lambda$ , llamada longitud de onda, y como al final del período las condiciones en todos los puntos son las mismas que al principio, el lugar que alcanzaba al principio el frente de onda de elongación máxima se verá alcanzado de nuevo por otro frente de onda análogo, habiéndose trasladado el primero una distancia  $\lambda$ . Es decir, la longitud de onda resulta ser igual a la distancia que separa dos ondas consecutivas. Como la longitud de onda es el espacio recorrido en un período  $T$  por la perturbación que se propaga con velocidad  $v$ , será  $\lambda = vT$  o, por ser  $T = 1/f$ ,  $\lambda = v/f$ .



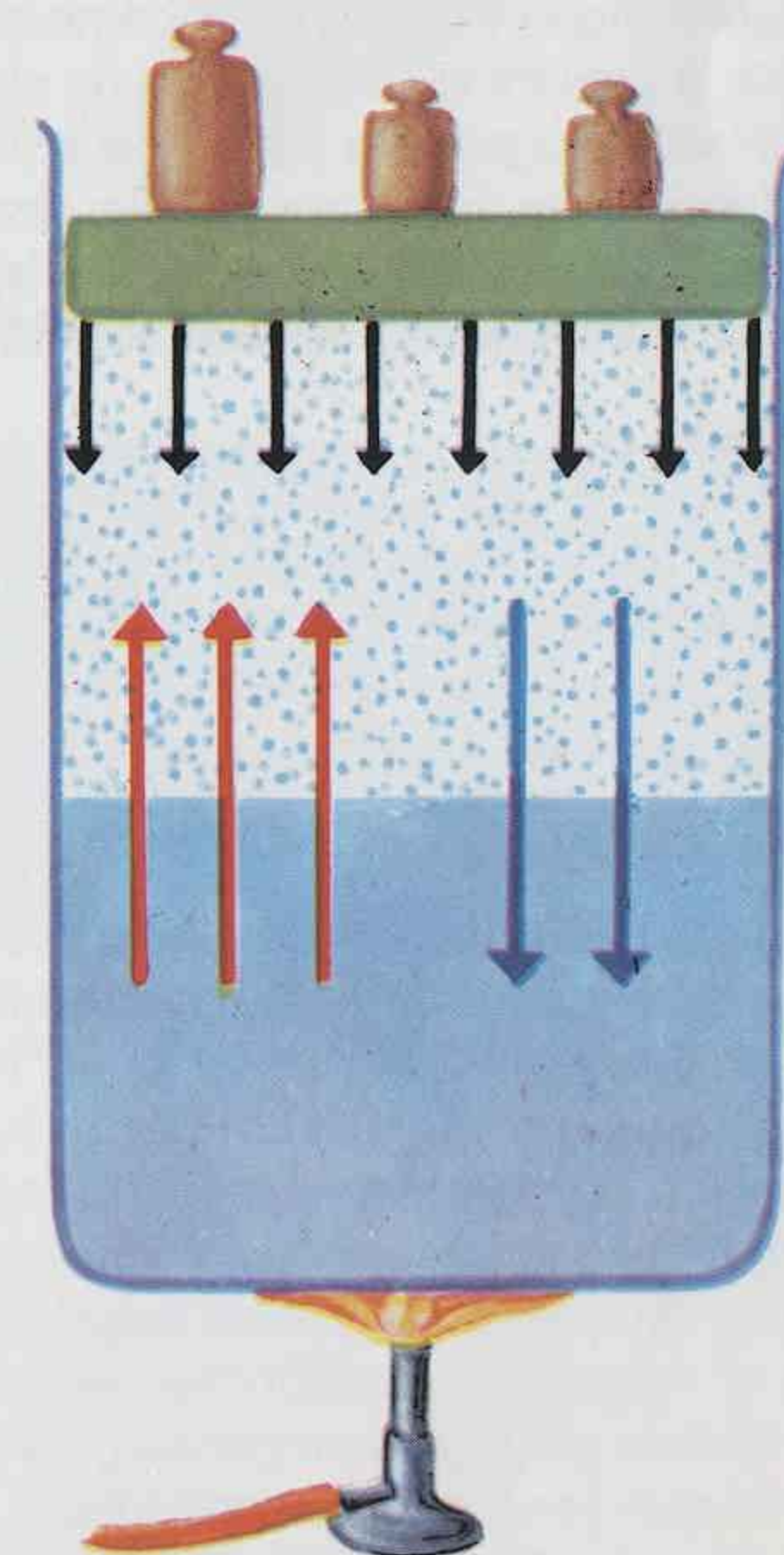
Salen, del líquido, más moléculas que las que vuelven a él. El líquido se está vaporizando. La tensión de vapor es inferior a la de saturación.



Tantas cuantas moléculas salen del líquido, a él vuelven. Está en equilibrio con su vapor. La tensión de vapor es la de saturación.



El aumento de la presión exterior favorece la vuelta de las moléculas al líquido. El vapor se condensa para mantener constante la tensión de vapor saturante.



Al calentar el líquido, aumenta la energía cinética de sus moléculas y, por ende, el número de las que pueden escapar de él, con lo cual se rompe el equilibrio y el líquido se vaporiza. La tensión de vapor no es la de saturación a la nueva temperatura.

# Electricidad

## CARGA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO

Ya 600 años antes de Jesucristo, Tales de Mileto observó que una barra de ámbar frotada con un paño atraía cuerpos de pequeña masa, y esa acción no podía considerarse gravitatoria, porque el ámbar sin frotar no atraía perceptiblemente los cuerpos. Eso indica la presencia de acciones mucho más intensas que las gravitatorias. Como la palabra griega que significa ámbar es *eélektron*, a estas fuerzas nuevas se les dio el nombre de eléctricas. Sin embargo, los mismos fenómenos ocurren cuando en vez de frotar ámbar se frota vidrio, lacre, ebonita, etc. Suspendamos una bolita de médula de saúco de un hilo de seda. El sistema recibe el nombre de péndulo eléctrico: coloquemos dos de estos péndulos en presencia y toquémoslos previamente con sendas varillas de vidrio frotadas: los dos péndulos se repelen con violencia. En cambio, si una de las varillas hubiera sido de lacre en vez de vidrio, los péndulos se atraerían fuertemente. Dejemos uno de ellos tal como está y sustituyamos el otro por un conjunto de péndulos que hayan sido tocados por diversos materiales frotados. Se observa entonces que unos se comportan como el vidrio, y otros como el lacre. Ello indica la presencia de dos tipos de electricidad: la del vidrio o *positiva* y la del lacre o *negativa*. Los fenómenos anteriores pueden resumirse diciendo que *las electricidades de igual signo se repelen y las de signo contrario se atraen*.

## CARGA ELÉCTRICA

La cualidad física causante de la existencia de fuerzas eléctricas recibe el nombre de *carga eléctrica* y los cuerpos que se atraen se dice que están *cargados* positiva y negativamente, según sea la clase de electricidad que posean. Frotamos una varilla de vidrio y acerquémola a un péndulo cargado positivamente: lo repele. Pero si acercamos al péndulo el paño con que hemos frotado el vidrio, lo atrae; lo cual nos indica que al frotar el vidrio, éste ha quedado cargado positivamente, mientras el paño lo ha sido negativamente. Ello constituye el primer indicio de que en la materia existen cargas positivas y negativas, distribuidas de manera que los efectos de unas compensan los de las otras, y de que la acción de frotamiento no ha hecho más que separarlas. Se tiene hoy la evidencia de que el paño ha arrancado del vidrio unas cargas negativas llamadas *electrones*, que,

al quedar en el paño, han roto dicha compensación de efectos. Debido a ello, existe ahora en el paño un exceso de cargas negativas, mientras que en el vidrio ha quedado un defecto de dichas cargas, por lo cual predomina la acción de las positivas; en este caso se dice que el vidrio ha quedado cargado positivamente. Cuando lo que se frota es una barra de lacre, éste presenta una estructura particular; en vez de perder electrones, los toma del paño, y el último queda cargado positivamente, según puede comprobarse por el hecho de repeler un péndulo queda cargado con electricidad del vidrio.

Hemos introducido el concepto de carga como la cualidad física causante de las fuerzas eléctricas, pero podemos darle el carácter de cantidad. Para ello, consideremos tres péndulos, *A*, *B* y *C*, cargados. Pongamos *A* en presencia de *C* y entre ellos se ejercerá una cierta fuerza. Quitemos, entonces, *A* y pongamos en su lugar *B*. Si la fuerza que ejerce *B* sobre *C* es la misma que la ejercida por *A*, diremos que *A* y *B* tienen cargas iguales. Si la fuerza que ejerce *B* sobre *C* fuera doble, triple..., *n* veces mayor que la ejercida por *A*, consideraremos que la carga de *B* es el doble, triple..., *n* veces mayor que la de *A*. Como unidades de medida para carga eléctrica se tienen: *la unidad electrostática*, que es la carga que, puesta en presencia de otra igual, en el vacío y a 1 cm de distancia, la repele con la fuerza de una dina; el *coulomb (C)*, igual a tres mil millones de unidades electrostáticas, y la *unidad electromagnética* de carga, igual a 10 C.

## CAMPO ELÉCTRICO

En todo punto de una región del espacio en que se halle una carga eléctrica, se ejercerá una fuerza sobre cualquier carga colocada en él. Esta fuerza será proporcional a la carga de *prueba* que coloquemos en dicho punto, lo cual significa que, si dicha carga es *q*, la fuerza será *q* veces mayor que la que se ejercería colocando en dicho punto una carga unidad. La fuerza que en dicho punto se ejercería sobre la unidad positiva de carga recibe el nombre de *campo eléctrico* y será un vector que representaremos por *E*.

Por todo lo anteriormente dicho tendremos que la fuerza que en dicho punto se ejerce sobre una carga *q* será  $F = qE$ . La región considerada del espacio también podría estar sometida

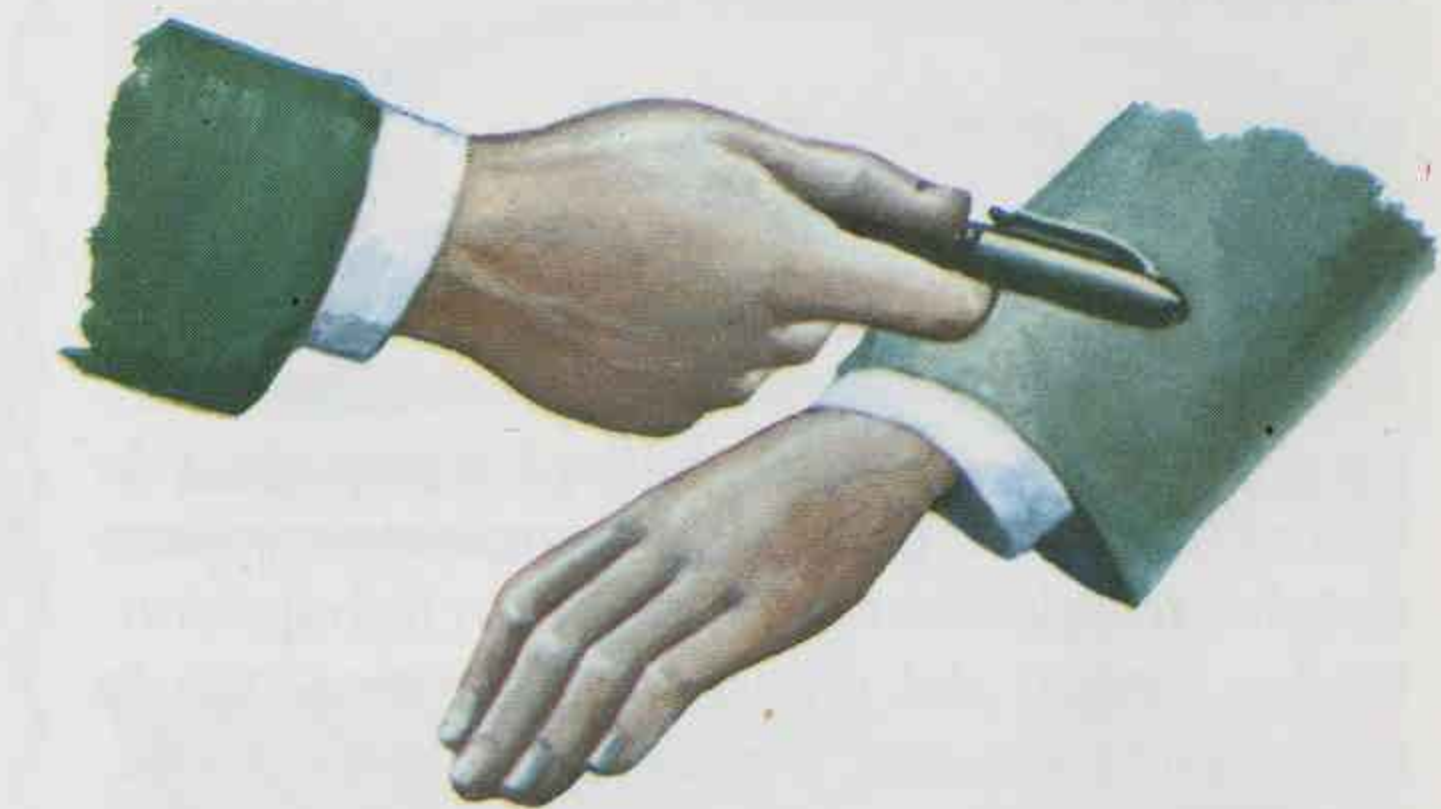
(Continúa en la TARJETA C/3)



El cierre magnético es otra aplicación de las fuerzas magnéticas.

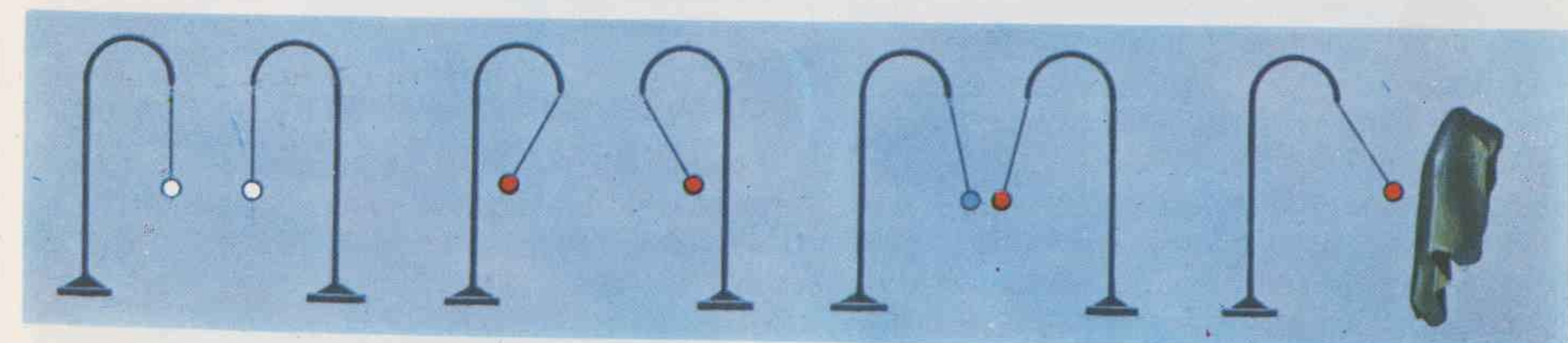


Con una barra de ámbar frotada, Tales de Mileto logró atraer cuerpos de pequeña masa.

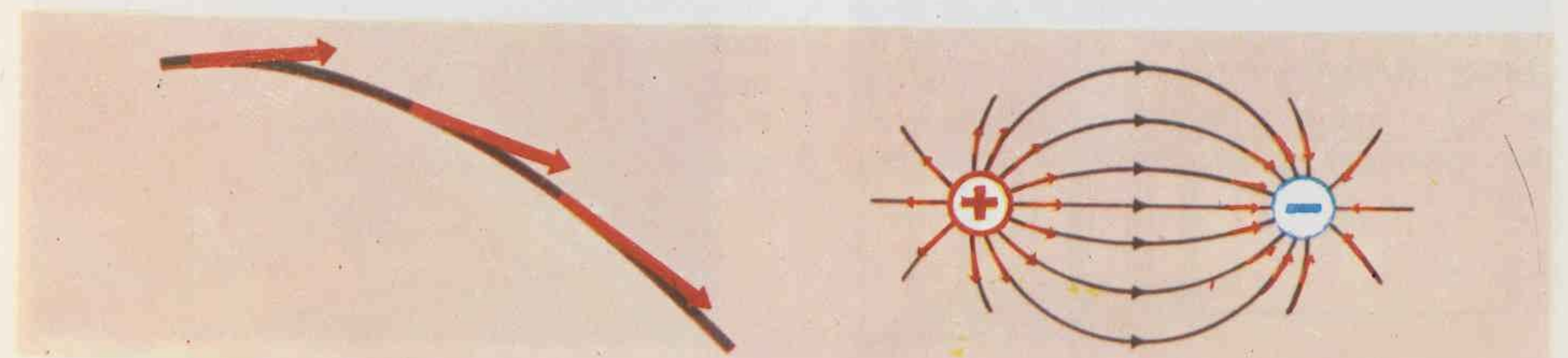


Nosotros podemos hacer lo mismo (con pedacitos de papel, p. ej.), frotando la estilográfica con un tejido de lana.

Existen grúas para elevar piezas de hierro por la acción magnética de un electroimán.



Dos péndulos eléctricos que no han sido cargados ni se atraen ni se repelen. Si se cargan con electricidades del mismo signo, se repelen. Cuando aquéllas son de signo contrario, se atraen. El paño con que se frotó la barra que tocó al péndulo atrae a éste, por tener electricidad de signo contrario.



Línea de fuerza es una línea tangente, en cada punto, al vector campo correspondiente. Las líneas de fuerza nacen en las cargas positivas y mueren en las negativas.

POTENCIAL ELÉCTRICO

LEY DE COULOMB

El campo creado por una carga puntiforme ejerce sobre otra una fuerza que será, en virtud del principio de la igualdad de la acción y la reacción, igual y contraria. Fue Coulomb quien, experimentalmente, estableció que la fuerza con que se atraen o repelen dos cargas es proporcional a ellas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Dicha ley puede condensarse en la llamada *fórmula de Coulomb*:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q q'}{d^2}$$

donde  $q$  y  $q'$  son los valores de las cargas en presencia,  $d$  la distancia que las separa,  $F$  la fuerza que se ejerce y  $\epsilon$  una constante característica del medio en que se hallen, llamada constante dieléctrica.

DIFERENCIA DE POTENCIAL

Las fuerzas eléctricas tienen una particularidad importante: son conservativas. Es decir: al mover una carga eléctrica por un campo eléctrico, en cada punto se hallará sometida a la fuerza electrostática correspondiente, y para desplazarla deberemos realizar un trabajo contra las fuerzas del campo. Si hacemos que la carga parta de una posición y vuelva a ella, recorriendo un camino cerrado cualquiera, el trabajo total que deberemos realizar será nulo. El trabajo verificado contra las fuerzas del campo en un desplazamiento pequeño es igual y de signo contrario al que haríamos al trasladar la carga en sentido opuesto, ya que si en un caso el campo se opone al desplazamiento, en el otro lo favorece, con lo que en el primer caso efectuamos un trabajo *positivo* contra las fuerzas del campo, mientras en el segundo es el campo el que efectúa el trabajo, o sea que realizamos un trabajo *negativo*. Es decir, que *el trabajo que hay que realizar para trasladar una carga en un campo eléctrico de un punto a otro no depende del camino seguido entre ellos*. La fuerza depende de la magnitud de la carga ya que  $F = qE$ , y el trabajo de la posición de los puntos. Por ello, si hacemos la carga igual a la unidad, el trabajo a realizar contra las fuerzas del campo para trasladarla de un punto A a otro

B sólo dependerá de las posiciones de éstos, dándosele a dicho trabajo el nombre de diferencia de potencial entre B y A. Su unidad internacional es el *volt* (V), que es la diferencia de potencial existente entre dos puntos tales que, para transportar de uno a otro una carga de 1 C, hay que realizar un trabajo de 1 J.

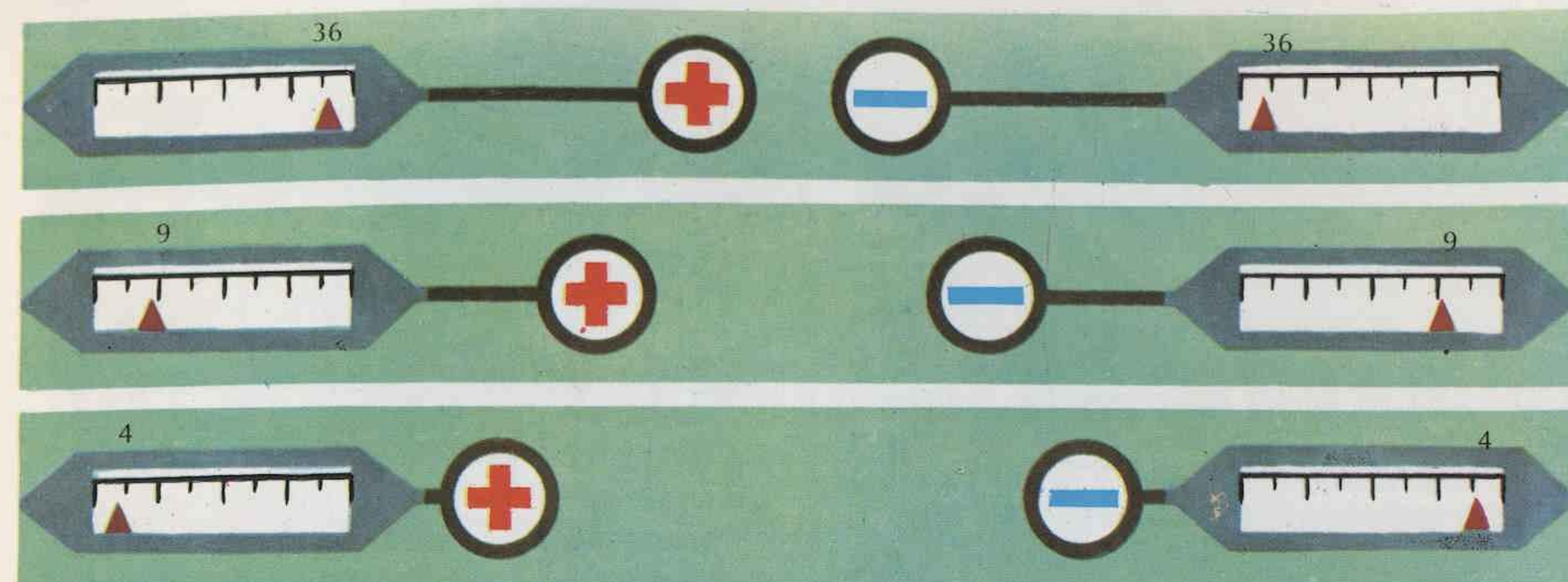
Si para trasladar de A a B 1C se tiene que efectuar un trabajo igual a la diferencia de potencial  $V_B - V_A$ , para llevar una carga  $q$  veces mayor habrá que realizar un trabajo  $q$  veces mayor, o sea que  $W_{AB} = q (V_B - V_A)$ , donde  $W_{AB}$  es el trabajo que hay que verificar para llevar de A a B la carga  $q$ .

Consideremos un campo eléctrico tal que en todos los puntos el vector  $E$  tenga la misma dirección, sentido y módulo. Tal campo se consigue entre dos placas paralelas e iguales a las que se aplique una diferencia de potencial  $V$ . Esto significa que para trasladar la unidad de carga de una placa a la otra habrá que realizar un trabajo igual a  $V$ . Pero la fuerza que se ejerce sobre la carga unidad es igual a  $E$ , y si imaginamos la carga unidad moviéndose a lo largo de una línea de fuerza, el trabajo será igual a  $V = E \times d$ , siendo  $d$  la distancia que separa las placas. De aquí que en un campo eléctrico *uniforme*,  $E = V/d$ , con lo que la unidad internacional de campo eléctrico es el Volt/metro (V/m).

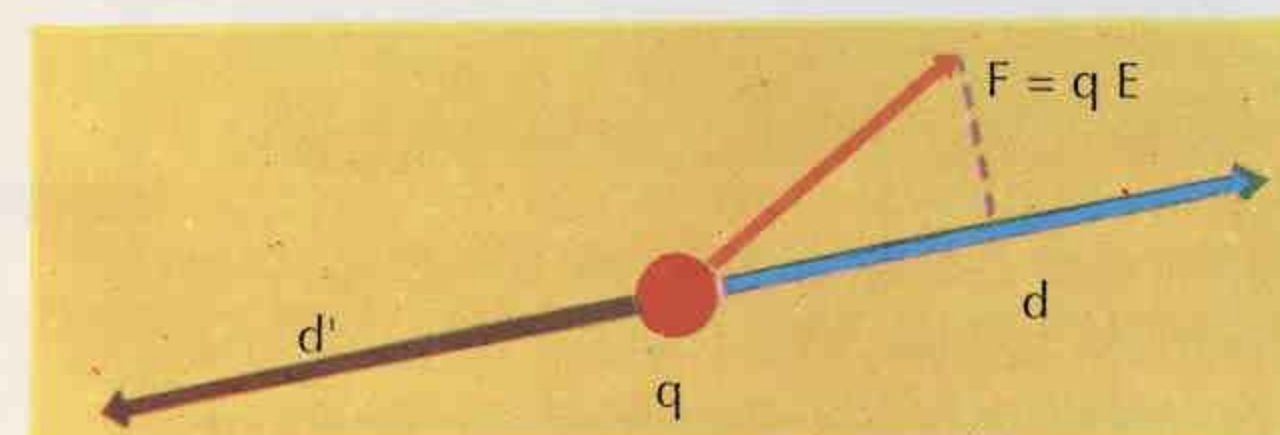
Una carga  $q$ , situada en un punto potencial  $V$ , poseerá una energía potencial  $qV$  y tenderá a tener la mínima energía potencial posible; luego si  $q$  es positiva tenderá a pasar a ocupar puntos de potencial más bajo, y al revés si es negativa.

CONDUCTORES Y AISLADORES

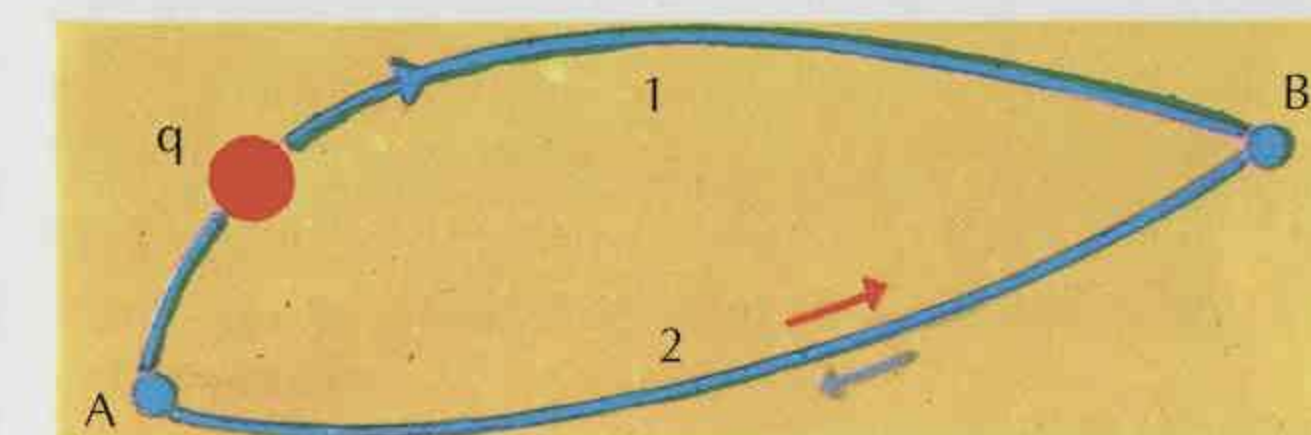
Cuando la carga eléctrica positiva de un cuerpo es igual a la negativa, el cuerpo está en estado neutro y no presenta ningún fenómeno eléctrico en su conjunto. Algunos cuerpos contienen un cierto número de cargas que pueden moverse libremente en él, recibiendo tales cuerpos el nombre de *conductores*. Al movimiento de las cargas se le da el nombre de *corriente eléctrica* y el sentido de ella es el del movimiento de las cargas positivas, o sea el opuesto al del movimiento de las negativas. Hay otras sustancias sin cargas móviles, por las que no circula la corriente: son los *aisladores*.



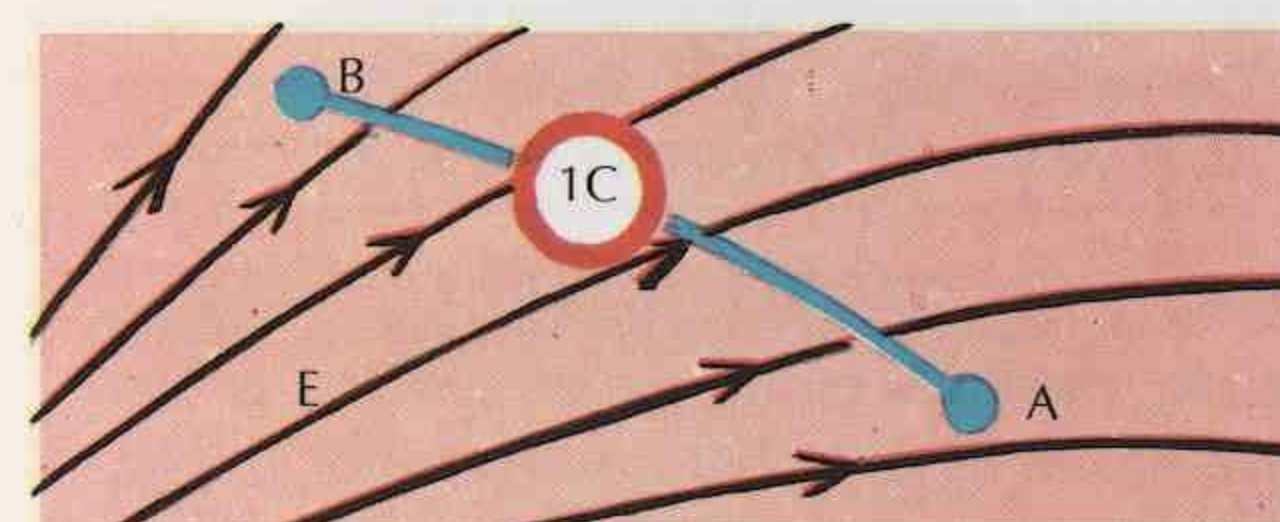
La fuerza que dos cargas se ejercen es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.



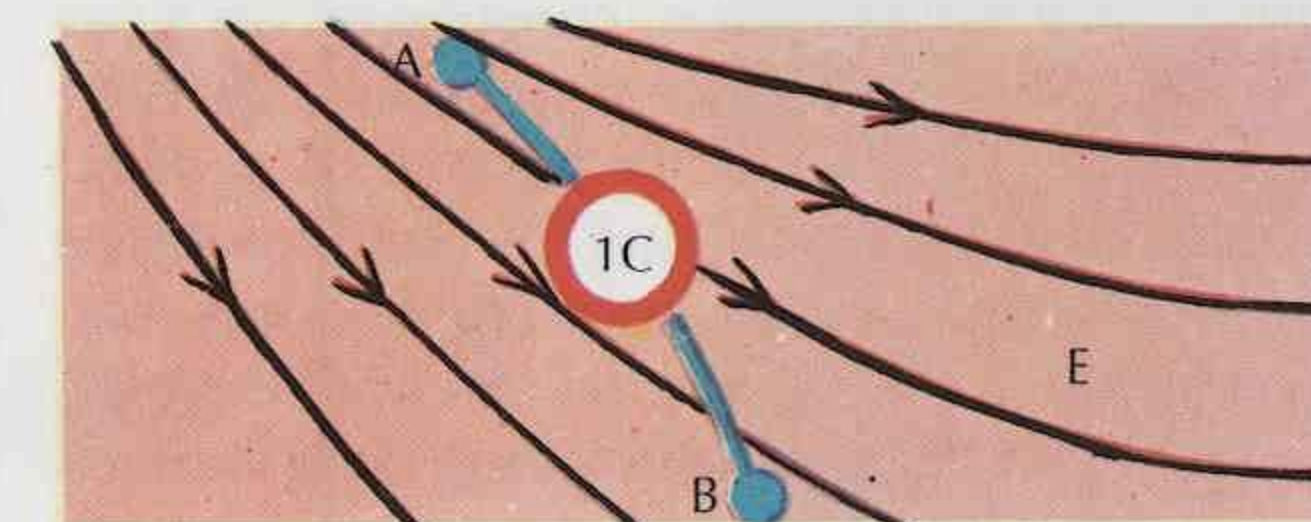
El trabajo de F, en el desplazamiento d, es opuesto al del desplazamiento d'.



El trabajo para llevar la carga q de A a B, no depende del camino recorrido.



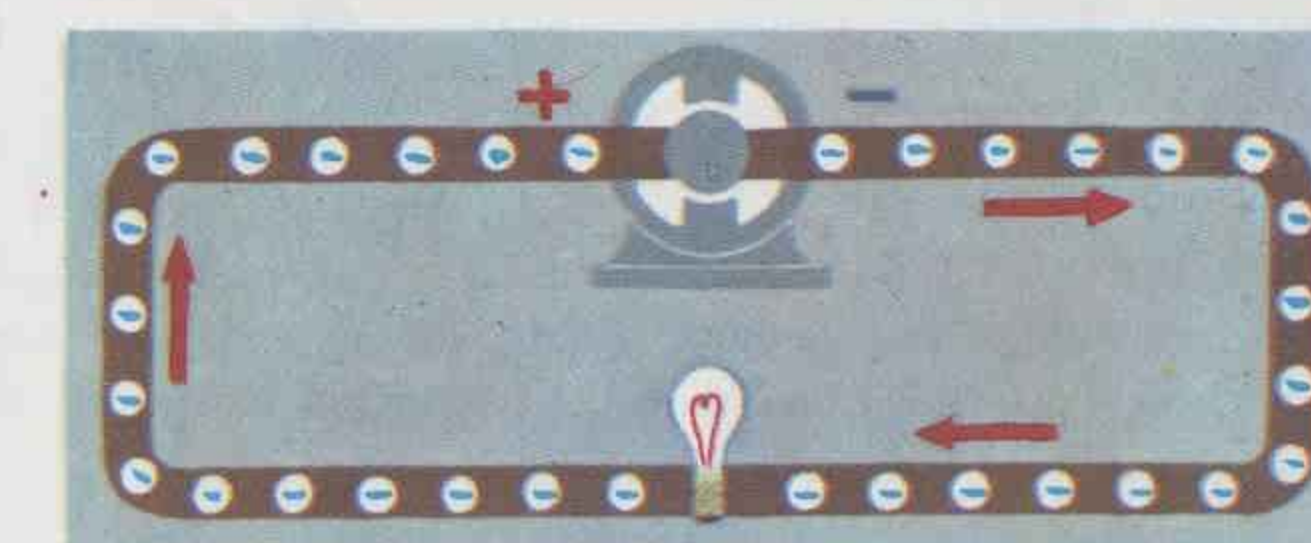
Si para llevar 1 C de A a B hay que gastar un trabajo de 1 J, el potencial de B es 1 V más alto que el de A.



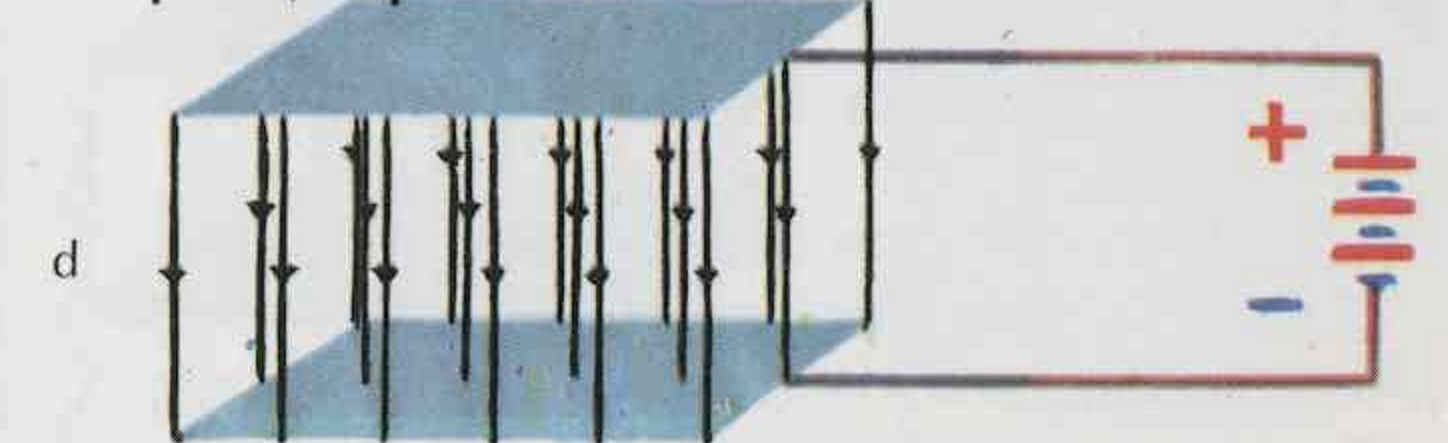
Si el campo ayuda a trasladar la carga de A a B, el trabajo contra las fuerzas del campo es negativo. B tiene menor potencial que A.



Las cargas positivas de la nube tienden a pasar a un potencial más bajo (tierra), y su descarga constituye un rayo.



Los electrones (negativos) pasan del polo - de la dinamo, al polo +, de potencial más alto.



Campo eléctrico uniforme  $E = V/d$ .

INDUCCIÓN ELECTROSTÁTICA

Al aplicar un campo eléctrico a un conductor, sus cargas móviles se hallan sometidas a fuerzas que las desplazan dentro del propio conductor. Este desplazamiento prosigue hasta el momento en que las cargas se hallan distribuidas de tal manera que originan, en cada punto, un campo eléctrico exactamente igual y opuesto al aplicado exteriormente. De esta forma, la fuerza que actúe sobre una carga situada en un punto cualquiera del cuerpo será nula. Al no poder salir las cargas del conductor, quedarán agrupadas en la superficie, y la fuerza que sobre ellas actúa será normal a la misma, pues si no lo fuera las desplazaría a lo largo de ella. De este fenómeno, llamado de *inducción* o *influencia electrostática*, deducimos: 1.º, el campo en el interior de un conductor en equilibrio es nulo; 2.º, en su superficie es normal a ella, y 3.º, en el interior de un conductor no puede haber carga eléctrica neta no nula. Esto significa que si un conductor tiene carga total no nula, estará distribuida por su superficie (si el conductor está en equilibrio).

CONDENSADORES; ENERGÍA DE UN CAMPO ELÉCTRICO

Dos conductores en presencia, cargados con cargas iguales y opuestas, constituyen un sistema llamado *condensador* si toda línea de fuerza que parte del conductor positivo va al negativo. Se dice, entonces, que los conductores se ejercen *influencia total*. Estos conductores reciben el nombre de *armaduras* del condensador, y entre ellos existe una diferencia de potencial, ya que para llevar la unidad positiva de carga de la armadura negativa a la positiva hay que realizar un trabajo contra las fuerzas del campo. Al duplicar la carga de las armaduras se duplica el trabajo mencionado, al triplicarse aquella se triplica éste, y así, sucesivamente, con lo que se conserva constante el cociente entre la carga de las armaduras y la diferencia de potencial existente entre ellas. A este cociente constante se le da el nombre de *capacidad* del condensador, y puede escribirse  $C =$

$Q/V$ , donde  $C$  es la capacidad,  $Q$  la carga y  $V$  la diferencia de potencial entre las armaduras. Es posible demostrar que cuando las dos armaduras son paralelas, y su separación, pequeña,  $C = \epsilon S/d$ , donde  $\epsilon$  es la constante dieléctrica del medio interpuesto entre las armaduras,  $S$  el área de la superficie de una armadura encarada a la otra y  $d$  la separación entre ambas. La unidad de medida de capacidad en el sistema internacional es el *farad* (F), capacidad de un condensador que al aplicar entre sus armaduras una diferencia de potencial de 1V adquiere una carga de 1C. Resulta demasiado grande, y por ello suelen utilizarse submúltiplos suyos. Cargar un condensador es transportar electrones de una armadura a la otra a través de un conductor exterior que las une. En éste debe existir un dispositivo que realice el trabajo necesario para llevar los electrones de una armadura a la otra a través de un conductor exterior que las une. En éste debe existir un dispositivo que realice el trabajo necesario para llevar los electrones a la armadura negativa, venciendo la fuerza de repulsión que ésta ejerce sobre aquéllos y la de atracción de la otra. Este trabajo se convierte en energía electrostática que queda almacenada en el espacio existente entre las armaduras, que es donde se crea el campo eléctrico. Al descargarse el condensador, se recupera dicha energía, que, según se demuestra, es igual a

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C},$$

donde  $Q$  es la carga del condensador,  $V$  la diferencia de potencial entre sus armaduras y  $C$  su capacidad. En el caso del condensador plano, el volumen entre sus armaduras es  $S \cdot d$ , y la diferencia de potencial es  $V = E \cdot d$ .

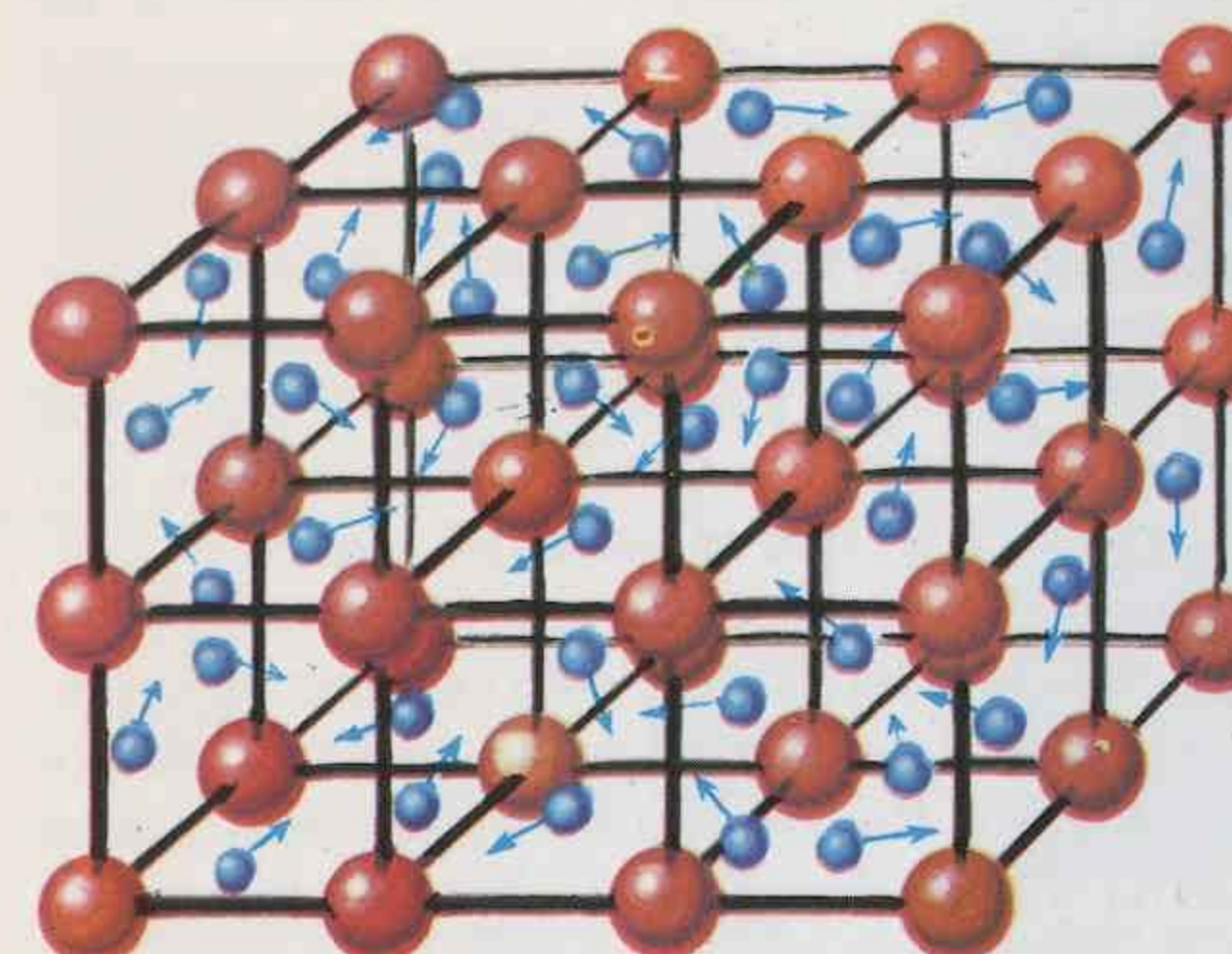
$$W = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{d} (E \cdot d)^2 = \frac{\epsilon E^2 S d}{2},$$

y dividiendo por el volumen  $S \cdot d$  ocupado por el campo, tendremos la energía por unidad de volumen  $\epsilon E^2/2$ . Este resultado es totalmente general, y puede decirse que en todo campo eléctrico la energía se distribuye de manera que en cada punto la *densidad de energía* es igual a  $\epsilon E^2/2$ .

campo eléctrico, y es posible trazar líneas tales que en cada punto sean tangentes al vector campo correspondiente; son las *líneas de fuerza* del campo eléctrico. Como toda carga positiva repele la unidad positiva de carga, y toda carga negativa la atrae, las líneas de fuerza nacen en las cargas positivas y mueren en las negativas.

(Continuación de la TARJETA C/1)

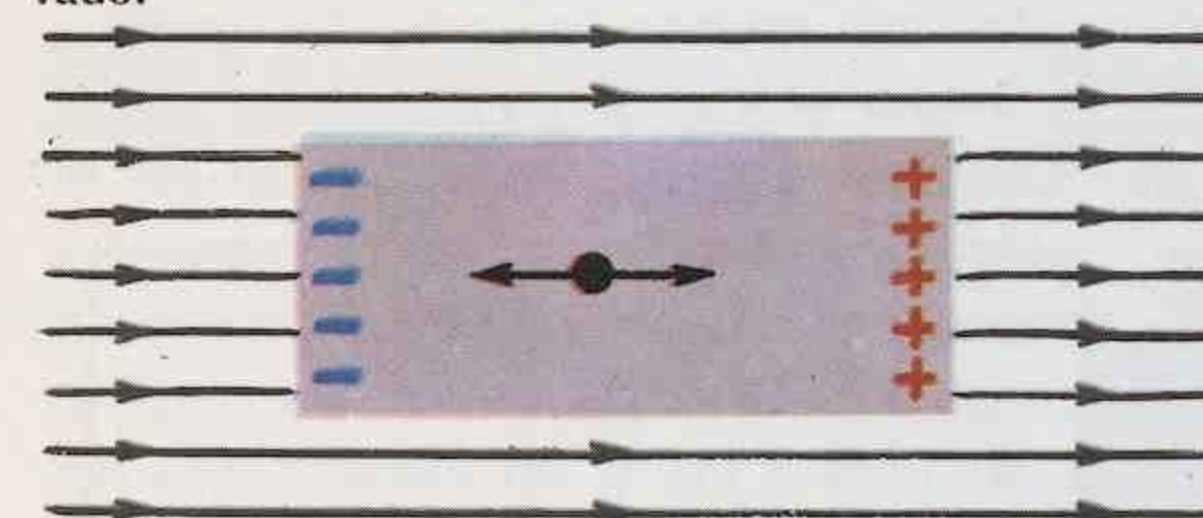
a la influencia de más de una carga, y la definición del campo eléctrico sería la misma, ya que en cada punto la distribución de cargas ejercería una fuerza determinada sobre la unidad positiva de carga. De esta manera, a cada punto del espacio corresponderá un vector



Interior de un metal. En rojo, iones positivos fijos; en azul, electrones libres.



En un metal al cual se aplica una diferencia de potencial, los electrones (cargas negativas) van hacia el punto de potencial más elevado.



Las cargas del conductor se distribuyen de manera que el campo eléctrico sea nulo en todos sus puntos.

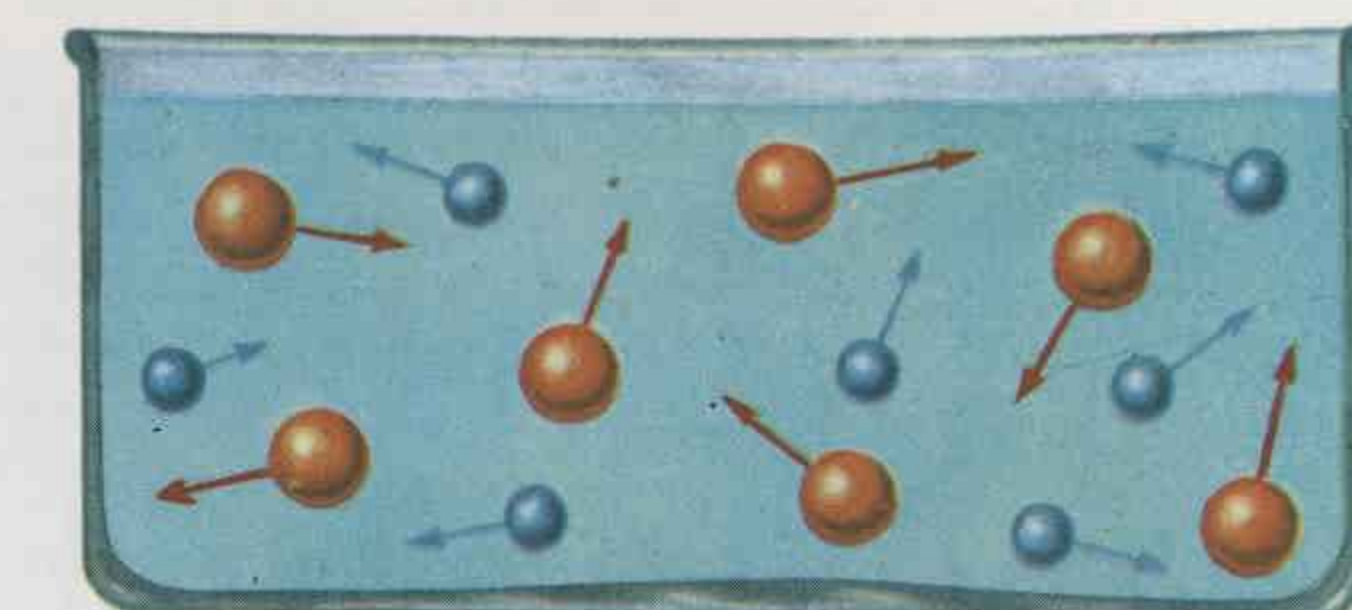


$$C = \frac{Q}{V}$$

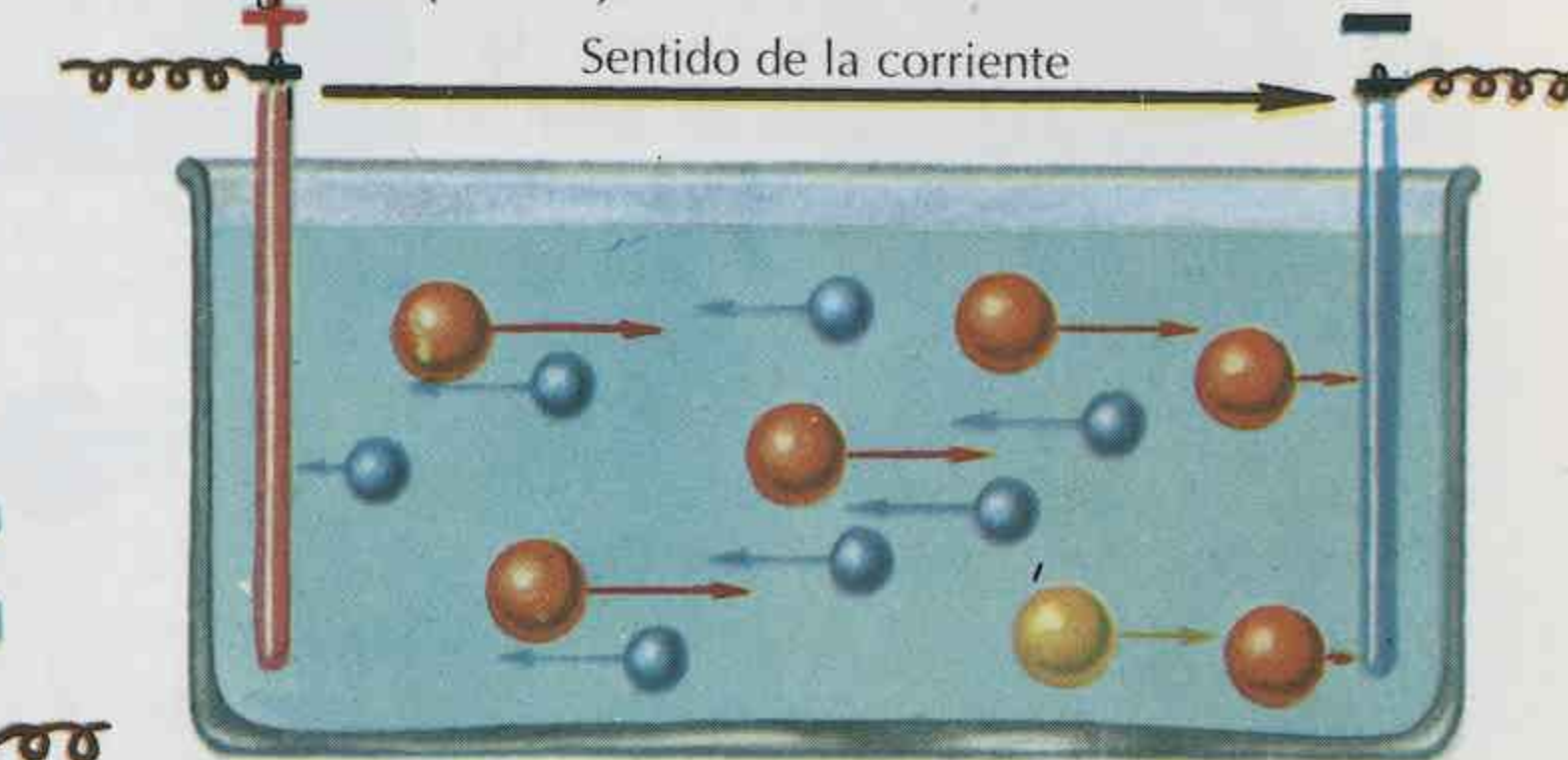
Para mantener la misma diferencia de potencial entre las armaduras de un condensador de doble capacidad que otro, se precisa doble carga.



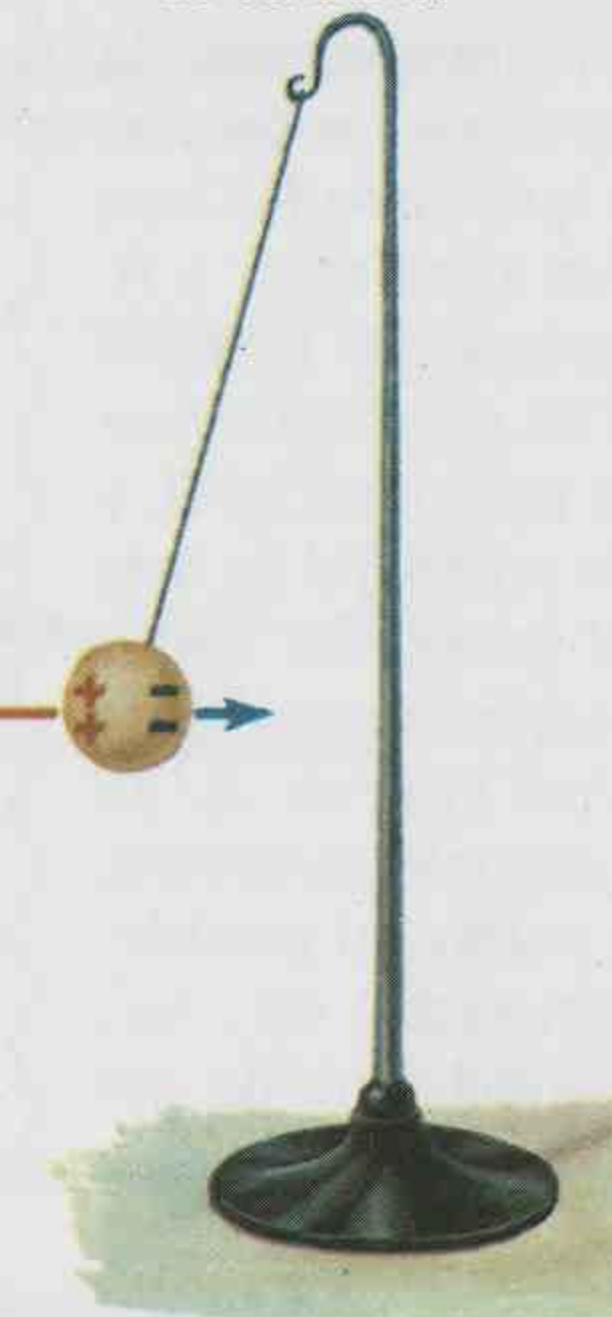
Si para llenar un recipiente se precisa doble cantidad de líquido que para llenar otro, su capacidad es doble que la de éste.



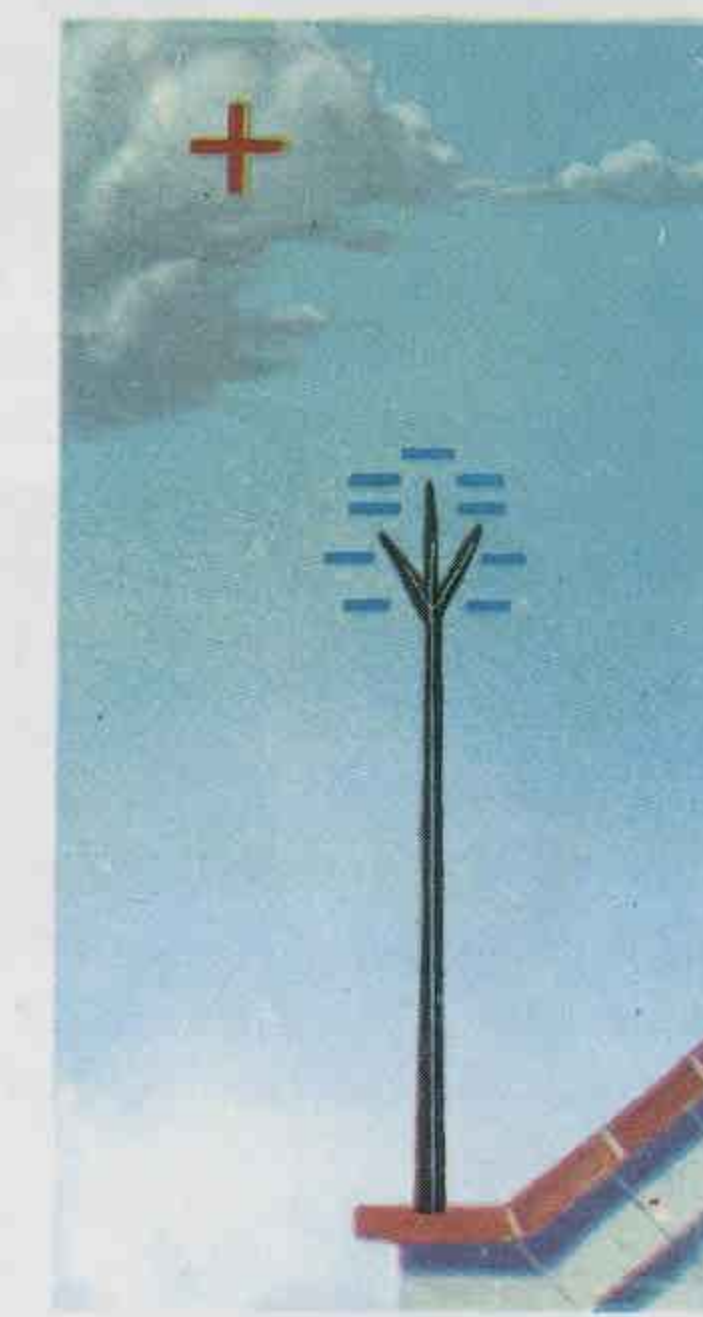
Solución electrolítica. Iones móviles: positivos (en rojo) y negativos (en azul).



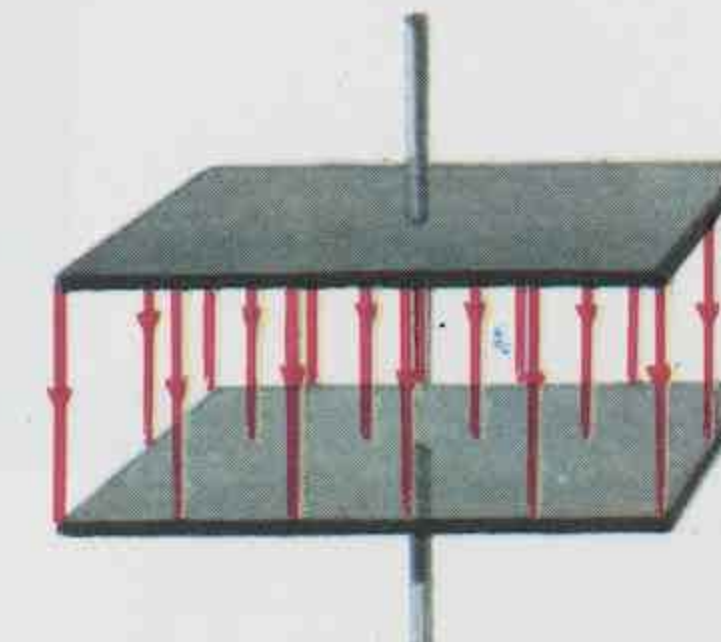
En una solución electrolítica, los iones positivos van hacia el punto de potencial más bajo, y los negativos, en sentido contrario.



Las cargas positivas inducidas están más próximas a la barra de ámbar que las negativas. La fuerza atractiva será, pues, mayor que la repulsiva.



Las cargas inducidas en el pararrayos por la nube, atraen a las de ésta.



Condensador plano.



Condensador cilíndrico.

CORRIENTE Y POTENCIA

Ya hemos dicho que cuando las cargas móviles de un conductor presentan un movimiento global, éste constituye una corriente eléctrica. Tomemos una sección de conductor y midamos la carga eléctrica que la atraviesa en unidad de tiempo en un sentido determinado. A esta cantidad se le da el nombre de *intensidad* de la corriente, y si la representamos por  $i$ , siendo  $q$  la carga que atraviesa dicha sección en un tiempo  $t$ , por la anterior definición será  $i = q/t$ . Se sobreentiende que, cuando las cargas móviles sean de ambos signos, la circulación de una carga positiva en un sentido equivale a la circulación en sentido contrario de una carga negativa. La unidad de intensidad de corriente es el *ampere* (A), intensidad de corriente que deja pasar una carga de 1C en un segundo.

Si tenemos aislados dos conductores, uno A, a potencial alto, y otro B, a potencial bajo, y los unimos mediante un hilo conductor, por éste circulará una corriente eléctrica de A a B hasta que se igualen los potenciales de ambos a causa de la pérdida de cargas de A y la ganancia de B. Para mantener permanentemente la corriente entre A y B precisaremos de un dispositivo, llamado *generador*, que tome las cargas que llegan a B y las vuelva a conducir a A. De esta manera A y B se mantendrán siempre en las mismas condiciones. Ello significa tomar una carga  $q$  con una energía potencial  $qV_B$ , y llevarla a A, donde su energía potencial es más elevada:  $qV_A$ , por lo cual el generador suministra a las cargas una energía que tomará fuera del sistema considerado. Una vez en A, la carga  $q$  volverá a pasar a B espontáneamente, buscando su mínima energía potencial posible. Allí vuelve a impulsarla el generador, etc. Así, pues, las corrientes permanentes han de ser cerradas.

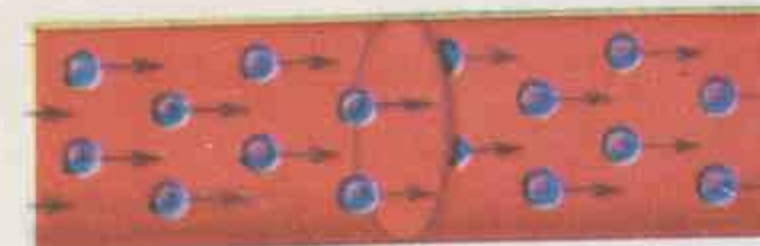
LEY DE OHM

Si entre A y B mantenemos una diferencia de potencial  $V$ , por el hilo que los une circula una corriente de intensidad  $i$ . Si duplicamos, triplicamos, etc., la diferencia de potencial, la intensidad se duplica, triplica, etc. Es decir, el cociente  $V/i$  permanece constante. Si cambiáramos el hilo de unión de A y B y repitiéramos la experiencia se llegaría a la misma conclusión que antes, con la diferencia de que el valor del cociente constante sería ahora otro. Esto nos indica que es una cantidad característica de hilo conductor, llamada *resistencia* del mismo, y, representándola por  $R$ , tendremos  $R = V/i$ . Su unidad de medida en el sistema internacional es el *ohm* ( $\Omega$ ), resistencia de un conductor que, al aplicar entre sus extremos una diferencia de potencial de 1 V, deja pasar una corriente de 1 A.

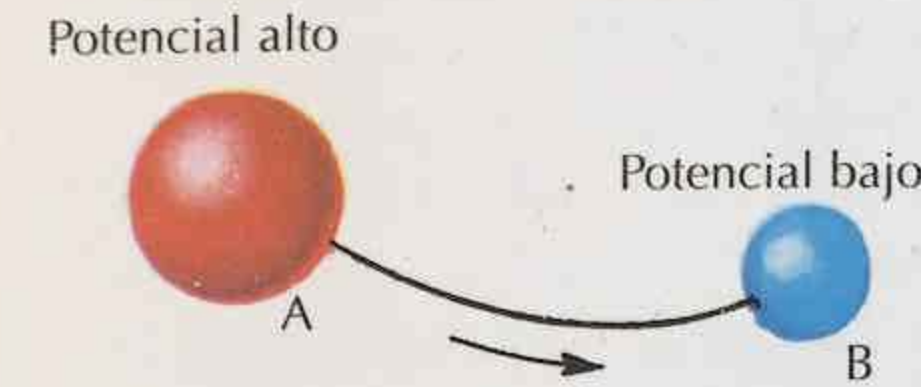
POTENCIA: LEY DE JOULE

Si el generador lleva una carga  $q$  desde B hasta A, le entrega una energía igual a  $q(V_A - V_B)$ , y, como las condiciones del circuito son siempre las mismas, cuando la carga  $q$  pase de A a B deberá perder esa misma energía. La energía pasa de la forma eléctrica a otra, que, en el caso apuntado, será calor desprendido en el hilo de unión. Llamando, para abreviar,  $V$  a  $V_A - V_B$ , tenemos que la energía  $W$  disipada en forma de calor será  $W = qV$ , y como  $i = q/t$ , o sea,  $q = it$ , será  $W = Vit$ , y, en virtud de la ley de Ohm,  $i = V/R$ , o sea,  $V = iR$ , donde queda  $W = i^2Rt$ , que, expresando  $i$  en ampere,  $R$  en ohm y  $t$  en segundos, la energía disipada vendrá dada en joule. La energía en unidad de tiempo es la potencia. Como  $P = W/t$ , teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto resulta que la potencia vendrá dada por cualquiera de las expresiones equivalentes:

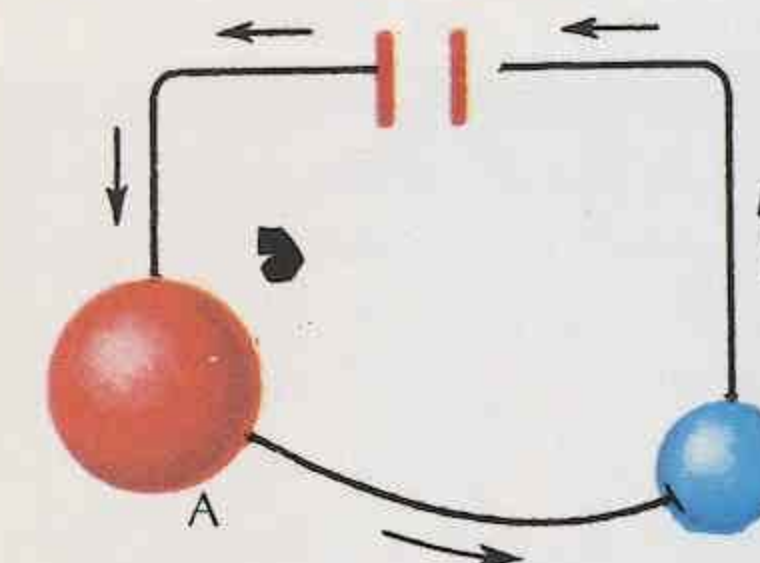
$$P = W/t = Vq/t = Vi = V^2/R = i^2R.$$



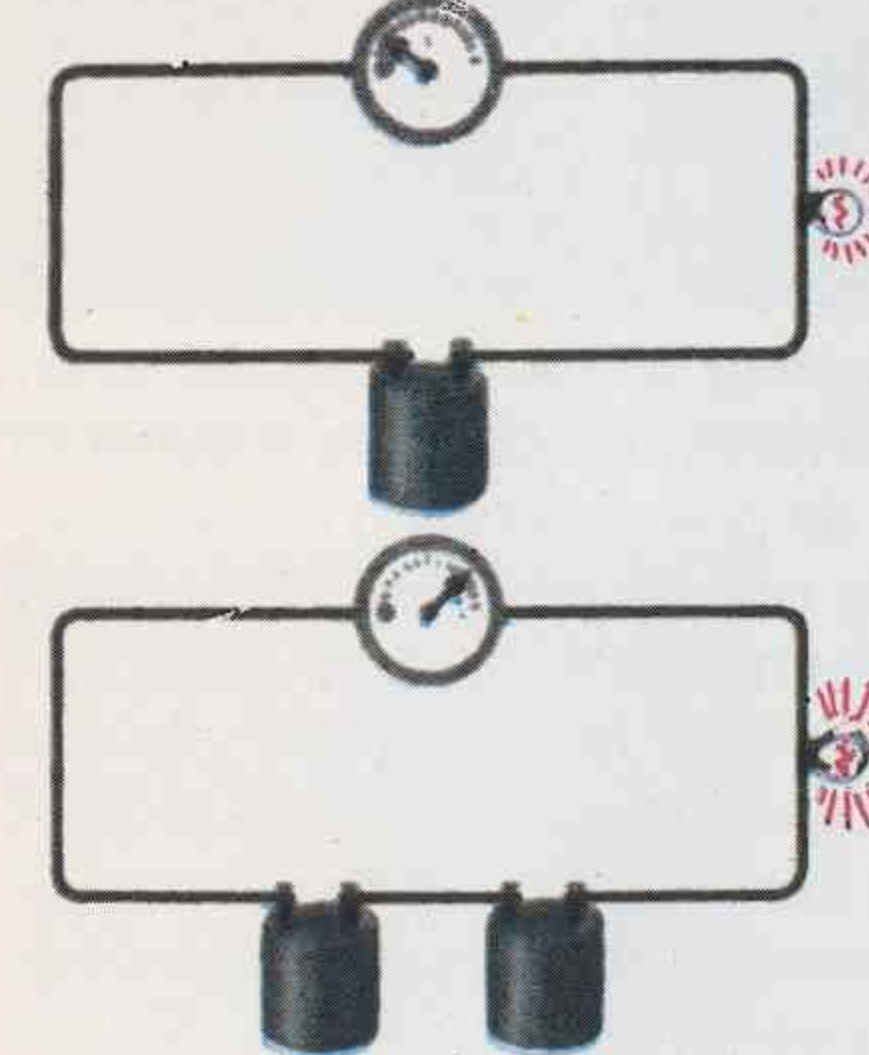
La carga total que atraviesa en un segundo la sección del conductor es la intensidad de la corriente.



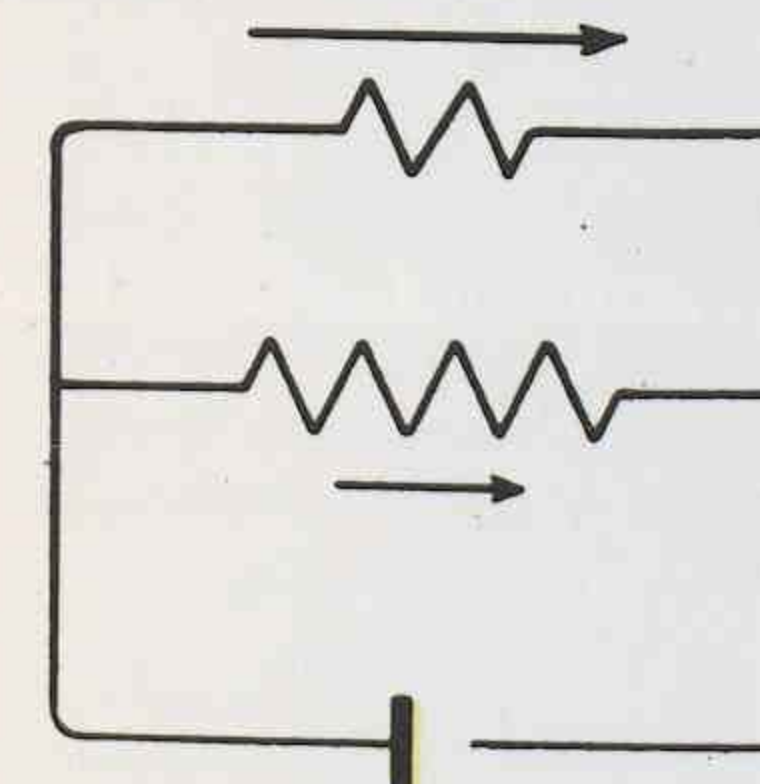
La corriente pasará de A a B hasta que se igualen sus potenciales.



Diferencia de potencial invariable por medio de un generador de corriente.



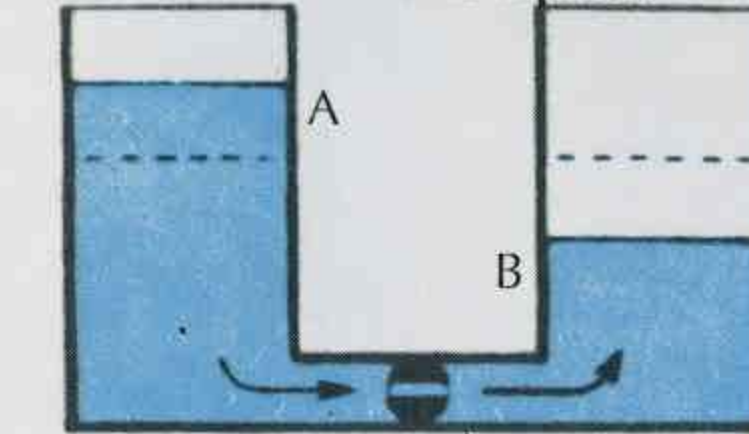
Aumentando la diferencia de potencial aumenta la intensidad de la corriente.



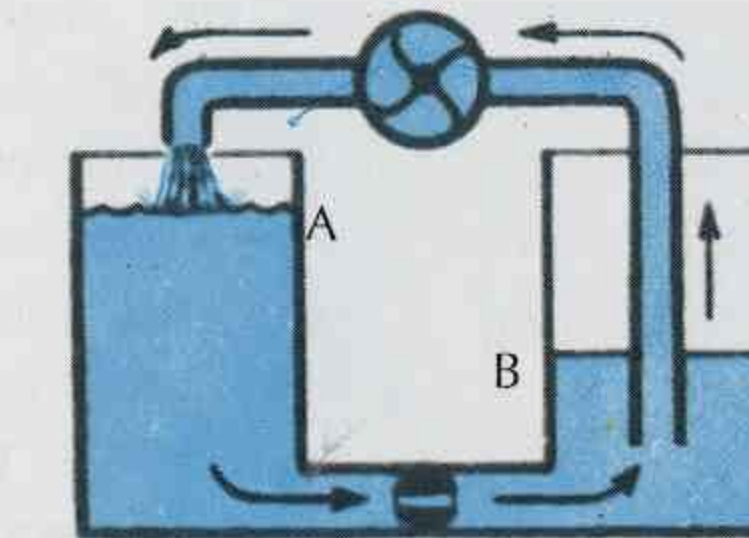
A doble resistencia de un conductor, intensidad reducida a la mitad.



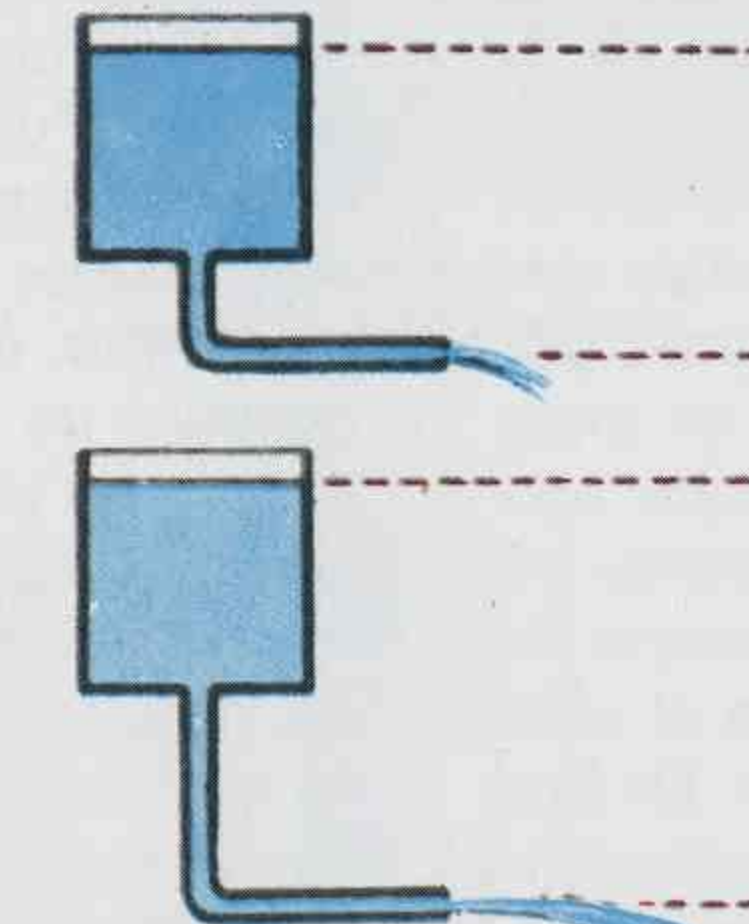
La cantidad de agua que por segundo atraviesa una sección de la tubería mide la corriente líquida.



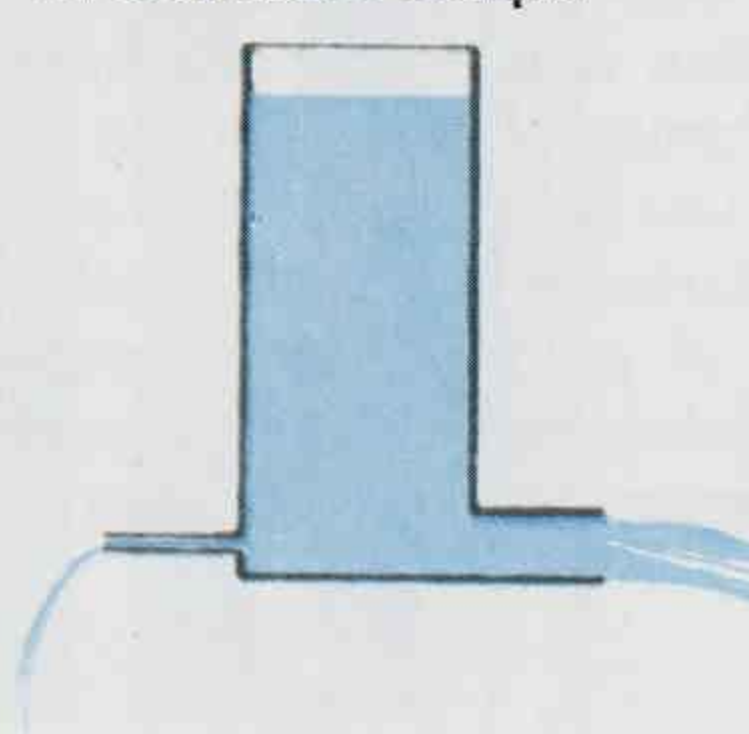
El agua pasará de A a B hasta que se igualen sus niveles.



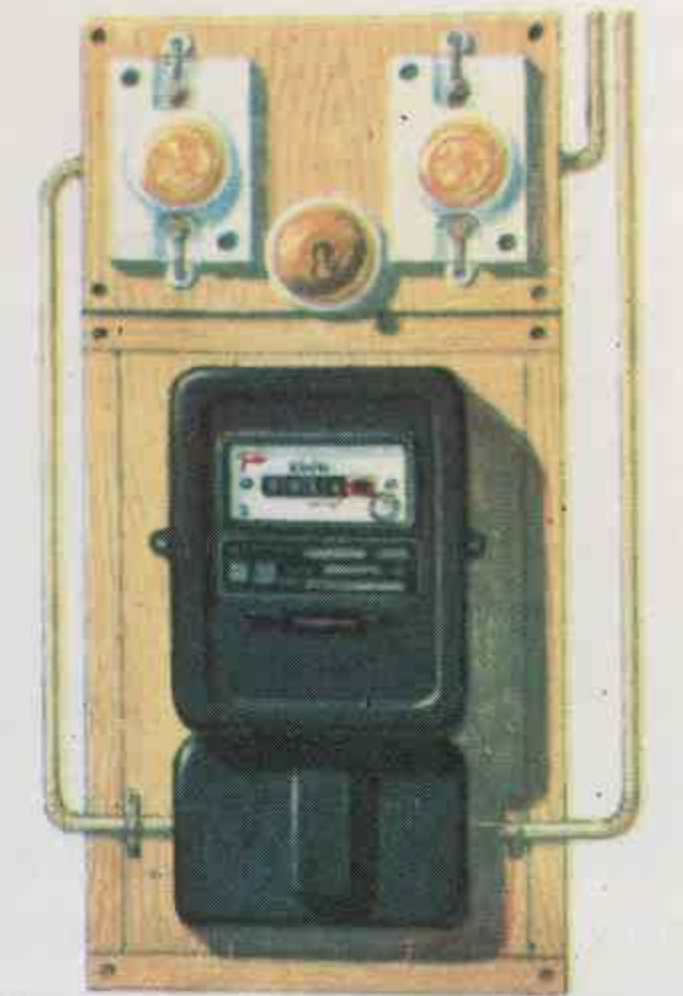
Diferencia de nivel invariable por medio de una bomba hidráulica.



Aumentando el desnivel aumenta la cantidad del líquido circulante en la unidad de tiempo.



La circulación es mayor en el tubo grande por ofrecer menor resistencia.



Cuando la intensidad de la corriente es excesiva, el calor desarrollado funde los fusibles interrumpiendo la corriente.



Diversos aprovechamientos domésticos del efecto Joule.



MAGNETISMO

La ley de Coulomb señala la fuerza que se ejerce entre dos cargas eléctricas puntuales que mantienen invariable su separación. Ahora bien, si dichas cargas se movieran una respecto a otra, observaríamos que a la fuerza dada por la ley de Coulomb se superpone otra que se debe, indudablemente, al movimiento de las cargas, ya que desaparece al suprimirse éste. A dicho tipo de fuerzas se les da el nombre de *fuerzas magnéticas*.

CAMPO MAGNÉTICO

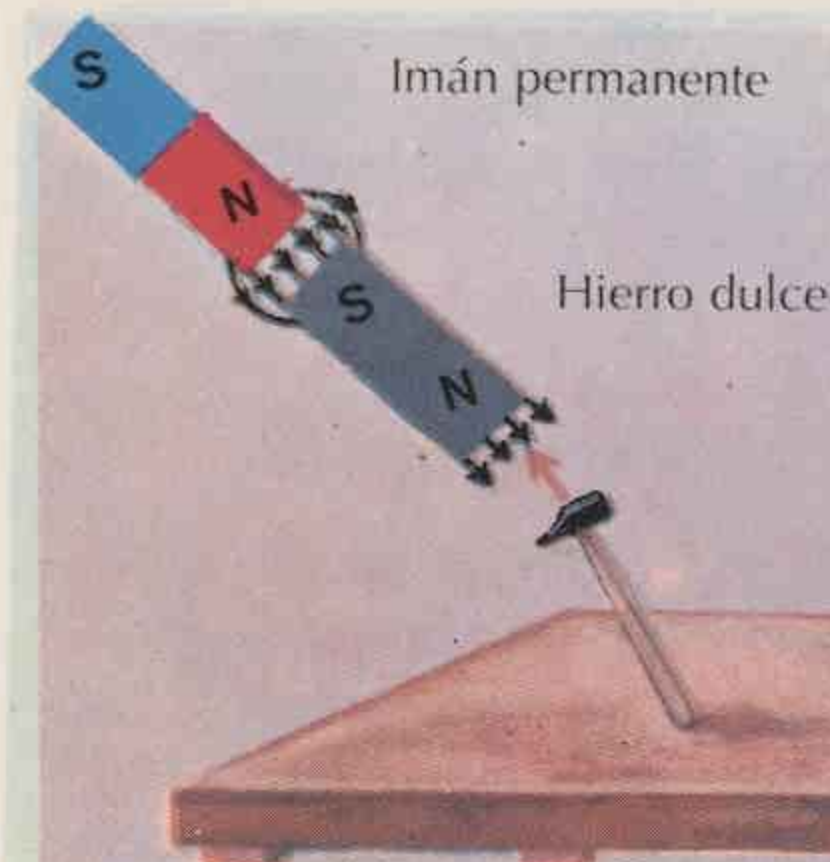
Para estudiar la fuerza que sobre una carga ejercen otras cargas inmóviles, determinábamos el campo eléctrico  $E$  que éstas crean en el punto ocupado por la otra carga  $q$ , y la fuerza era  $F = qE$ . Ahora vamos a definir un *campo magnético*  $B$  creado por un sistema de cargas móviles, el cual será el causante de la fuerza que ejerza sobre otra carga eléctrica en movimiento. La definición, no demasiado sencilla, nos obliga a dar un pequeño rodeo.

En la naturaleza se encuentra un mineral llamado *magnetita*, o piedra imán, que tiene la propiedad de atraer el hierro, el cobalto, el níquel y ciertas aleaciones. Un pedazo de hierro dulce puesto en presencia de la magnetita adquiere también dicha propiedad, es decir, se convierte en *imán*, si bien al separarlo de la magnetita deja de comportarse como tal. El acero templado también actúa como imán en presencia de otro, con la particularidad de que al separarlos conserva su facultad de atraer, por lo que se dice que se ha convertido en *imán permanente*. La brújula no es más que una aguja imanada que puede girar libremente en torno a su centro y se orienta, en ausencia de imanes, con un extremo dirigido hacia el polo Norte de la Tierra y el otro hacia el Sur. Dichos extremos de la brújula reciben, respectivamente, los nombres de polos norte y sur de la brújula. Una barra imanada se comportaría en forma análoga a la brújula, por lo que todo imán tendrá un polo norte y un polo sur, que son los puntos en donde se manifiestan más intensas las fuerzas atractivas. Si acercamos el polo norte de un imán al polo norte de una brújula vemos que se repelen violentamente, mientras que si lo que se aproxima al polo norte es un polo sur, la fuerza es igualmente violenta, pero atractiva. Esto puede resumirse

diciendo que *polos de igual nombre se repelen, mientras que polos de nombre distinto se atraen*. En toda región del espacio en que la brújula se halle sometida a fuerzas se considera que existe un *campo magnético*. Pero cuando no existan otros imanes, como la brújula se encuentra sometida a fuerzas que la orientan, se dice que se halla en el *campo magnético terrestre*.

Cuando a la brújula se le aproxima otro imán, se desvía de la posición debida al campo magnético terrestre, porque ahora el campo magnético existente es la resultante del terrestre y del creado por el imán. Habrá que sumar vectorialmente los dos campos, y el vector que se forme tendrá la dirección que adopte la brújula. De esta manera, para explorar un campo magnético, bastará ir colocando una brújula en sus distintos puntos, y así sabremos la dirección de dicho campo en cada uno de ellos, pudiendo, de esta manera, trazar las líneas de fuerza del mismo. Colocando una cartulina sobre un imán y espolvoreando limaduras de hierro sobre ella, dichas limaduras se convierten, por acción del campo magnético del imán, en pequeñas agujas imanadas que se orientan según el campo magnético, definiendo así las líneas de fuerza. El conjunto de éstas constituye lo que se llama *espectro magnético* del imán. El sentido que se asigna a las líneas de fuerza parte del polo norte y lleva al polo sur. Puede parecer que dichos polos son los únicos puntos en que se concentran las propiedades magnéticas del imán, pero, si lo rompemos, observaremos que cada fragmento contiene un par de polos, también norte y sur, lo que nos indica que las propiedades magnéticas se distribuyen por toda la materia. *Es imposible conseguir un polo magnético aislado*. Incluso al llegar a la partícula más pequeña que conserve aún las propiedades físicas de la materia que constituye el imán existe el par de polos. Pronto veremos que esto se debe a que las propiedades magnéticas las produce el movimiento de las cargas eléctricas existentes en la materia. El primer indicio que se tuvo de ello fue el experimento de Oersted. Colocando un conductor encima de una brújula y paralelo a la aguja imanada, al hacer circular la corriente se vio que la aguja magnética se ponía perpendicular a la corriente eléctrica, signo inequívoco de que la corriente creaba un campo magnético que le era perpendicular.

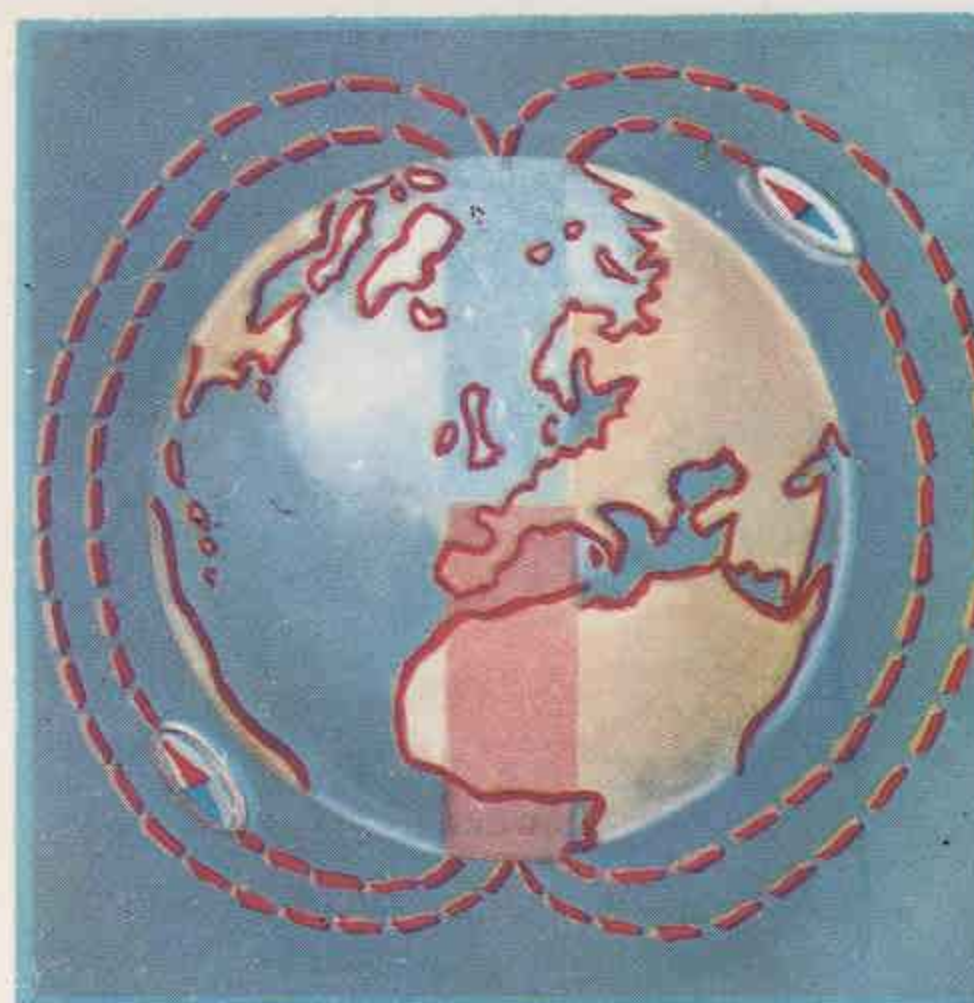
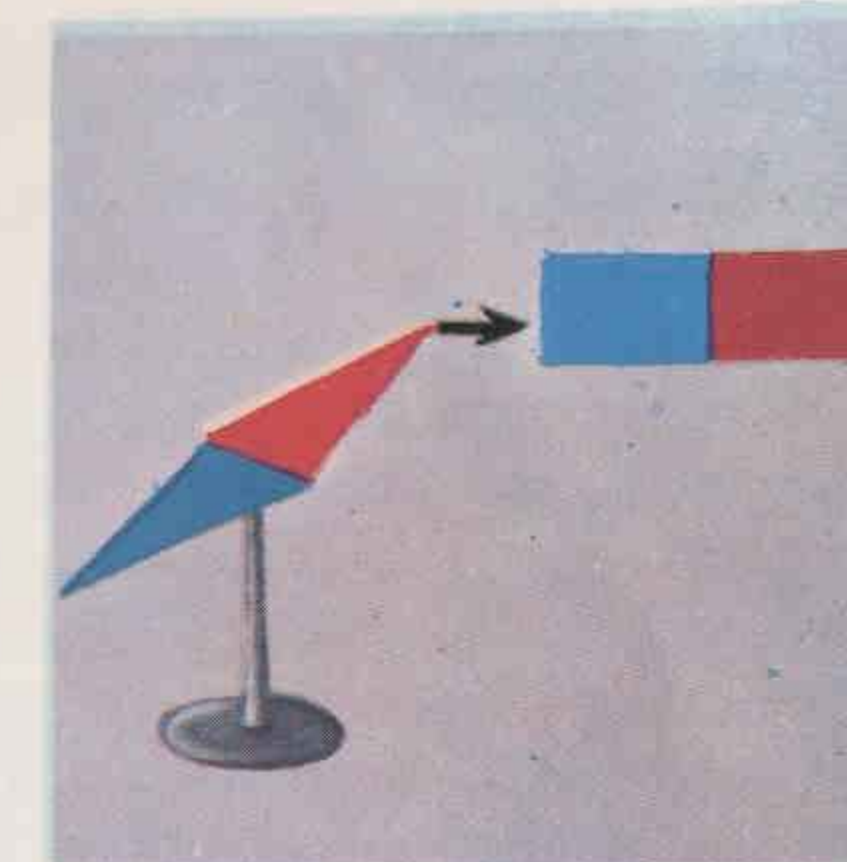
(Continúa en la TARJETA C/7)



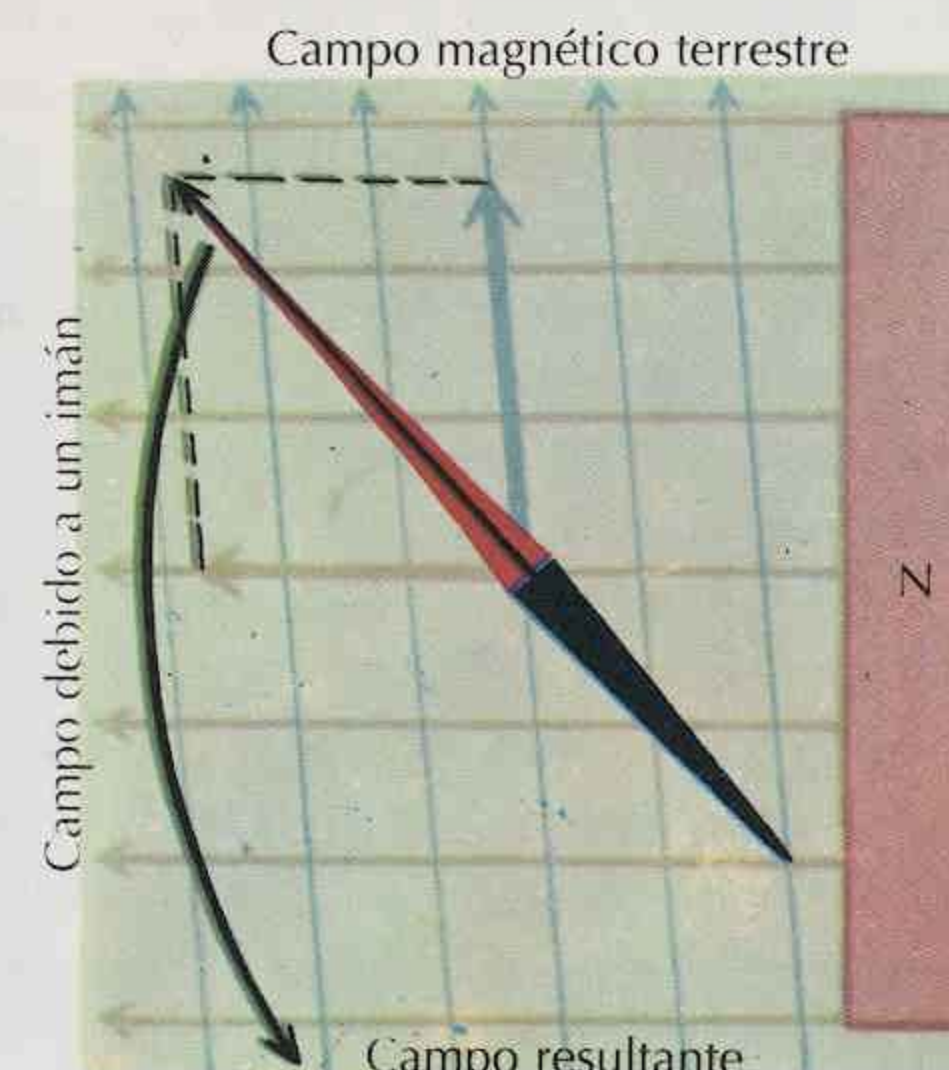
Un pedazo de hierro dulce en presencia de un imán, se convierte en otro imán.



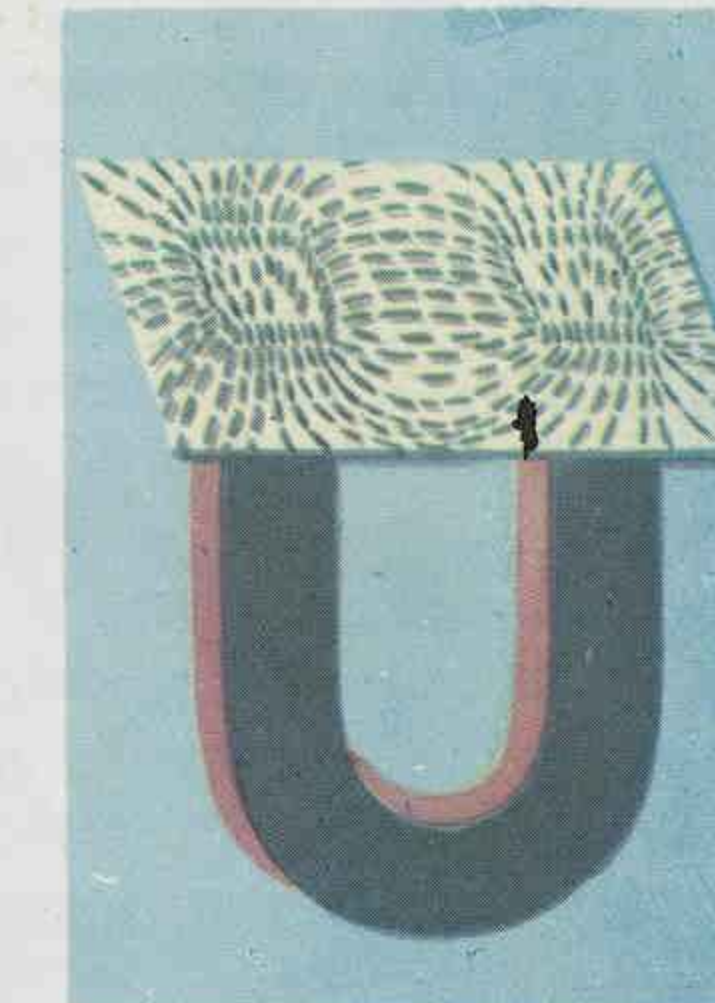
Polos de igual nombre se repelen y, por el contrario, polos de nombre distinto se atraen.



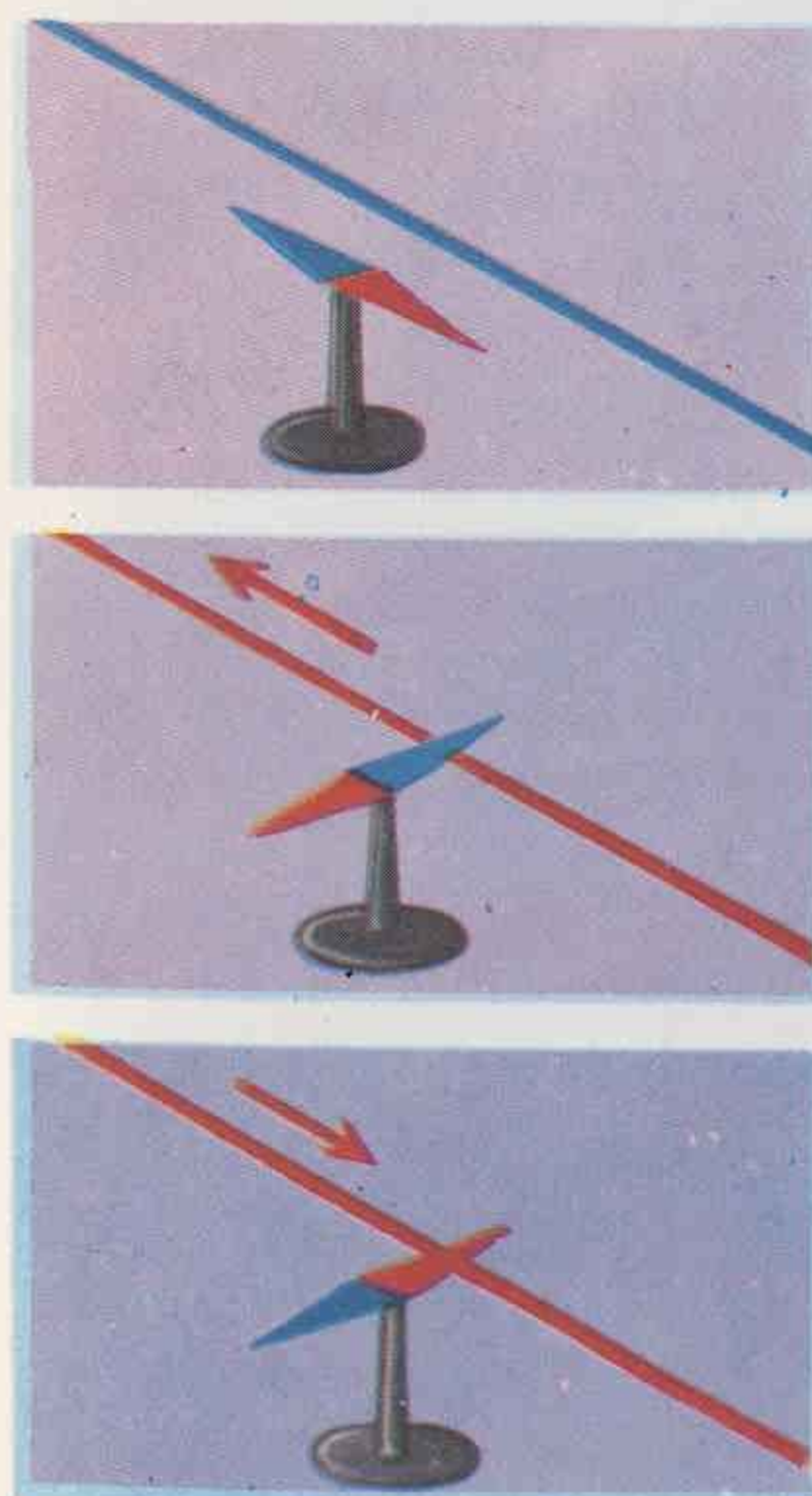
La Tierra se comporta como un gigantesco imán cuyo polo S está en el Norte geográfico.



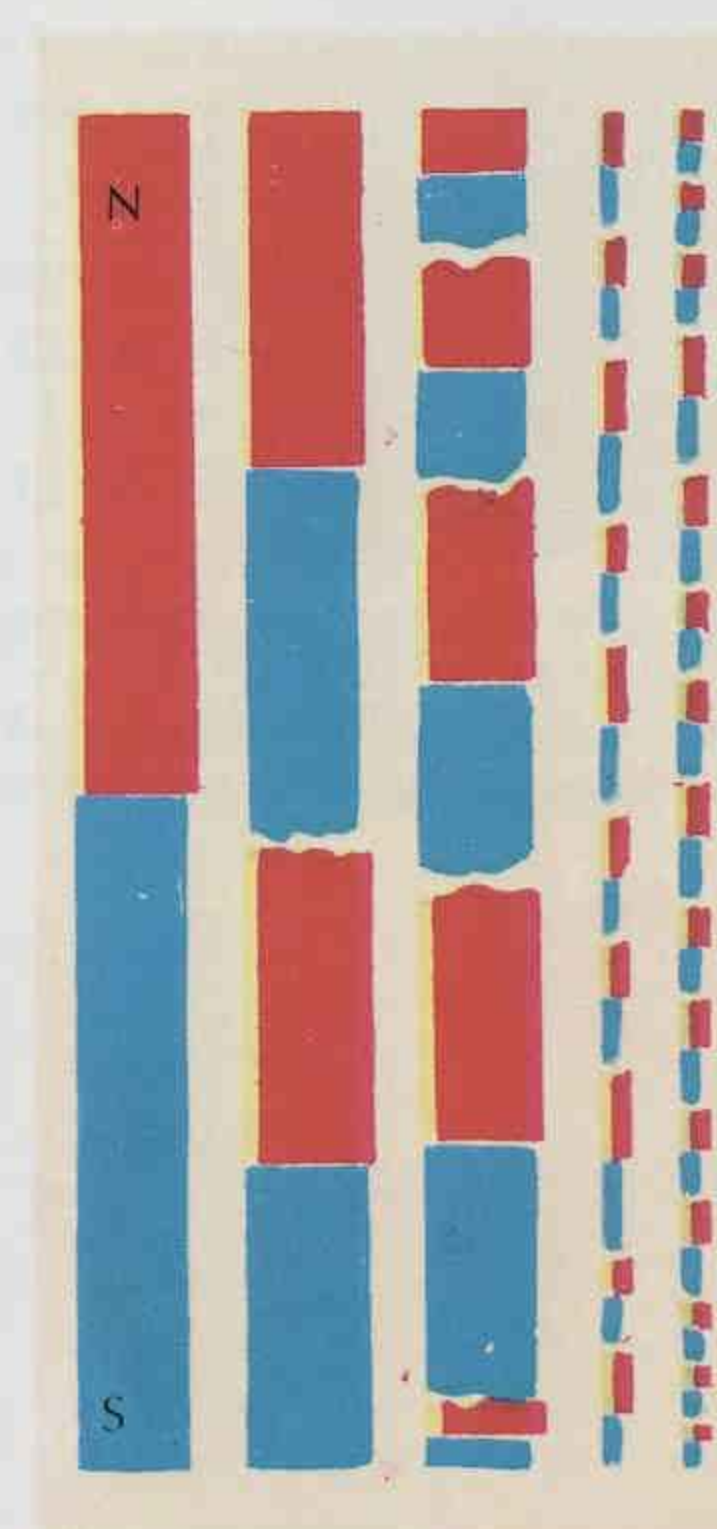
La brújula se orienta según el campo magnético total resultante.



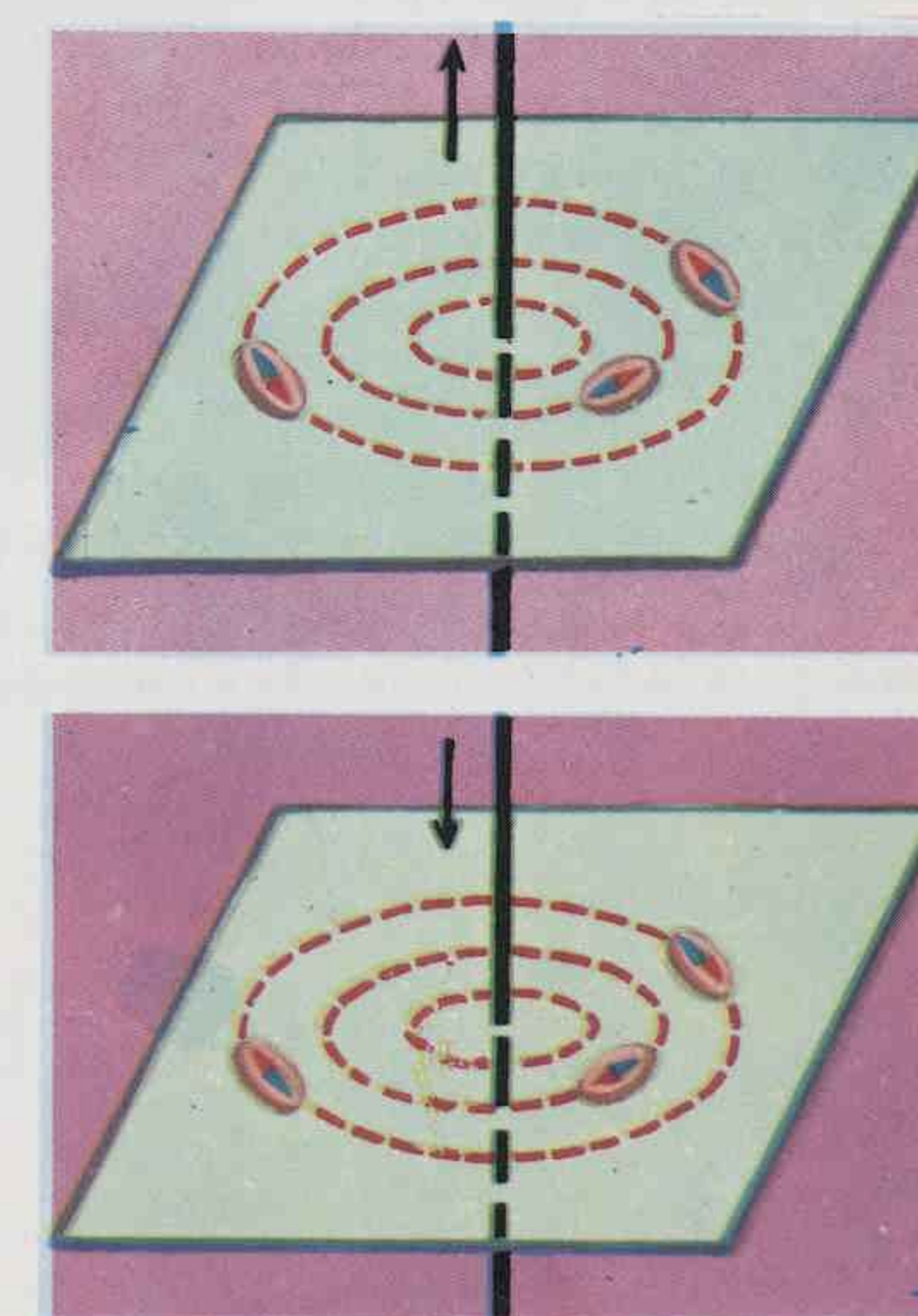
Espectro magnético de un imán.



Experimento de Oersted. La brújula se orienta perpendicularmente a la corriente



Al romper un imán, los fragmentos se convierten en nuevos imanes.



Líneas de fuerza del campo magnético creado por una corriente recta indefinida.

FUERZAS MAGNÉTICAS

FUERZA MAGNÉTICA EJERCIDA SOBRE UNA CORRIENTE RECTILÍNEA

Sea un tramo rectilíneo de un conductor orientado perpendicularmente a un campo magnético. El caso, más general, de que el campo magnético no fuera perpendicular al tramo se resolverá análogamente, sin más que tomar la componente  $B \perp$  de la inducción magnética perpendicular al tramo, en vez de  $B$ . La corriente eléctrica está constituida por cargas en movimiento, sobre cada una de las cuales el campo magnético ejerce una fuerza  $F = qvB$  perpendicular al campo y a la corriente. Si el conductor es metálico, las cargas móviles serán electrones, por lo cual habrá que sustituir  $q$  por  $-e$ , si bien el signo  $-$  sólo significa que la fuerza es de sentido opuesto al que tendría si la carga fuera positiva y se moviera en el mismo sentido. Para hallar la fuerza que se ejerce sobre el tramo, deberemos contar previamente el número de electrones móviles existente en el mismo. Si por unidad de volumen hay  $n$ , es  $L$  la longitud del tramo y  $A$  el área de su sección recta, el volumen será  $L \cdot A$  y el número de electrones libres contenidos en él  $n \cdot L \cdot A$ . Como cada uno de ellos recibe una fuerza  $F = evB$ , la fuerza resultante será  $nLAevB$ , siendo  $v$  la velocidad media de los electrones. Ahora bien, el tiempo que tarda un electrón en recorrer la longitud  $L$  es  $T = L/v$ . Los  $nLA$  electrones contenidos en el tramo habrán salido por uno de sus extremos en ese tiempo, lo cual significa que, en un tiempo  $t = L/v$ , una sección del conductor ha sido atravesada por una carga  $nLAe$ ; luego, en un segundo, la carga que ha atravesado la sección será

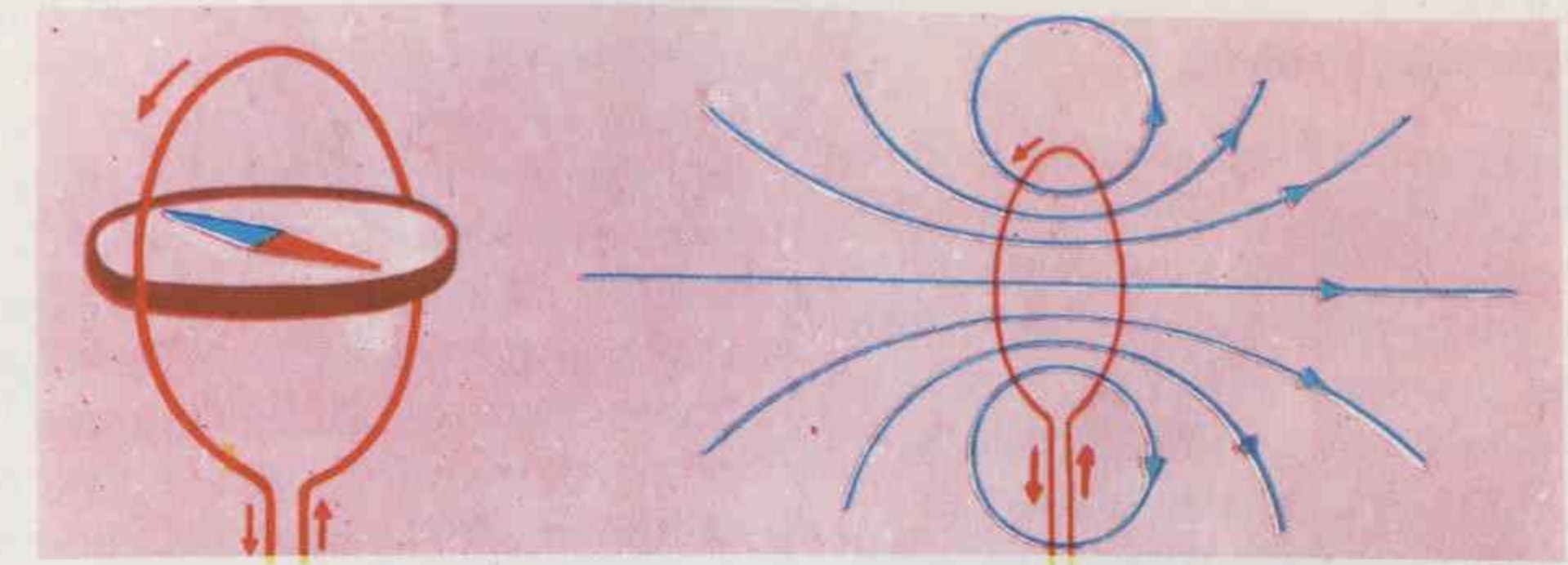
$$I = \frac{nLAe}{L/v} = nAev,$$

que indicará la intensidad de la corriente (véase definición de intensidad). Sustituyendo  $nAev = I$  en la expresión de la fuerza, tenemos, para la fuerza magnética que actúa sobre

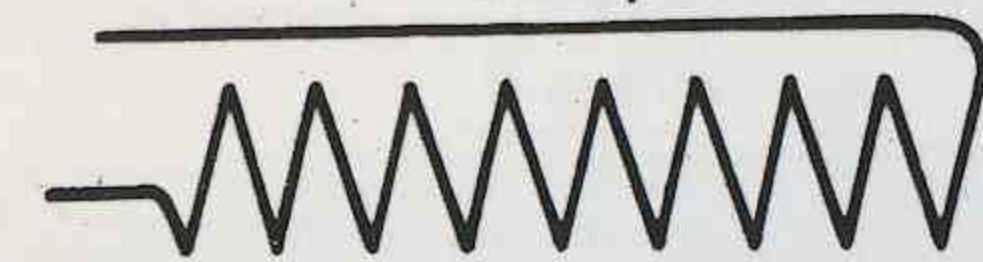
un tramo rectilíneo de longitud  $L$  de conductor recorrido por una corriente de intensidad  $I$ ,  $F = nLAevB = BIL$ . Esta fuerza es perpendicular al tramo y al campo, y su sentido viene dado por la regla de la mano izquierda (véase figura adjunta).

FUERZA MAGNÉTICA EJERCIDA SOBRE UNA ESPIRA Y SOBRE UN SOLENOIDE

Consideremos una espira rectangular, de lados de longitud  $a$  y  $b$ , situada en un campo magnético perpendicular a los lados de longitud  $a$ . Las fuerzas que se ejercen sobre estos lados tendrán por módulo  $Bla$  y constituyen un par de fuerzas de momento  $Bla b \sin \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo que forma, con la dirección del campo  $B$ , el sentido positivo de la normal a la espira, entendiendo por tal el que indica el avance de un sacacorchos que girase en el mismo sentido que la corriente por la espira. Las fuerzas que se ejercen sobre los lados de longitud  $b$  se anulan entre sí. La espira, pues, queda sometida a un par de fuerzas de momento  $BIA \sin \theta$ , donde  $A = ab$  es el área encerrada por la espira. Sobre el sentido positivo de la normal a la espira se considera un vector  $M$  de módulo igual a  $IA$ , al que se da el nombre de momento magnético de la espira, y el par de fuerzas que se ejerce sobre la espira tendrá un momento igual a  $MB \sin \theta$ . Puede demostrarse que una espira de forma cualquiera situada en un campo magnético se encuentra sometida a un par de fuerzas que tienden a hacerla girar alrededor de un eje perpendicular al campo y a la normal a la espira cuyo momento vale  $MB \sin \theta$ , siendo  $M = IA$ . Como un solenoide consta de un número  $N$  de espiras paralelas recorridas todas por la misma corriente, la resultante de todos los pares será un par  $N$  veces mayor, llamándose momento magnético del solenoide al producto de la intensidad de la corriente  $I$  por el área total  $NA$  encerrada por todas las espiras. También el solenoide se halla sometido a un par de momento  $MB \sin \theta$ , siendo  $M$  el momento magnético del solenoide.



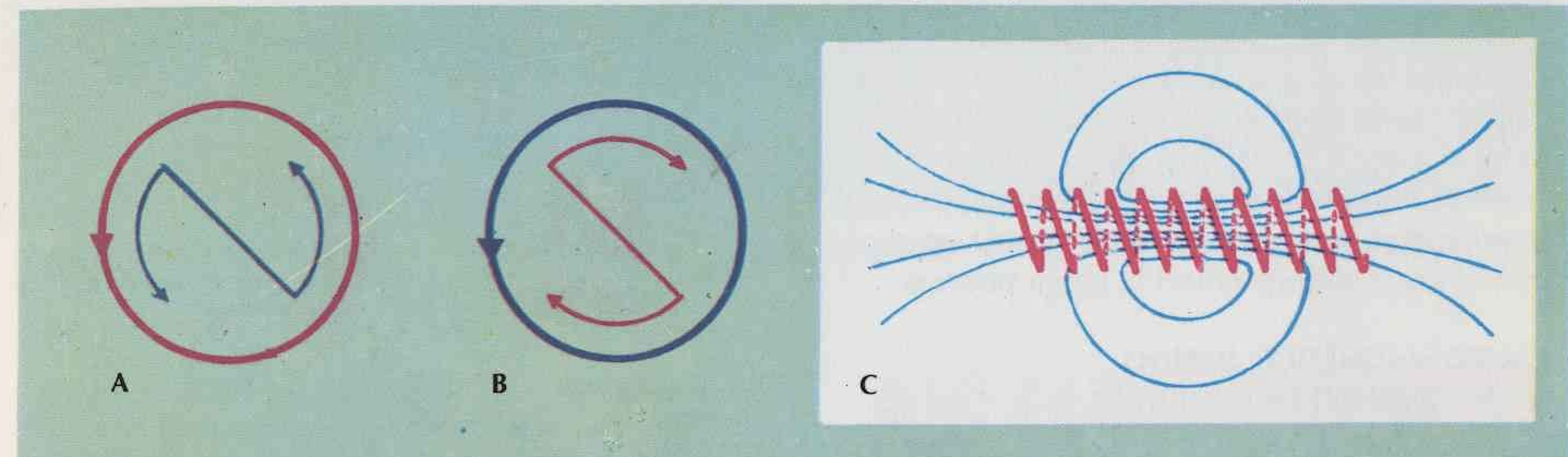
En el centro de una corriente circular, el campo está dirigido según el eje. En A. campo creado por una corriente circular.



Representación esquemática de un solenoide.



Un solenoide puede ejercer la misma acción que un imán.



A: El polo N del solenoide se halla en el extremo por el cual circula la corriente en el sentido indicado (vista desde fuera). B: Polo S del mismo. C: Líneas de fuerza de un solenoide.

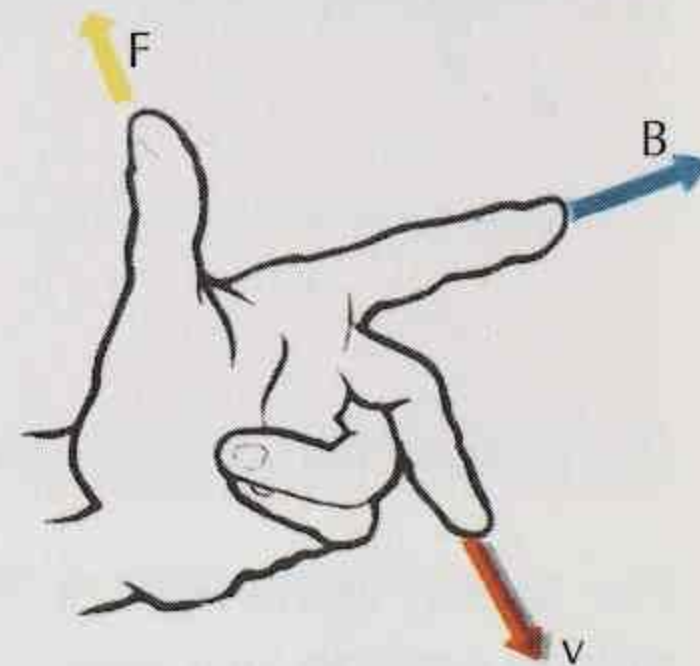
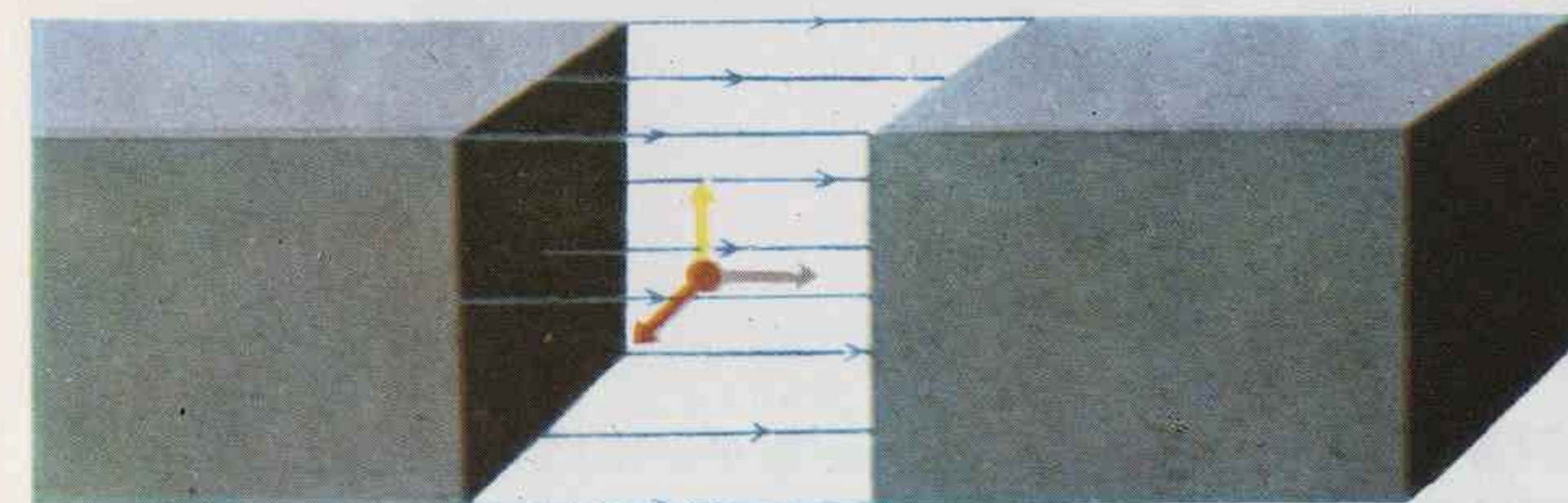
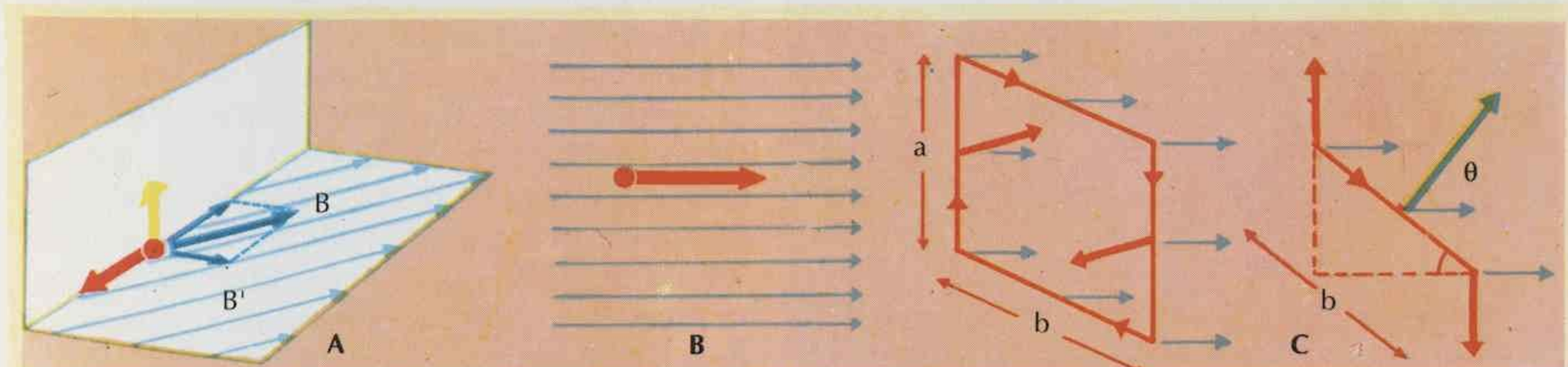


Fig. izquierda: Una carga que se mueva perpendicularmente al campo magnético está sometida a una fuerza perpendicular al campo y a la velocidad de módulo  $F = qvB$ . Fig. derecha: La fuerza que se ejerce sobre una carga móvil en un campo magnético tiene el sentido del pulgar de la mano izquierda, cuyo índice señala el sentido del campo; el dedo medio está dirigido en el sentido del movimiento de la carga, si es positiva, o en el opuesto, si es negativa.



En A: Si la carga no se mueve perpendicularmente al campo,  $F = qvB'$ . En B: Una carga que se mueve paralelamente a un campo magnético no se halla sometida a fuerza alguna ( $B' = 0$ ). En C: Acción de un campo magnético sobre una espira.

CAMPOS MAGNÉTICOS

CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA CARGA MÓVIL

Se ha mencionado ya que las corrientes eléctricas crean campos magnéticos. Dichas corrientes están constituidas por cargas en movimiento, por lo que podemos imaginar que este movimiento es el que crea el campo magnético. La prueba más clara de ello la constituye el experimento de Rowland (véase figura).

Puede admitirse que, cuando una carga  $q$  se mueve con velocidad  $v$ , en un punto a distancia  $r$  de la carga se crea inducción magnética de valor:

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \cdot v \text{ sen } \theta}{r^2}$$

donde  $\theta$  es el ángulo que forma el vector velocidad  $v$  con la dirección que une la carga con el punto en que se calcula la inducción, y  $\mu_0$  es una constante llamada permeabilidad magnética del vacío que, en el sistema internacional, toma el valor  $4\pi \cdot 10^{-7}$ . La dirección del campo es normal al plano determinado por el punto y la velocidad, y su sentido, el de giro de un sacacorchos que avance como la carga positiva.

CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO A UN ELEMENTO DE CORRIENTE

El postulado anterior nos permite determinar la contribución al campo magnético creado por una corriente de cada uno de los elementos en

que podemos considerarla descompuesta. Es decir, para calcular el campo creado por una corriente que circula por un circuito, descompondremos éste en tramos muy cortos, calcularemos el campo originado por cada uno de ellos en un punto determinado y, componiendo vectorialmente todos ellos, tendremos el campo creado por la corriente total. Veamos cómo podemos hallar el campo  $dB$  debido a un tramo muy corto de longitud  $dl$ . Si es  $n$  el número de electrones libres por unidad de volumen del conductor, en el tramo corto habrá  $n \cdot A \cdot dl$ . Cada uno de ellos crea en un punto a distancia  $r$  un campo

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{ev \text{ sen } \theta}{r^2}$$

y, como todos se hallan prácticamente a la misma distancia, el campo que entre todos crearán en el punto a distancia  $r$  será

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{nA dl \cdot ev \text{ sen } \theta}{r^2}$$

pero como ya vimos que la intensidad de la corriente es  $I = nAev$ , la anterior expresión queda en la forma

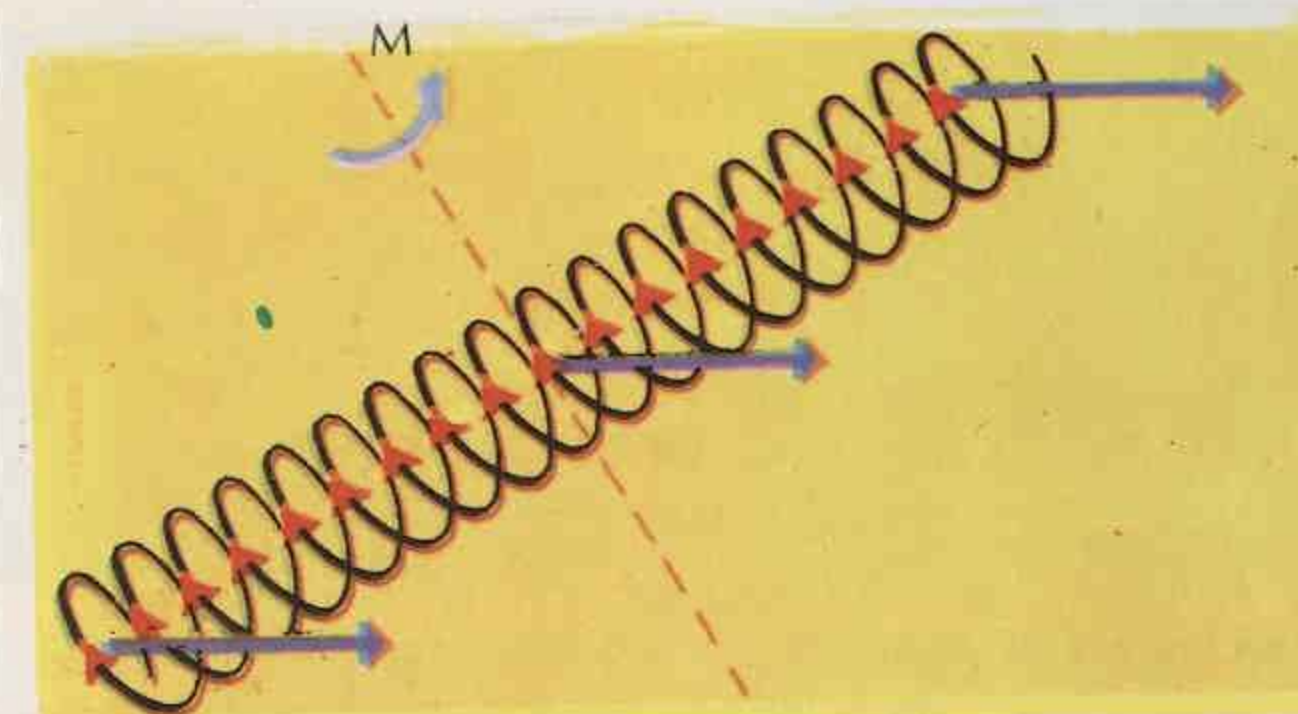
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \text{ sen } \theta}{r^2}$$

La inducción magnética estará dirigida, claro está, normal al plano determinado por el punto y el elemento de corriente, y en el sentido del giro de un sacacorchos que avance en el mismo sentido de la corriente.

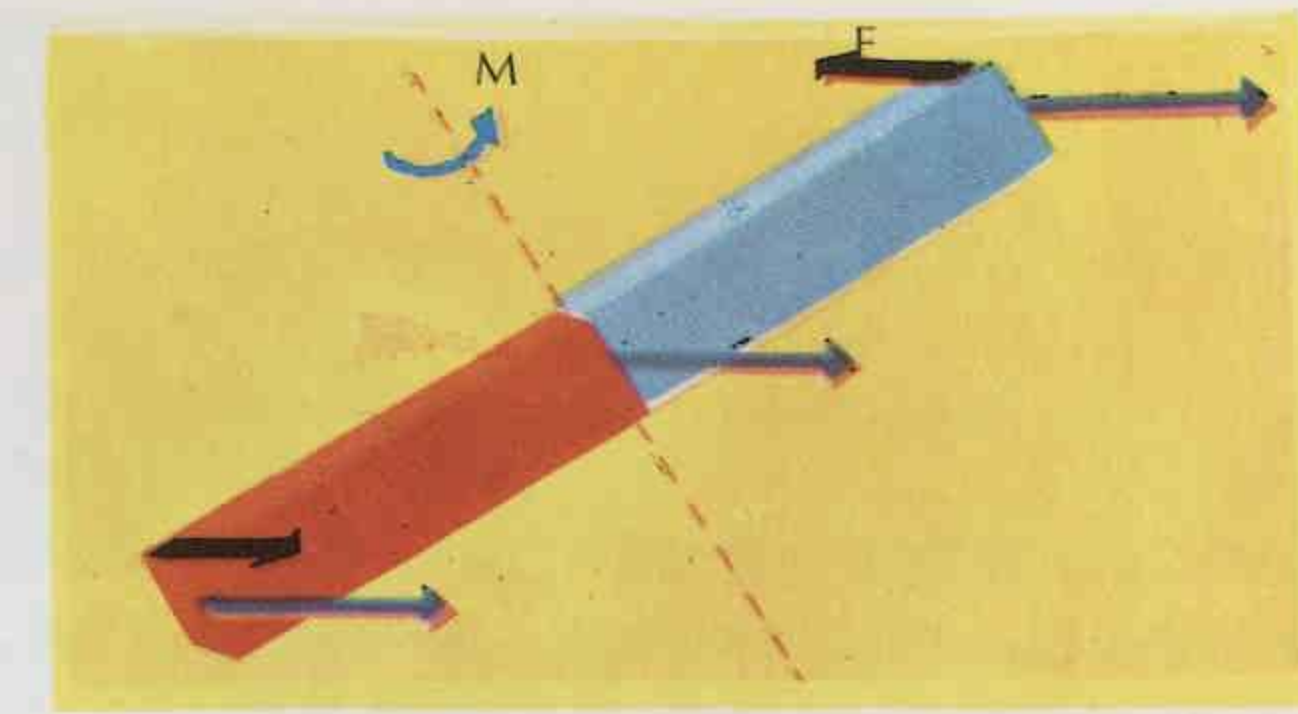
(Continuación de la TARJETA C/5)

Por tanto, las líneas de fuerza del campo magnético creado por una corriente recta serán circunferencias situadas en planos perpendiculares a la corriente y centradas en la misma. Veamos qué campo crea una corriente eléctrica circular: si en el centro de una espira circular colocamos una brújula, vemos que al pasar por la espira una corriente intensa la brújula se orienta según el eje de dicha espira. Si en vez de una sola espira se dispone de varias iguales y paralelas recorridas todas ellas por la misma corriente, tenemos un solenoide o bobina, y su campo es el indicado en la figura. Como puede verse, es igual al campo creado por un imán de igual forma, por lo que ambos podrán producir efectos análogos. Consideremos, pues, que en una región del espacio exista un campo mag-

nético. Si por un punto  $P$  de esta región pasa una carga positiva  $q$  con una velocidad  $v$ , observaremos que se halla sometida a una fuerza perpendicular a su velocidad y que depende de la dirección de ésta. Así, si la velocidad tiene la dirección de la línea de fuerza que pasa por dicho punto, la fuerza es nula; y si la velocidad es perpendicular a dicha línea de fuerza, la fuerza es máxima, perpendicular a ambas y proporcional al producto  $qv$ , es decir  $F = Bqv$ . El coeficiente de proporcionalidad  $B$  mide el campo magnético, y será un vector que en cada punto tendrá la dirección de la línea de fuerza correspondiente y al que se da el nombre de inducción magnética. Cuando la carga se mueve en una dirección no perpendicular a  $B$ , la fuerza sigue siendo perpendicular al plano determinado por  $v$  y  $B$ , pero su valor es  $F = qvB \text{ sen } \theta$  (lám. C/6).



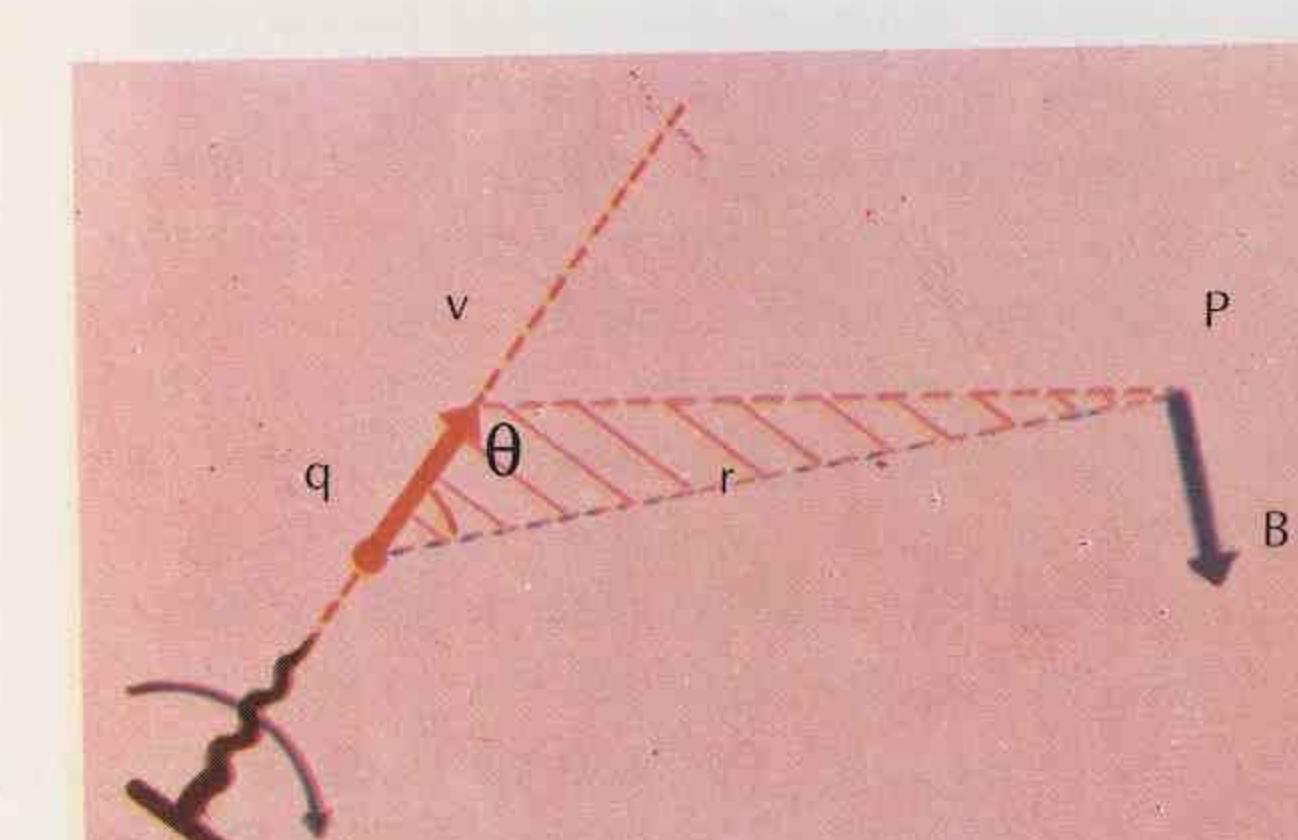
Un solenoide, en un campo magnético, se halla sometido a un par de fuerzas.



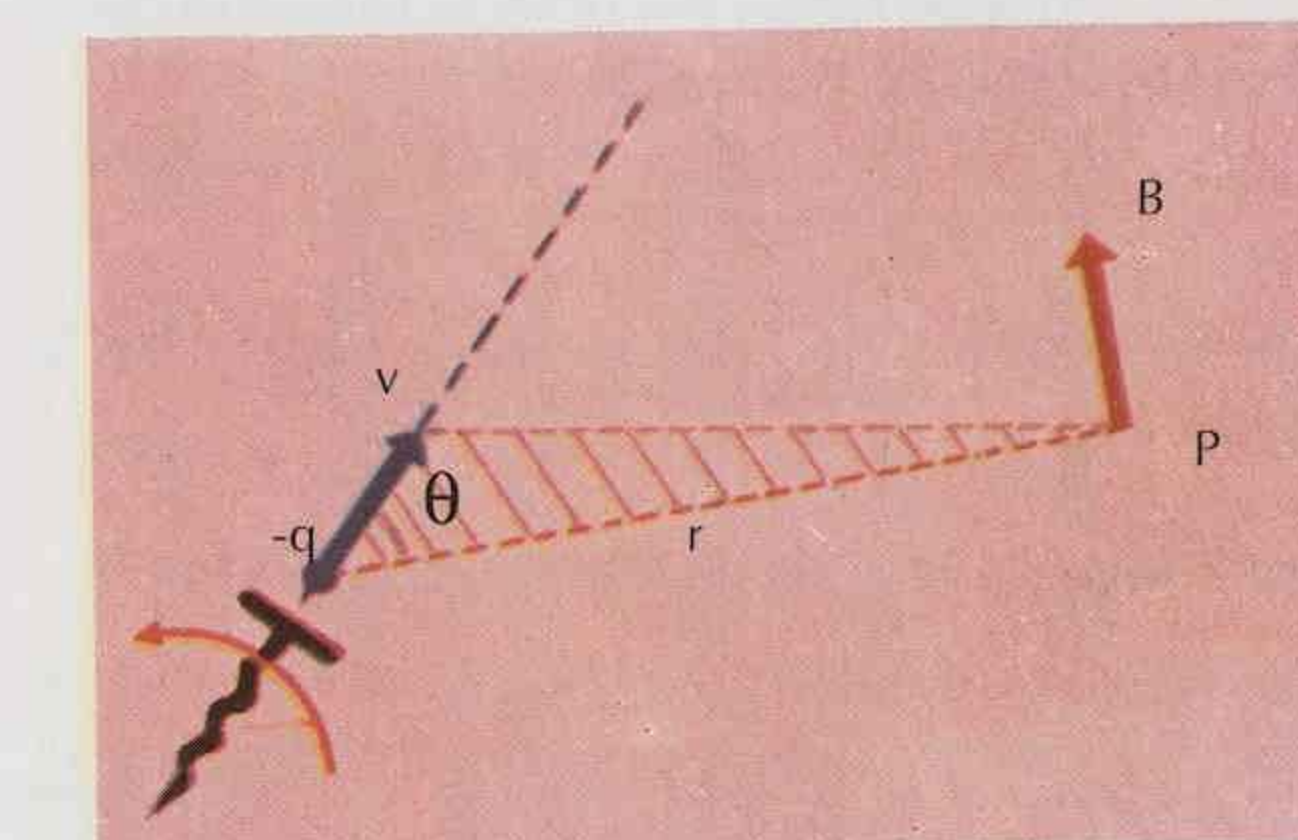
Un imán también está sometido a un par de fuerzas, dentro de un campo magnético.



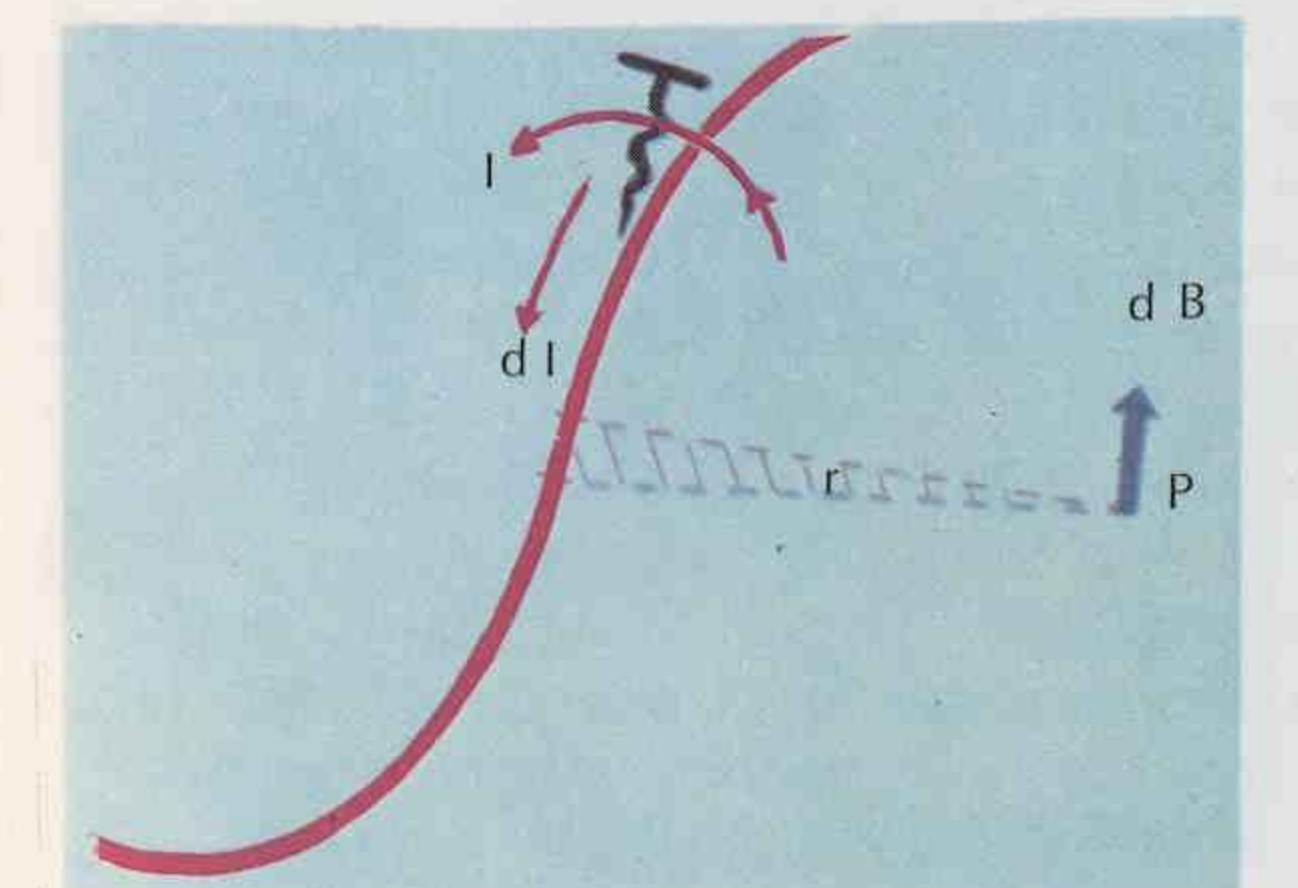
Al girar, la rueda de Rowland crea un campo magnético (figura de la izquierda) análogo al creado por una espiral circular (figura de la derecha).



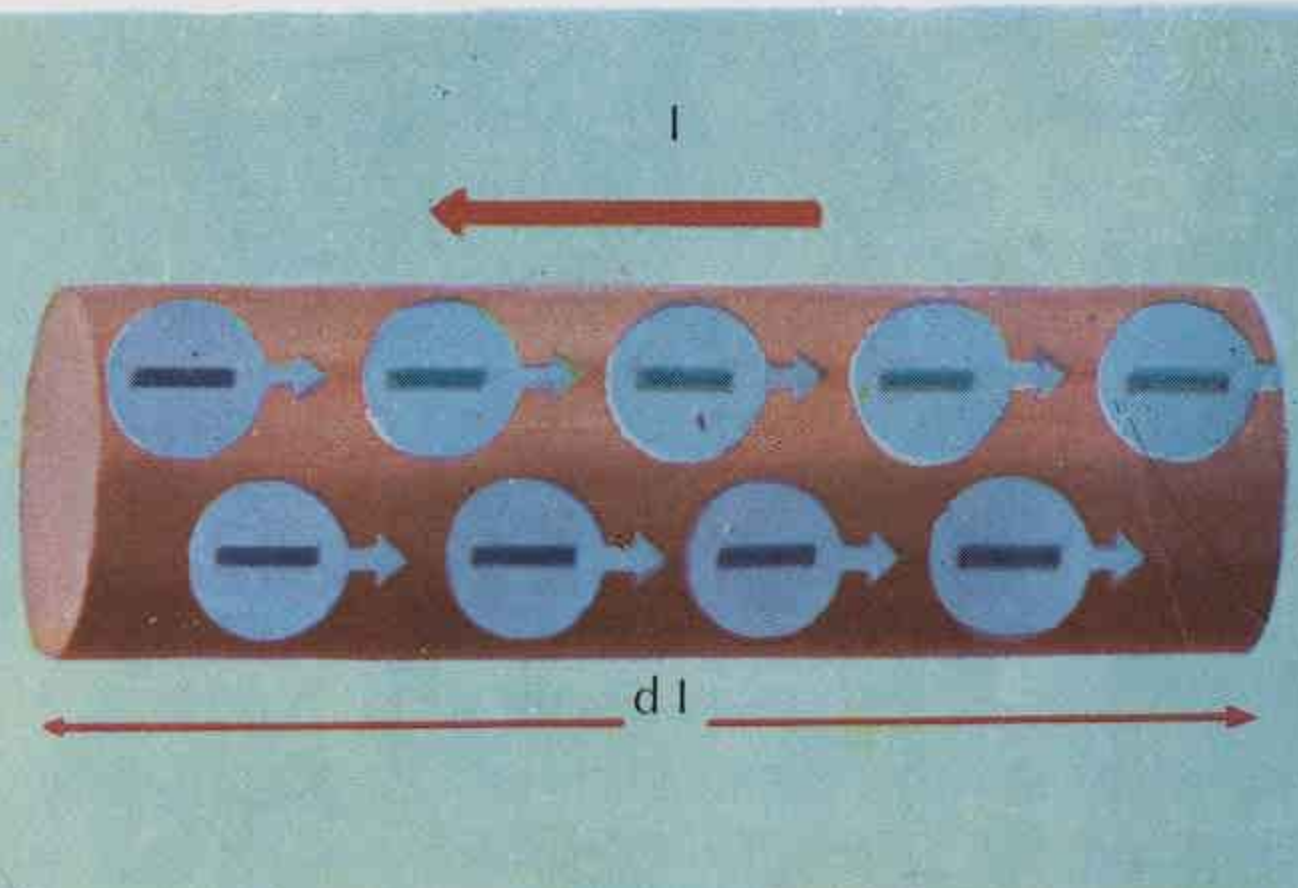
Campo creado en P por la carga positiva q.



Campo creado en P por la carga negativa -q.



Campo creado en P por el elemento de corriente dl.



Ampliación del elemento de corriente. Los electrones (cargas negativas) van en sentido opuesto al de la corriente.

**CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA ESPIRA EN SU CENTRO**

Como ejemplo de aplicación de lo anterior calculemos la inducción magnética que crea en su centro una corriente circular. Tomemos un tramo cualquiera muy corto, de longitud  $dl$ ; el campo  $dB$  que crea en el punto  $P$ , centro de la espira, sea normal al plano determinado por  $dl$  y  $P$ , que es el plano de la espira. Como eso ocurre cualquiera que sea el  $dl$  elegido, resulta que todos los  $dB$  creados en  $P$  por los distintos tramos cortos  $dl$  tendrán la misma dirección y sentido. Su suma es otro vector de igual dirección y sentido, cuyo módulo es la suma de los módulos; luego, bastará sumar los módulos

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \theta}{r^2}$$

de todas las contribuciones al campo. Pero para todos ello  $r$  es el mismo,  $I$  es la misma, pues es la intensidad de la corriente que circula por la espira, y  $\sin \theta = 1$ , porque siempre el radio es perpendicular a  $dl$ . Por tanto, al sumar, podremos sacar factor común de las cantidades mencionadas, y queda

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^2} \sum dl;$$

pero la suma de todos los  $dl$  es la longitud de la circunferencia,  $2\pi r$ , luego

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^2} 2\pi r = \mu_0 \frac{I}{2r}$$

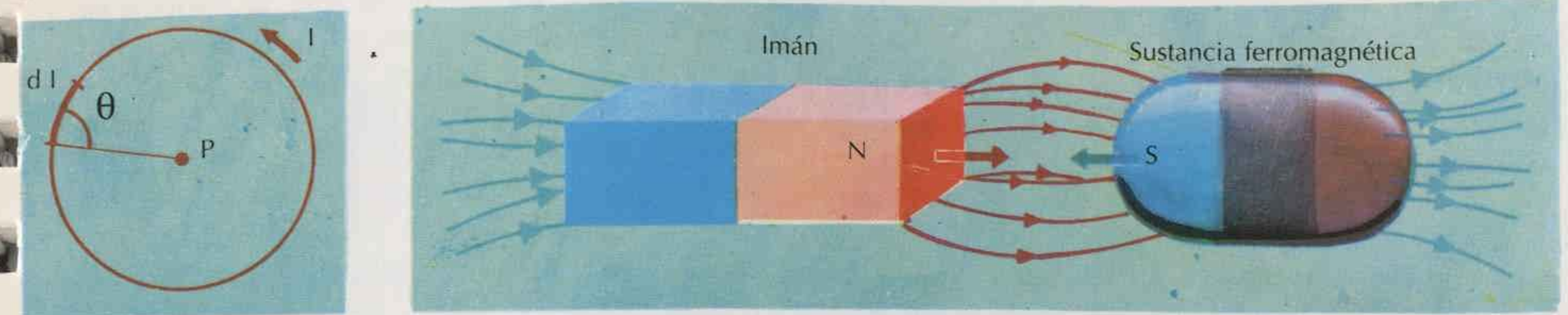
que es el valor del campo en el centro de la espira.

**PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LA MATERIA**

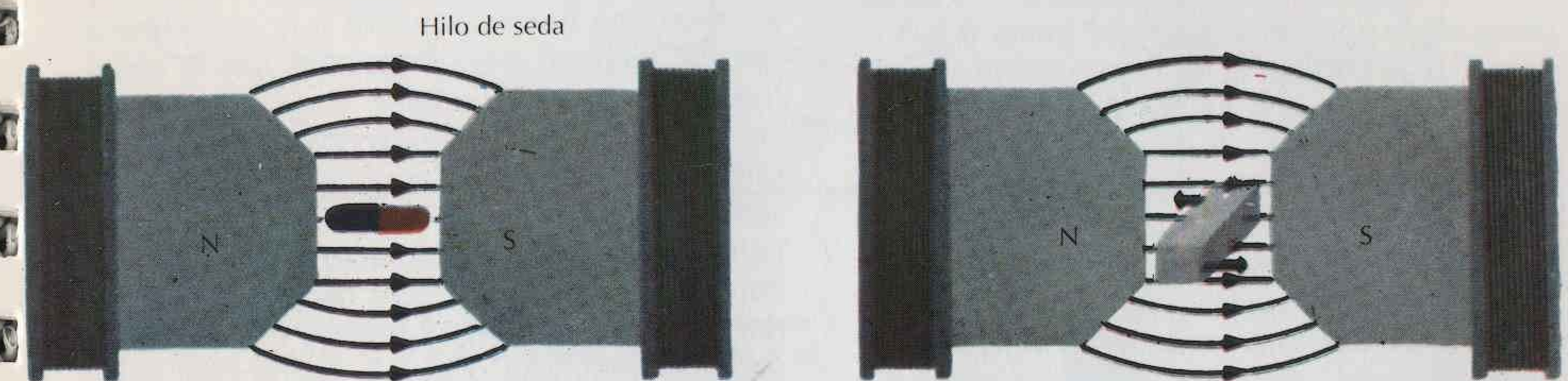
Hemos ya indicado que el hierro, el cobalto, el níquel y ciertas aleaciones son atraídos por el imán, y eso significa que se convierten, a su vez, en nuevos imanes con polos situados de manera tal que uno de ellos, por lo menos, quede próximo al polo de nombre contrario al del imán inductor. Estas sustancias que se convierten en imanes relativamente poderosos reciben el nombre de *ferromagnéticas*. Las demás sustancias también se convierten en imanes, pero tan débiles que no es fácil mostrar su imanación. Las no ferromagnéticas se dividen en *paramagnéticas* y *diamagnéticas*. Al acercarse un polo de una barra imanada a una sustancia paramagnética, la atrae débilmente; en cambio, si es diamagnética, la repele. ¿A qué se debe? Si dividimos una sustancia en varios trozos, cada uno de ellos continuará

siendo una porción de la misma materia. Sigamos fraccionándolos en pedacitos cada vez más pequeños y continuaremos teniendo siempre la misma sustancia, hasta que llegaremos a un pedacito tan pequeño que, si lo dividimos, obtendremos elementos diferentes del que teníamos, pues los nuevos fragmentos ya no conservan las propiedades de la materia primitiva. La fracción más pequeña de una sustancia que conserve aún sus propiedades recibe el nombre de *molécula*. En la molécula existen cargas eléctricas en movimiento, y cada una de ellas, como no abandona la molécula, tiene un movimiento que equivale a un giro. Una carga que gire, crea un campo magnético y, por lo tanto, un pequeño imán. Puede ocurrir que en la molécula, unas cargas giren en un sentido y otras en el contrario, compensándose sus efectos. En tal caso, la molécula *no* constituye un pequeño imán, y eso es lo que ocurre en las moléculas de los cuerpos diamagnéticos. En cambio, en los cuerpos paramagnéticos no existe tal compensación y cada molécula es un pequeño imán. Al aplicar un campo magnético a un cuerpo paramagnético, actuará sobre las moléculas orientándolas como si fueran brújulas, y todas ellas crearán un campo del mismo sentido que el inductor. En los cuerpos diamagnéticos las moléculas no son imanes, y los fenómenos serán diferentes. Si suponemos que cada carga va acompañada de otra igual que gira en sentido contrario, al aplicar exteriormente un campo magnético ejercerá sobre ellas la misma acción que sobre dos espiras recorridas por la corriente en sentidos opuestos, es decir, dos pares de fuerzas de sentido contrario que tenderán a mover las espiras también en sentidos opuestos, con lo cual desaparecerá la compensación y la molécula se *convierte en imán* en presencia del campo magnético. Pero la orientación de este imán es de sentido contrario a la de aquel en que se orientaban las moléculas paramagnéticas, *que ya eran imanes* en ausencia del campo magnético, por lo que el campo creado por las moléculas de un cuerpo diamagnético es de sentido opuesto al del campo inductor. En ausencia de campo inductor, la materia no está imanada, ni siquiera débilmente, porque, si es diamagnética, las moléculas no son imanes, y si es paramagnética, los imanes moleculares están orientados en todas direcciones, con lo que la resultante de los campos magnéticos que crean es nula.

(Continúa en la TARJETA C/10)

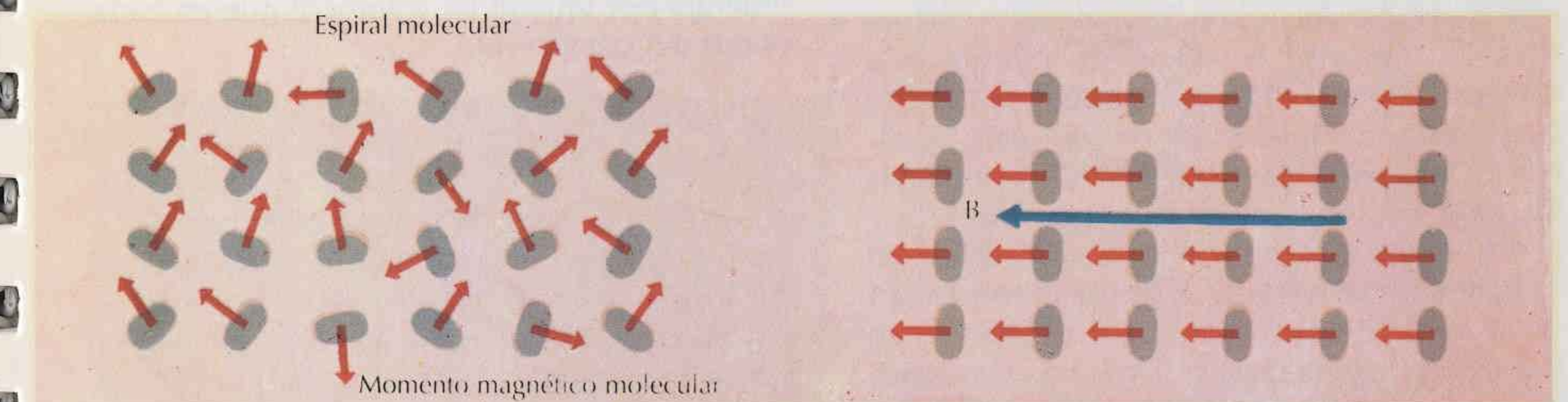


Izquierda: Símbolos empleados en el cálculo del campo en el centro de una espira. Derecha: El polo N del imán induce un polo S en el material ferromagnético, al cual atrae.

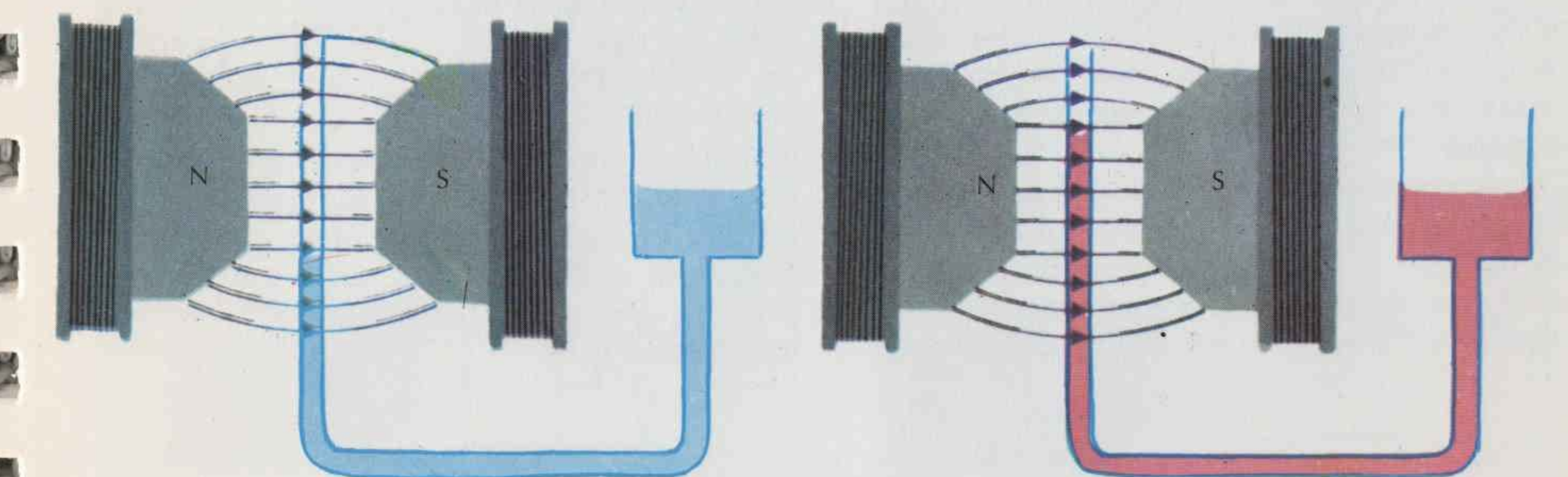


Una ampolla que contenga  $Cl_2$ , Fe (sustancia paramagnética) se orienta como lo haría una barra de hierro.

Una barra de bismuto (sustancia diamagnética) repelida por los polos de un electroimán, se orienta perpendicularmente al campo.



En la parte izquierda: Moléculas de una sustancia paramagnética no imanada. En la parte derecha: Moléculas de la misma sustancia, imanada.



El agua es diamagnética, y por esto baja en el tubo situado en un campo magnético.

Un líquido paramagnético asciende por el tubo situado en un campo magnético.

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Así como las corrientes eléctricas crean campos magnéticos, éstos son capaces, en determinadas condiciones, de provocar la circulación de la corriente por un circuito, fenómeno que se conoce con el nombre de *inducción electromagnética*. Para poderlo estudiar adecuadamente, convendrá introducir el concepto de *flujo magnético* a través de una superficie. Sea una superficie de área  $A$  situada en un campo magnético. Llamaremos flujo magnético o flujo de inducción magnética a través de dicha superficie al producto del área  $A$  de la superficie por la proyección de  $B$  sobre la normal. Es decir, designando por  $\theta$  el ángulo que forma  $B$  con la normal a la superficie, el flujo a través de ella vendrá dado por  $\phi = AB \cos \theta$ . De ser, pues, la inducción magnética  $B$  normal a la superficie, la anterior expresión se reduciría a  $\phi = AB$ .

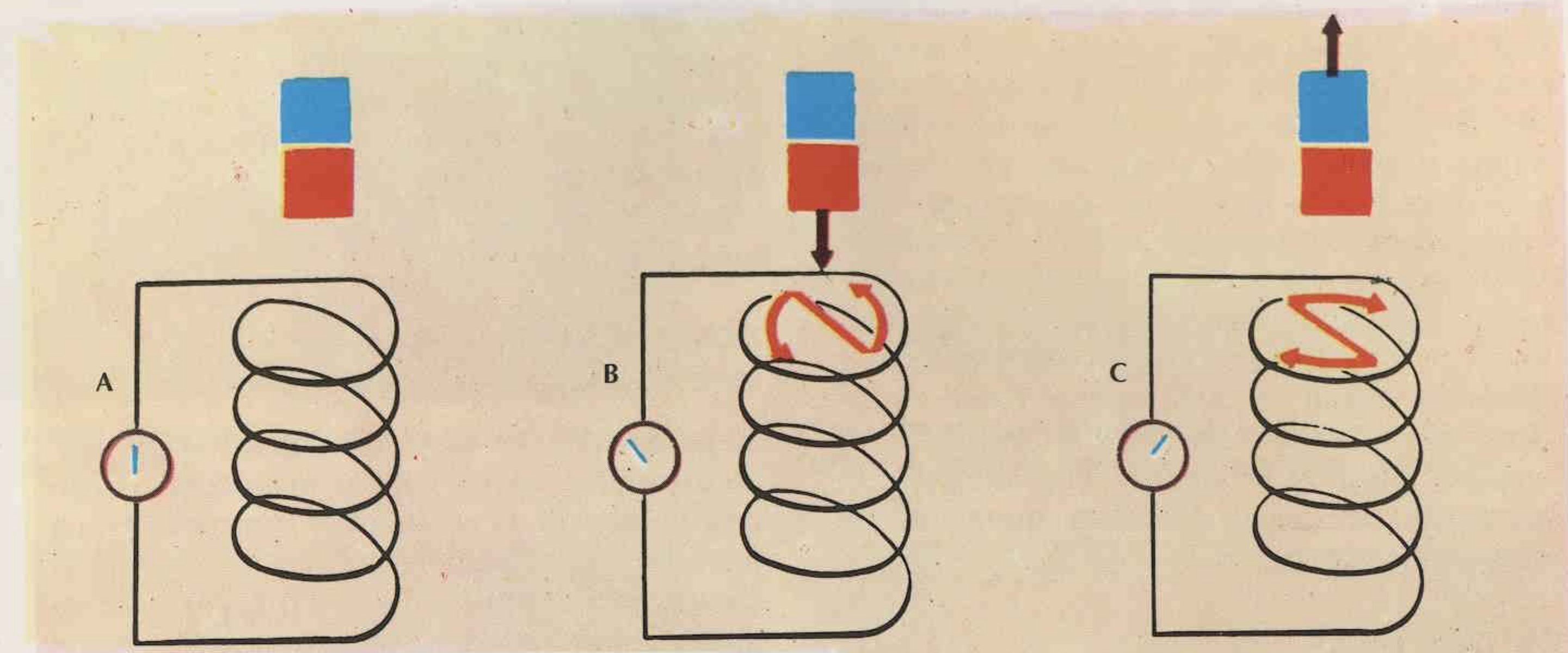
Dada esta definición, podemos comprender que el imán en reposo de la primera de las figuras, por crear un campo magnético en el espacio, manda un flujo constante a través de la superficie total encerrada por las espiras del solenoide. Al acercar el imán en la forma indicada aumenta el valor de  $B$  en todos los puntos, y por tanto crece el flujo  $\phi$  a través del solenoide. Al alejarlo, disminuye el valor de  $B$  y, en consecuencia, del flujo  $\phi$ . En uno y otro caso se observa que por el solenoide circula una corriente llamada *inducida*, y que el sentido de circulación es opuesto en ambos casos. También puede verse que al tener dos solenoides en presencia, uno conectado a un generador y el otro cerrado sobre sí mismo a través de un instrumento de medida, al variar la intensidad de la corriente que circula por el primero se induce en el segundo una corriente cuyo sentido depende de si la variación de intensidad es un aumento o una disminución. Al no variar la intensidad de la corriente que circula por el solenoide 1, por el solenoide 2 no circularía corriente alguna. En resumen: toda variación de flujo magnético a través de un circuito induce en éste una corriente. Este fenómeno se conoce con el nombre de *inducción electromagnética*.

Queda por ver aún un aspecto importantísimo de este fenómeno, que puede resumirse en la ley de Lenz: *El sentido de la corriente inducida es tal que tiende a oponerse a la causa que la origina*. En efecto: cuando se acerca el polo

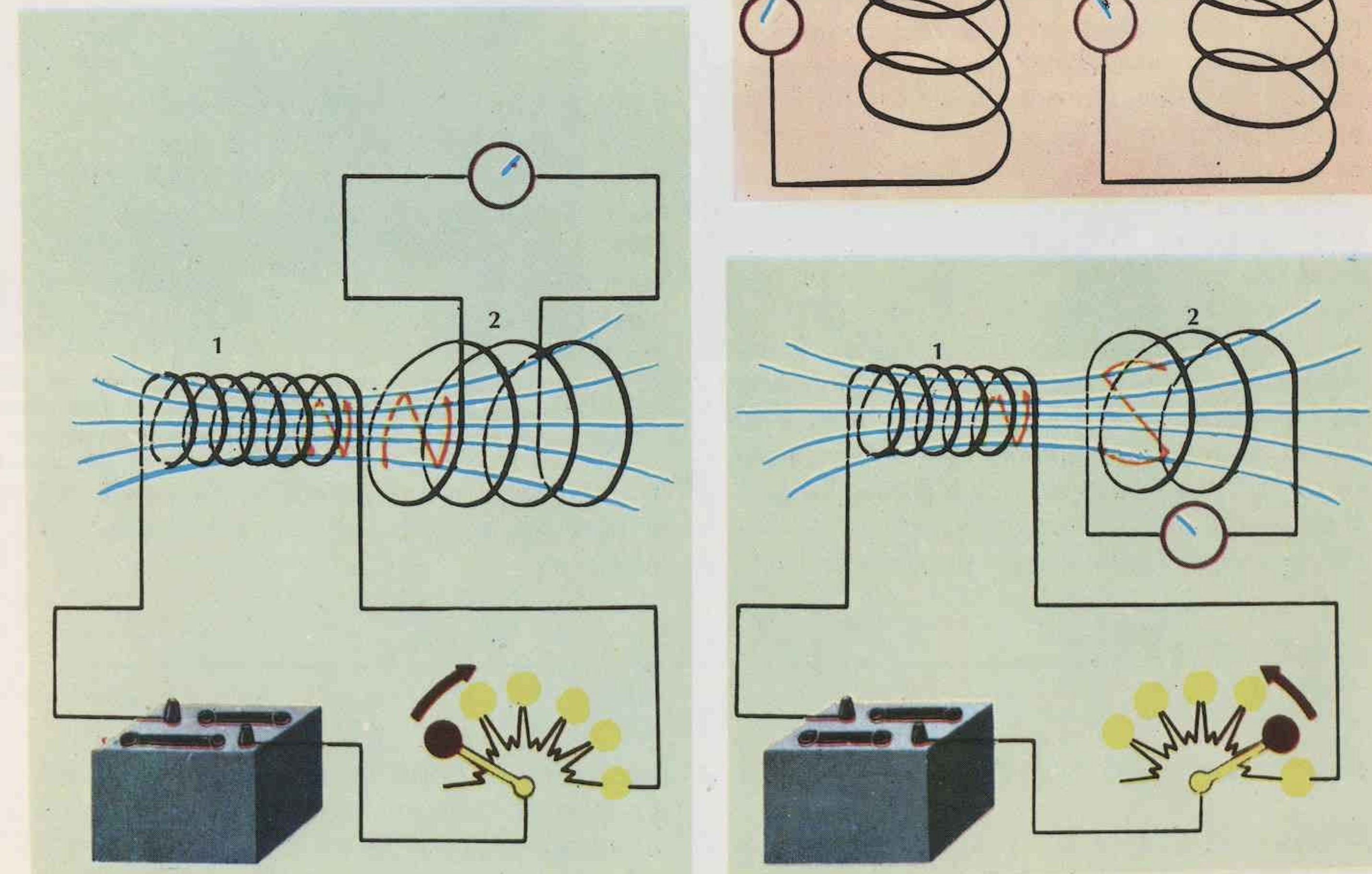
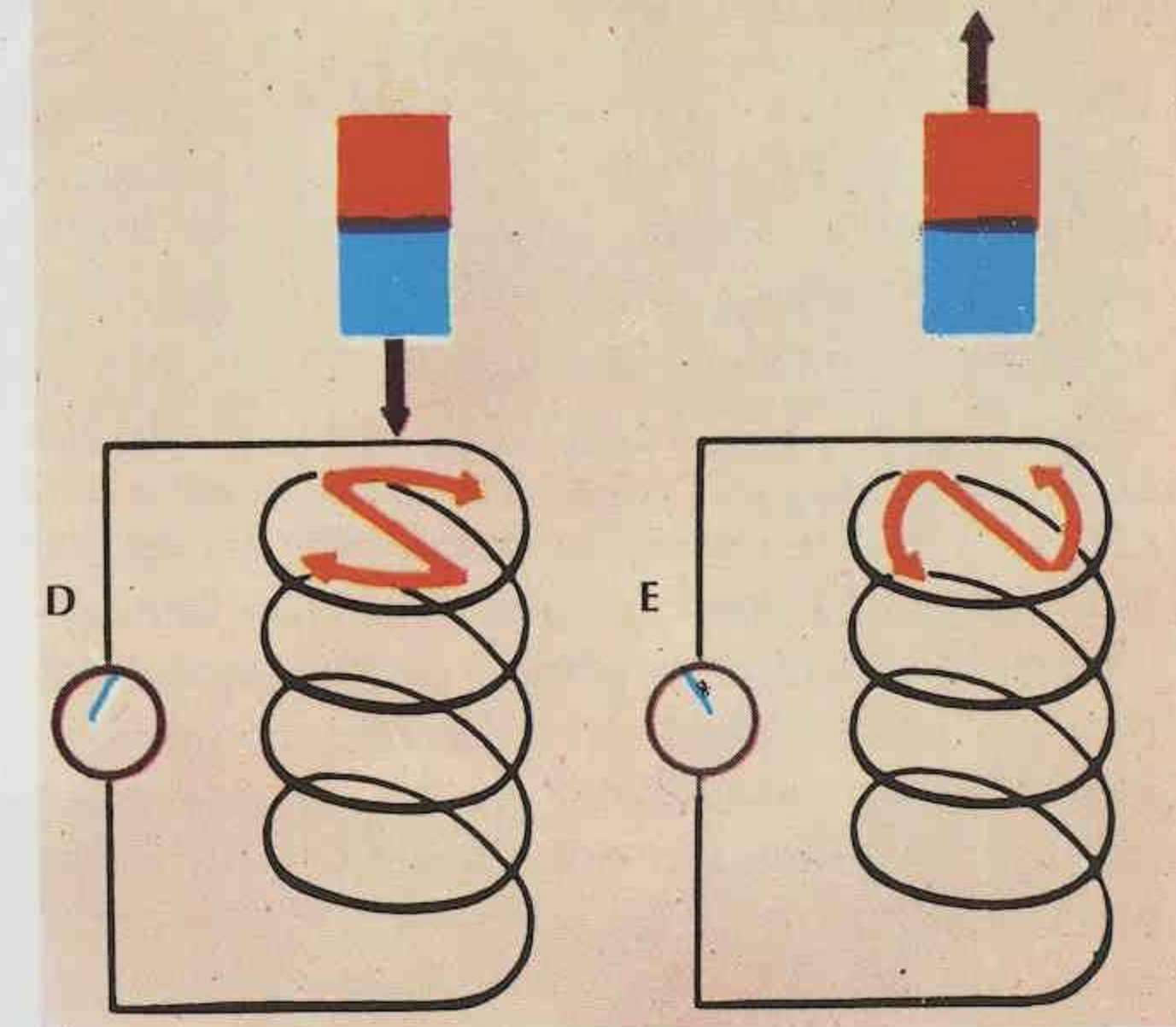
norte de un imán, aumenta el campo en todos los puntos y, en consecuencia, el flujo a través del solenoide. La corriente que se induce es de sentido tal que origina un flujo de sentido contrario, pues el campo formado por dicha corriente pugna contra el creado por el imán, es decir, se opone al aumento de flujo. O, de otra manera: la corriente inducida crea un polo norte en el extremo del solenoide próximo al polo norte del imán, al cual repelerá, oponiéndose, por tanto, a su acercamiento, que es la causa inductora de la corriente. Cuando apartamos el polo norte del imán, la corriente inducida es de sentido contrario y aparece una fuerza atractiva que se opone a que se aleje el polo norte del imán, alejamiento que es la causa inductora de la corriente. En el caso de los dos solenoides, la corriente inducida en el 2 tiene siempre un sentido tal que crea un campo magnético que tiende a oponerse al aumento o disminución del flujo originado a través de él por el solenoide 1. Ahora bien, si por un circuito pasa una corriente, ésta consume energía del exterior y, en el caso de ser inducida, la tomará del campo magnético existente alrededor del circuito. En todo campo magnético hay una energía que se distribuye con una densidad (energía por unidad de volumen) que en cada punto del campo vale

$$\frac{B^2}{2\mu'}$$

donde  $B$  es el valor de la inducción magnética en dicho punto y  $\mu$  una constante característica del medio, llamada *permeabilidad magnética*, cuyo valor para el vacío ya conocemos. Ya vimos que la energía que hay que tomar del exterior para que circule la unidad de carga es la fuerza electromotriz, y Faraday demostró que la *fuerza electromotriz inducida* en un circuito era igual a la velocidad de variación del flujo que lo atraviesa. Es decir, si en un tiempo muy corto  $dt$  crece el flujo a través del circuito en  $d\phi$ , la fuerza electromotriz inducida vale  $-d\phi/dt$ . El signo  $-$  se debe a que esta fuerza electromotriz se opone a la variación de flujo que la origina. En el conductor que constituye el circuito existirá, pues, un campo eléctrico o fuerza por unidad de carga, cuyo trabajo a lo largo del circuito será igual a la fuerza electromotriz inducida.



Si un imán está en reposo frente a un solenoide, no induce corriente en éste (A). Si el imán se acerca por su polo N al solenoide, induce en éste una corriente de sentido tal, que forma un polo N en el extremo más próximo del solenoide (B). Si se aleja, sin cambiar de orientación, induce una corriente de sentido opuesto (C). Al invertir el imán, suceden los fenómenos contrarios a los de antes (D y E).



Al intensificar la corriente en el solenoide 1, se induce una corriente en el 2. Si se debilita la corriente en el 1, se induce en el 2 una corriente de sentido contrario al de la del caso anterior.

**BALÍSTICA ELECTRÓNICA**

La parte de la Electricidad que engloba los problemas del movimiento de partículas cargadas bajo la acción de campos eléctricos o magnéticos recibe el nombre de *Balística electrónica*, debido a que dichas partículas se utilizan modernamente como proyectiles en muchas ocasiones y cabe establecer una analogía con los problemas de la balística clásica. En la naturaleza existen partículas tales como los electrones, protones, partículas alfa, etc., que estudiaremos más adelante, con carga eléctrica y dimensiones tan pequeñas que es dable considerar cual puntos materiales. Podemos, pues, enfocar nuestros problemas considerando la existencia de cargas eléctricas puntuales de carga  $q$  y masa  $m$ .

**MOVIMIENTO DE UNA CARGA EN UN CAMPO ELÉCTRICO**

Una carga eléctrica  $q$ , situada en un punto en el que exista un campo eléctrico  $E$ , se encuentra sometida a una fuerza  $qE$  de la misma dirección del campo y cuyo sentido es el mismo o el opuesto, según que la carga  $q$  sea positiva o negativa. Esta fuerza imprimirá a la carga una aceleración  $a$ , y, si es  $m$  la masa de la partícula cargada, tendremos:  $qE = ma$ , o sea,  $a = qE/m$ . Si el campo  $E$  tiene la misma dirección, sentido y módulo en todos los puntos de una región del espacio (campo eléctrico uniforme), como ocurre entre las armaduras de un condensador plano, la aceleración que tomaría la partícula sería la misma en todos los puntos, como sucede en el campo de la gravedad terrestre al considerar una región limitada del espacio. Si el campo no fuera uniforme, al abandonar en él una carga seguiría la línea de fuerza que pasa por el punto en que se abandone. Si se lanzara la carga con una velocidad inicial no dirigida según las líneas de fuerza, el problema se complica, pero siempre se cumpliría el hecho de que el incremento de energía cinética de la carga  $q$  al pasar de un punto  $A$  a otro  $B$  es igual a la disminución de energía potencial  $q(V_A - V_B)$ . Esto hace que pueda definirse el

(Continuación de la TARJETA C/8)

El hecho de que los cuerpos ferromagnéticos se imanen en el mismo sentido que los paramagnéticos nos indica la presencia de imanes moleculares; y el que la imanación sea

*electrón-volt* como una nueva unidad de energía, que es aquella que adquiere un electrón al pasar de un punto a otro entre los que existe una diferencia de potencial de 1 V. Como la carga de un electrón es de  $1,6 \times 10^{-19}$  C, el electrón-volt (eV) equivale a una energía de  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J. También se emplean los múltiplos; kiloelectrón-volt (keV), valor: 1.000 eV; megaelectrón (MeV), valor:  $10^6$  eV; gigaelectrón n-volt (GeV), de  $10^9$  eV.

**MOVIMIENTO DE UNA CARGA EN UN CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME**

Ya vimos que una carga  $q$ , al penetrar perpendicularmente en un campo magnético  $B$  con una velocidad  $v$ , se hallaba sometida a una fuerza  $F = qvB$  perpendicular a  $v$  y a  $B$ . Si el campo es uniforme,  $B$  tiene el mismo valor en todos los puntos, y por tanto  $F$  posee siempre el mismo valor. Ahora bien, una fuerza que en todo momento sea perpendicular a la trayectoria no realiza ningún trabajo, por lo que la energía cinética permanece constante (teorema de las fuerzas vivas) y el movimiento que origina es circular y uniforme, siendo  $F$  la fuerza centrípeta. Por tanto,

$$qvB = m \frac{v^2}{R},$$

de donde

$$R = \frac{mv}{qB},$$

y nos dice que el radio de la trayectoria circular que describe una carga eléctrica disparada en un campo magnético, perpendicularmente a él, es proporcional a su velocidad constante  $v$ . Para hallar el tiempo que invierte en dar una vuelta completa, o *período de revolución*, basta dividir la longitud de la trayectoria  $2\pi R$  por la velocidad  $v$ , o sea,

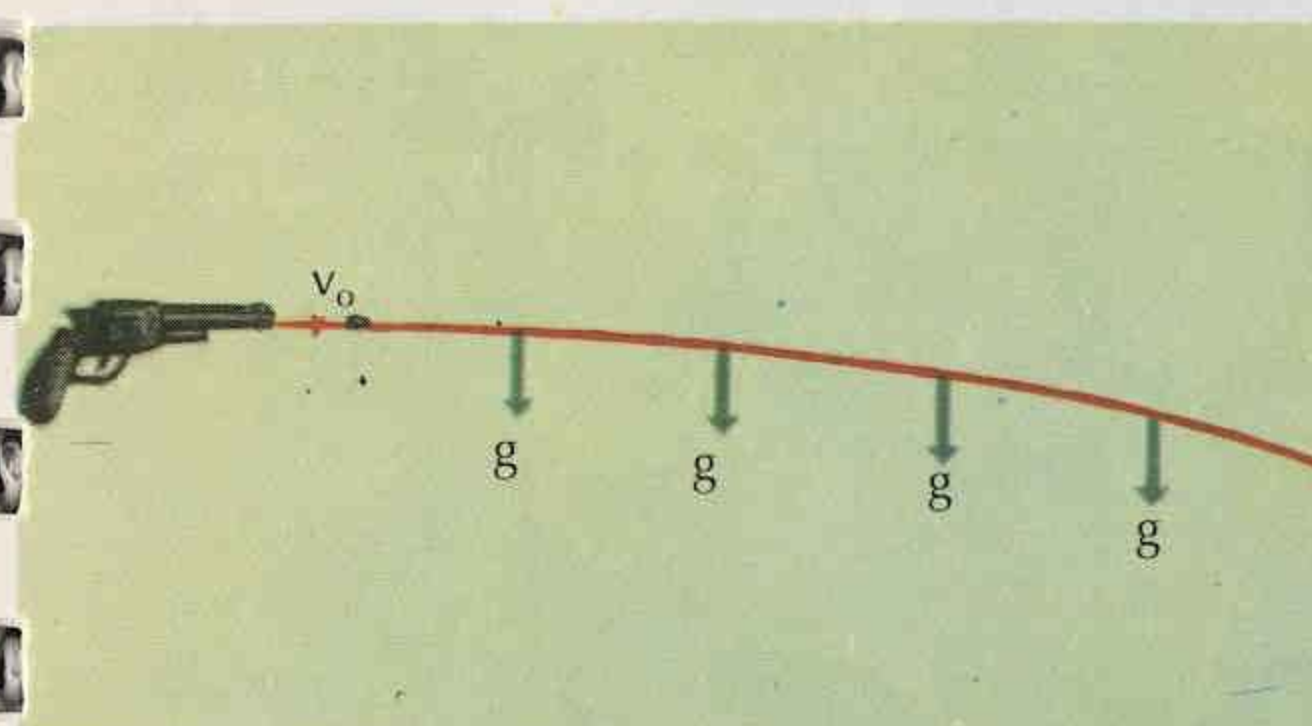
$$T = \frac{2\pi R}{v} = 2\pi \frac{m}{qB},$$

lo cual indica que el período es independiente de la velocidad de la partícula, y del radio de la trayectoria.

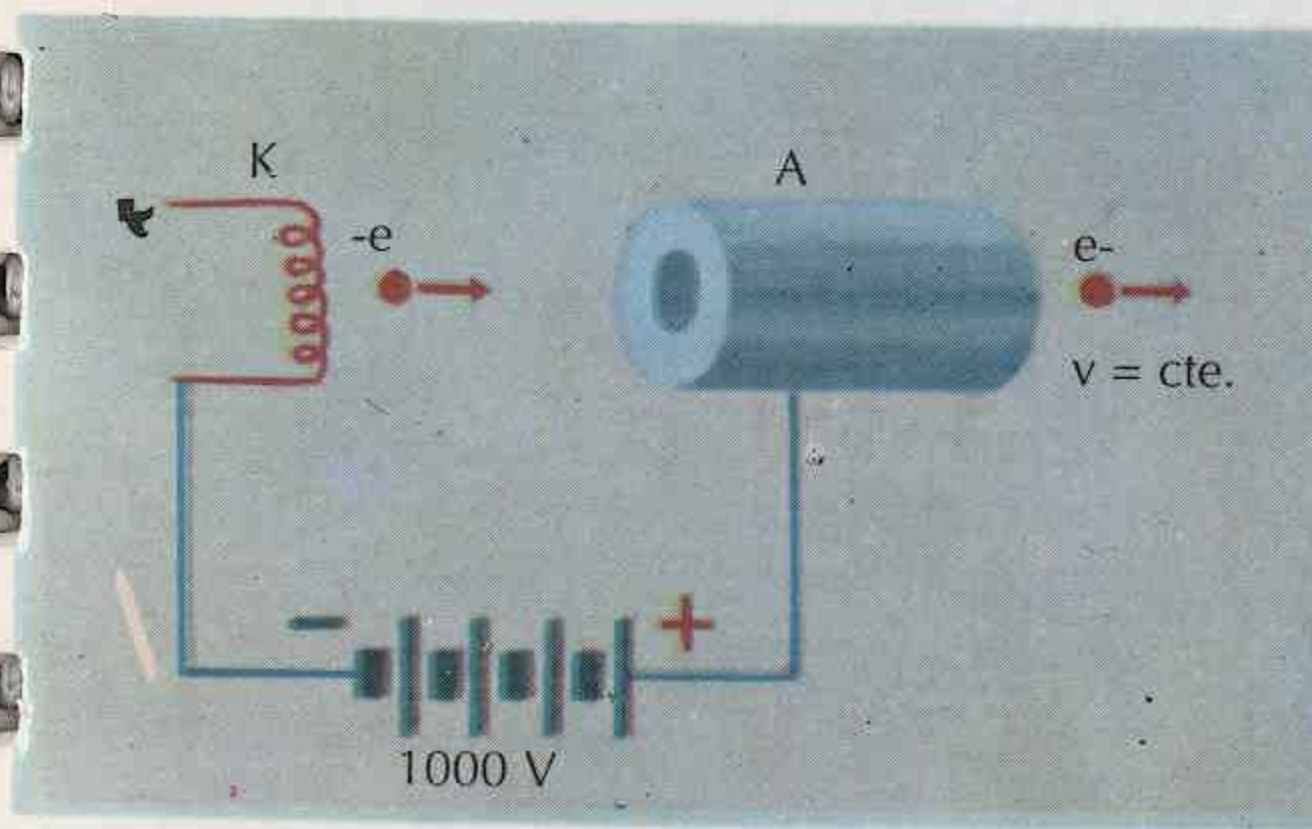
mucho más intensa señala que, en lugar de ser imanes moleculares sueltos, son grupos numerosísimos de imanes moleculares, orientados todos de igual manera, con lo aúnan sus acciones. Estos grupos reciben el nombre de *dominios de Weiss*.



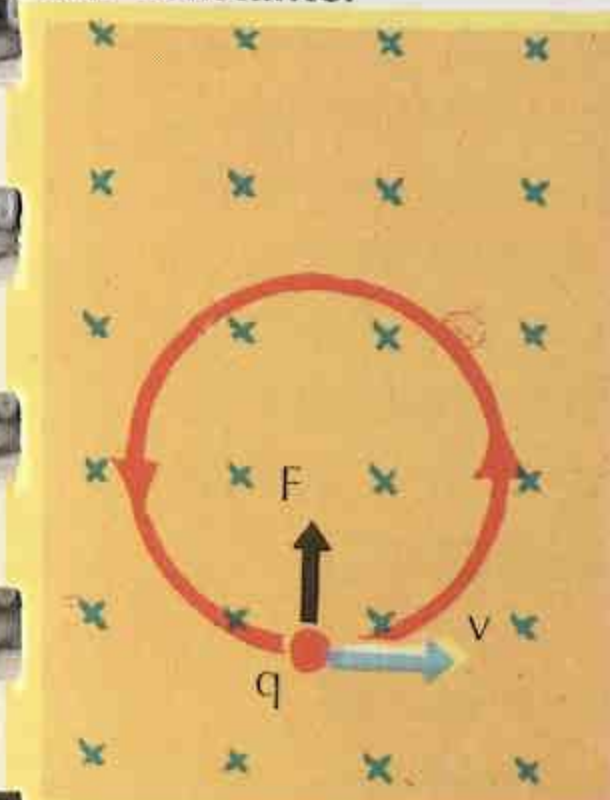
Un cuerpo abandonado en el espacio, cae con una aceleración constante  $g$ .



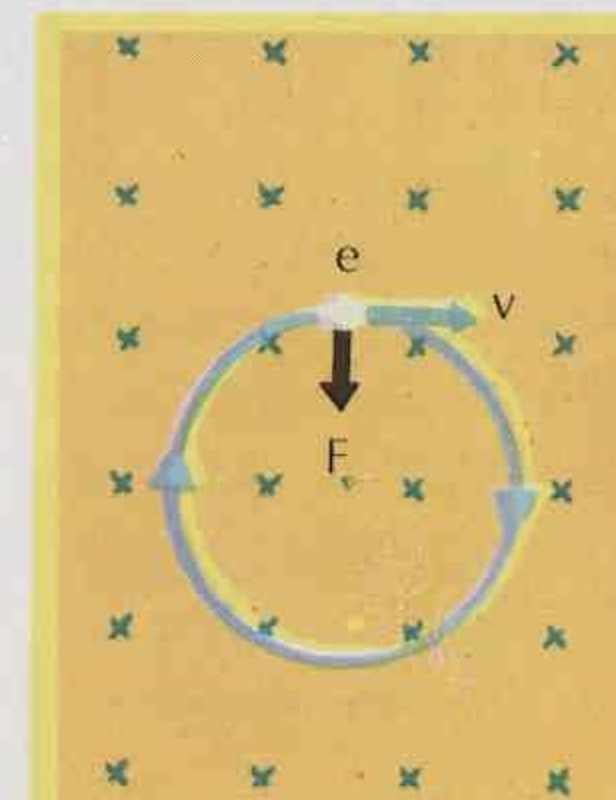
Un proyectil disparado horizontalmente describe una trayectoria parabólica a causa de la aceleración vertical  $g$ .



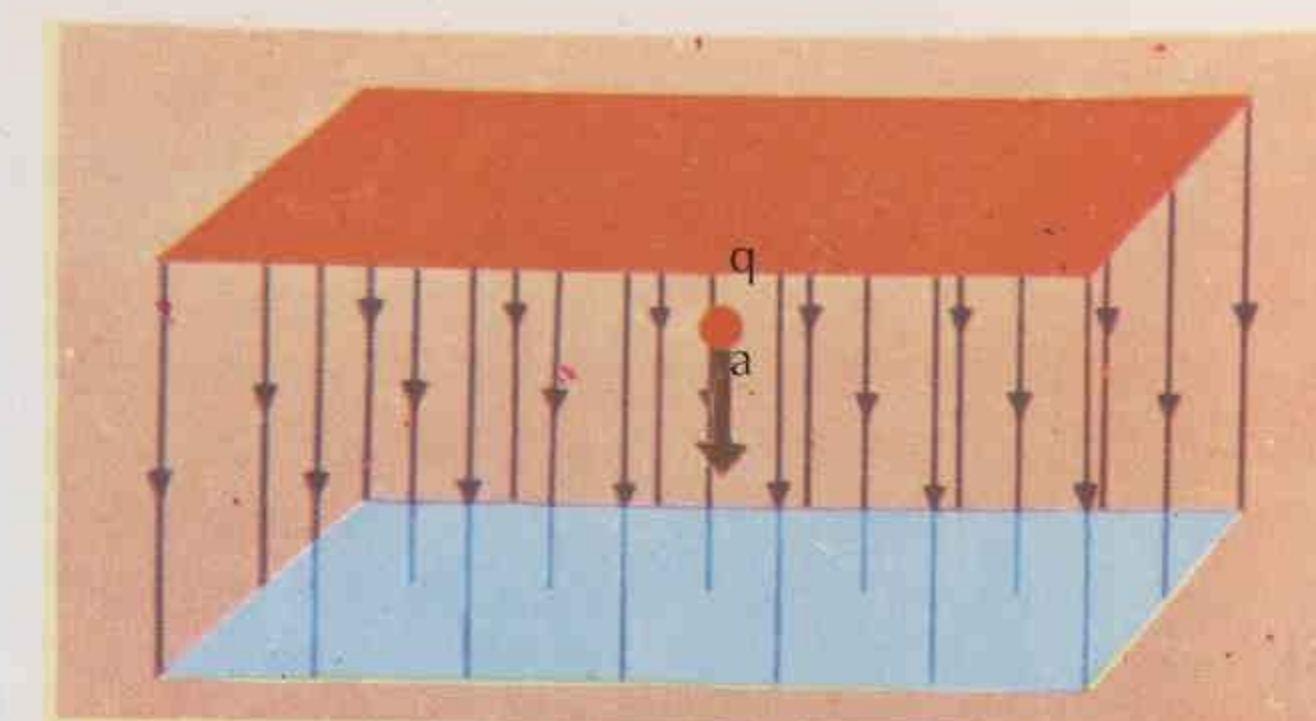
Cañón de electrones. Los electrones salen del cátodo incandescente K, se aceleran hasta el ánodo A, ganando una energía cinética de 1000 eV. Luego siguen con velocidad constante.



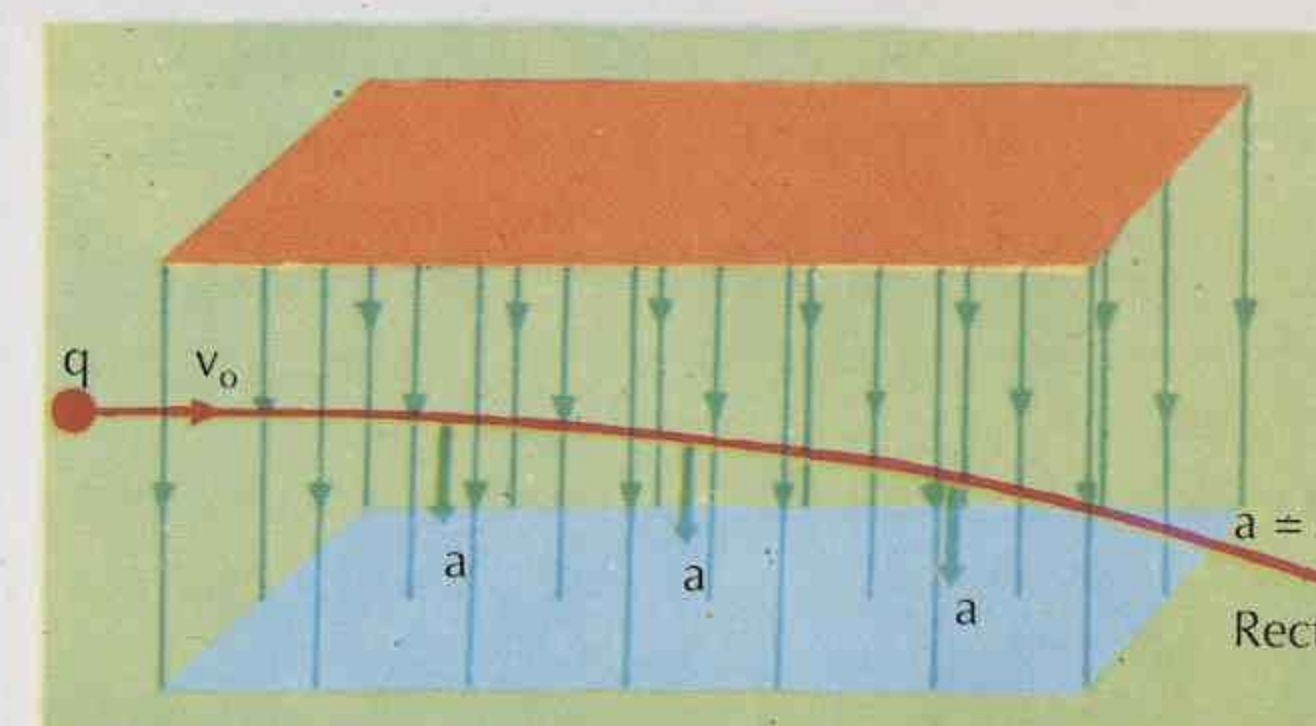
Una carga positiva,  $q$ , describiría esta trayectoria circular. Campo magnético normal al papel y hacia atrás.



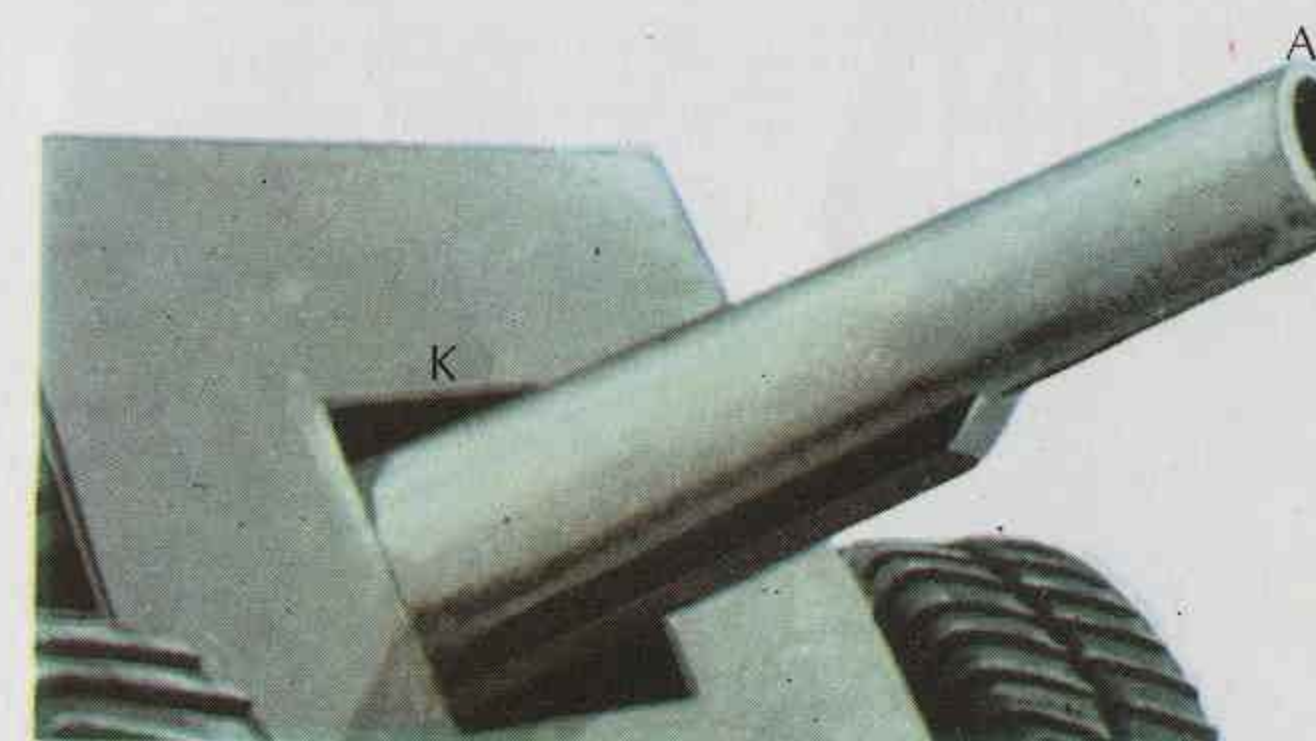
Una carga negativa  $-e$  describiría esta trayectoria circular.



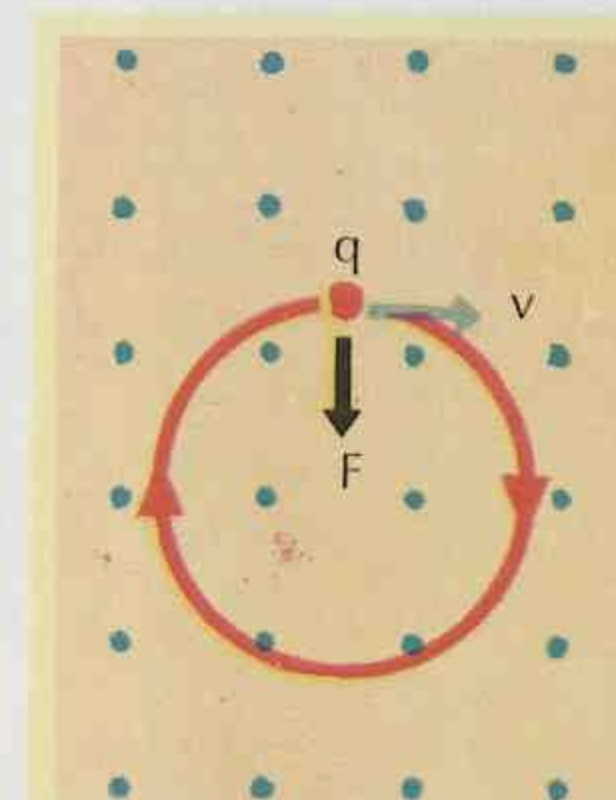
Una carga eléctrica  $q$  abandonada en un campo eléctrico uniforme, toma una aceleración constante,  $a = qE/m$ , dirigida según él.



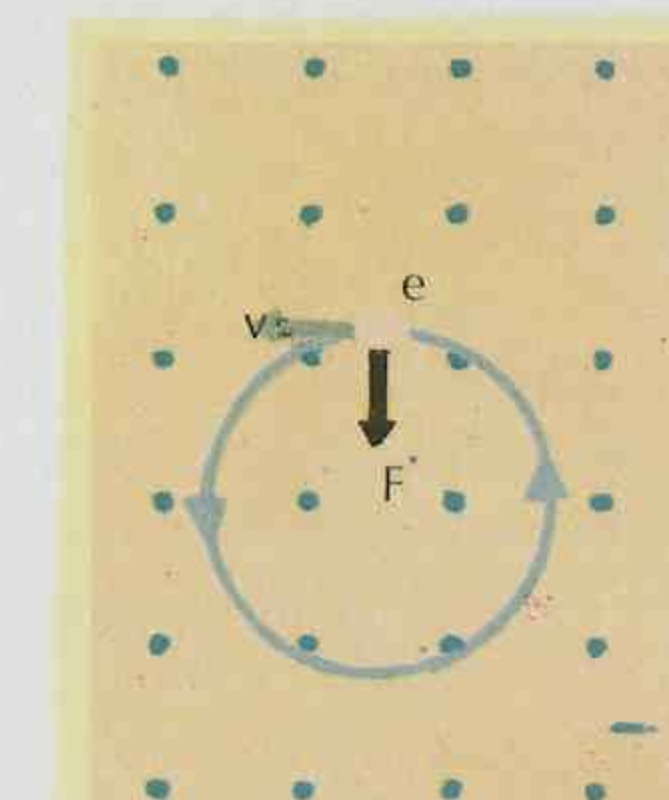
Una carga  $q$  lanzada perpendicularmente a un campo eléctrico uniforme, describe una trayectoria parabólica a causa de la aceleración constante  $a = qE/m$ .



Entre los extremos K y A del cañón, se acelera el proyectil, igualmente que el electrón entre el cátodo y el ánodo.



Una carga positiva  $q$  describiría esta trayectoria circular. Campo magnético normal al papel y hacia delante.



Una carga negativa  $-e$  describiría esta trayectoria circular.

CICLOTRÓN Y BETATRÓN

CICLOTRÓN

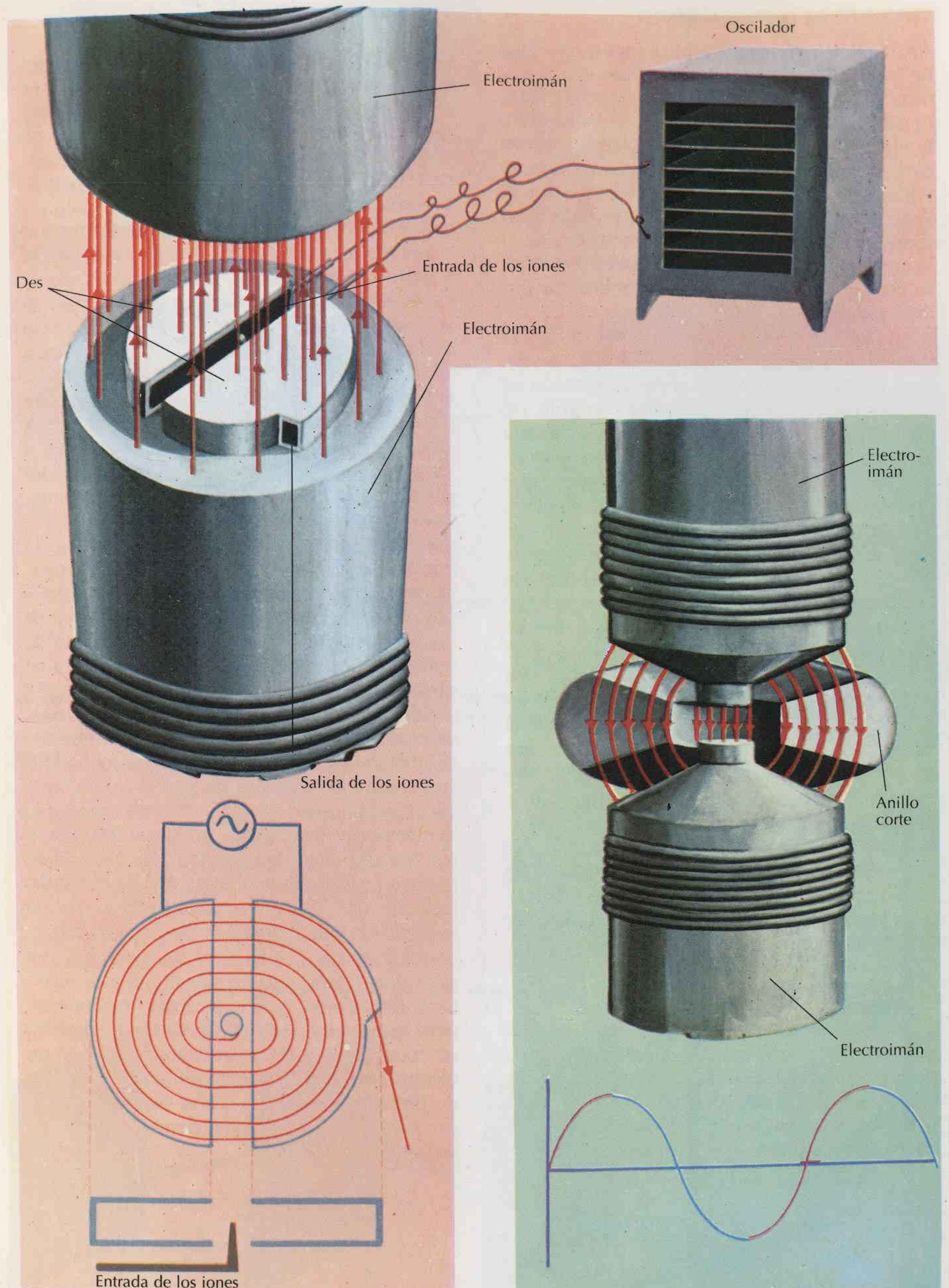
Una interesante aplicación de la acción de los campos eléctrico y magnético sobre una partícula cargada la constituye el *ciclotrón*, dispositivo muy empleado en Física Nuclear para acelerar partículas hasta comunicarles una energía suficiente para desintegrar los átomos. Las partes esenciales de un ciclotrón son las siguientes: un electroimán que crea un campo magnético uniforme, dos electrodos de cobre, en forma de «D», que forman entre ambos un cilindro achatado, un oscilador que aplica entre las dos «des» una diferencia de potencial alterna, y una fuente de iones que se encarga de crear las partículas cargadas que hay que acelerar y, al mismo tiempo, las introduce cerca del punto medio de los bordes de las «des». El conjunto de electroimán y «des» se halla contenido en un recinto estanco, en cuyo interior se practica el vacío.

Cuando por la entrada de los iones penetra una partícula cargada, el campo eléctrico existente entre las «des» la lleva hacia una de ellas, penetrando en su interior con una cierta velocidad adquirida. En dicho lugar es nulo el campo eléctrico, pues las condiciones son las mismas que si se tratara del interior de un conductor en equilibrio, y, por lo tanto, la carga sólo se halla sometida a la fuerza magnética que le hace describir una trayectoria semicircular, llegando al borde de la «D» en un tiempo  $T/2 = \pi m/qB$ . En este tiempo, precisamente, se ha invertido el sentido del campo eléctrico alterno, y la partícula se halla sometida a una fuerza que la lleva a la otra «D», adonde llega con mayor velocidad, pues en el paso de una a la otra ha ganado una energía cinética igual a  $qV$ , siendo  $q$  la carga de la partícula y  $V$  la diferencia de potencial entre las «des» en el instante del paso. En esta «D» ocurrirá lo mismo que en la primera, si bien el radio de la semicircunferencia,  $R = mv/qB$ , será ahora mayor, por ser mayor la velocidad  $v$  que lleva la partícula. El tiempo que tarda en recorrer la semicircunferencia es el mismo de antes,  $\pi m/qB$ , pues no depende de la velocidad ni del radio. Al llegar al borde se habrá vuelto a invertir el sentido del campo, vuelve la partícula a ganar una energía cinética  $qV$ , y así proseguirá en cada paso de una a otra «D», aumentando el

radio en la forma correspondiente, hasta que este radio sea tan grande que la partícula salga con una energía cinética igual a  $nqV$  por la ventana practicada al efecto, siendo  $n$  el número de veces que ha pasado de una «D» a la otra. De esta manera se logra dar energías del orden de 10-20 MeV a partículas tales como protones, deuterones y partículas alfa.

BETATRÓN

El ciclotrón no sirve para acelerar electrones, pues su pequeña masa hace que para energías cinéticas bastante bajas su velocidad sea próxima a la de la luz. En tales condiciones, la teoría de la Relatividad nos dice que la masa no se mantiene constante, con lo que el período de revolución tampoco lo sería y se perdería el sincronismo con el campo alterno, cosa que, como hemos visto, hacía que se acelerara siempre la partícula al pasar de una a otra «D». Por eso, para acelerar electrones, se ha ideado el *betatrón*. Consta, esencialmente, de un electroimán, o sea, un solenoide con núcleo de hierro para que el campo sea más intenso, recorrido por una corriente alterna, que crea, por lo tanto, un campo magnético alterno, y de un anillo de vidrio en cuyo interior se ha practicado el vacío y por el cual circulan los electrones que se aceleran. En este caso, el campo originado por el electroimán no es uniforme, sino que las líneas de fuerza están curvadas de manera que obligan al electrón a recorrer siempre una misma circunferencia. Así, pues, el electrón emitido por un cátodo incandescente recorre una trayectoria circular, lo que equivale a tener una corriente circular. Ésta se halla en un campo magnético variable que crea, a través del círculo limitado por la trayectoria, un flujo variable  $\phi$ . Ya vimos al final del apartado *Inducción electromagnética* que con ello se crea un campo eléctrico o fuerza por unidad de carga, cuyo trabajo a lo largo del circuito era igual a  $-d\theta/dt$ , que es la velocidad de variación del flujo. En el betatrón,  $\phi = AB$ , siendo  $A$  el área del círculo mencionado; luego el trabajo por unidad de carga en cada vuelta será  $-d\theta/dt = -A dB/dt$ , y, por tanto, la ganancia de energía cinética de un electrón en cada vuelta será  $(-e)(-AdB/dt) = eA dB/dt$ , siendo  $dB/dt$ , la velocidad de crecimiento de  $B$ . Si, por ejemplo, en 0,01 s,  $B$  aumenta 1 T,  $dB/dt$ , valdrá 100 T/s.



Esquema de funcionamiento del ciclotrón.

Arriba, esquema de un betatrón. Abajo, campo magnético alterno del mismo. Sólo se aprovecha la posición en rojo (campo creciente).

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

CORRIENTE DE DESPLAZAMIENTO

Analicemos qué ocurre en la carga o descarga de un condensador: se trasladan de una armadura a otra cargas eléctricas a través del circuito exterior, el cual será asiento de una corriente eléctrica. Por el dieléctrico no se conducen cargas eléctricas, por lo cual parece ser que no circula corriente alguna. Sin embargo, en el dieléctrico puede observarse que se induce un campo magnético análogo al que se tendría si la corriente que circula por el circuito exterior se cerrara a través del dieléctrico, distribuyéndose por él.

A esta corriente (que no es de conducción) se le da el nombre de *corriente de desplazamiento*, y está distribuida por todo el dieléctrico en donde exista campo eléctrico variable, y, como ha sido preciso admitir su presencia para explicar la del campo magnético que hay en todos los puntos del dieléctrico, se deduce que *en todo punto en que haya un campo eléctrico variable existe también un campo magnético debido a él*. Este enunciado es totalmente general y no debe restringirse al campo de un condensador en régimen de carga o descarga. El estudio riguroso de este fenómeno, correlativo con el de la inducción electromagnética en el que todo campo magnético variable crea un campo eléctrico, se realiza partiendo de las ecuaciones de Maxwell, que constituyen la base de la teoría electromagnética, pero que no podemos tratar aquí, dado el carácter elemental de este atlas. De dicho estudio se desprende que en cada punto del espacio en el que exista un campo eléctrico (o magnético) que varíe periódicamente hay un campo magnético (o eléctrico) de igual período, perpendicular a otro y que se anula, crece y disminuye simultáneamente con él.

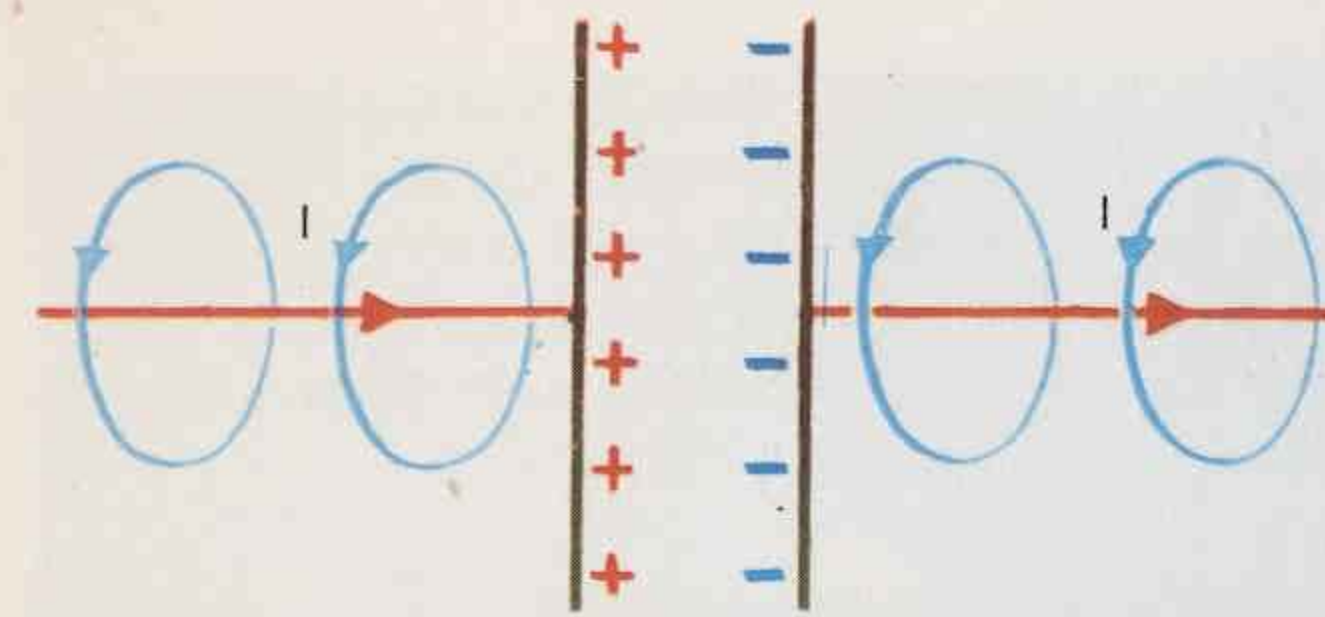
ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Consideremos, en una región del espacio donde existe un campo electromagnético periódico, un volumen pequeño  $dv$  prismático, que tenga dos caras paralelas al plano que determinan los vectores  $E$  y  $B$ . La energía debida a dichos campos que contiene el volumen

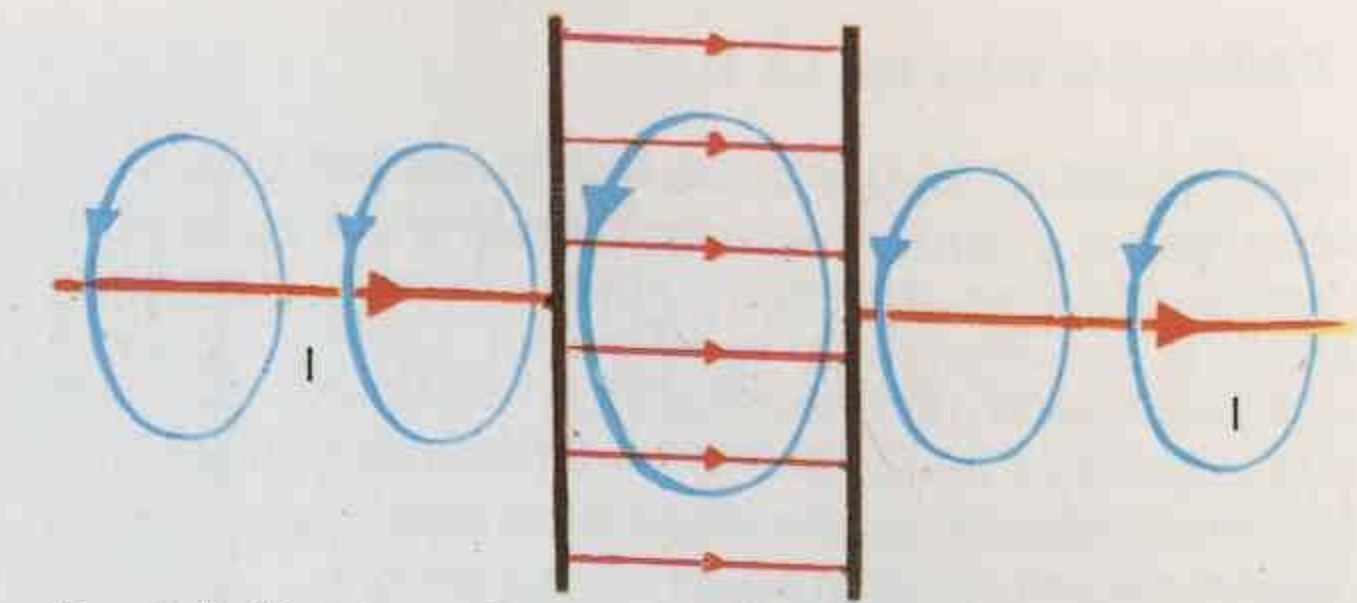
$dv$  sabemos que es igual a

$$\left(\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}\right)dv.$$

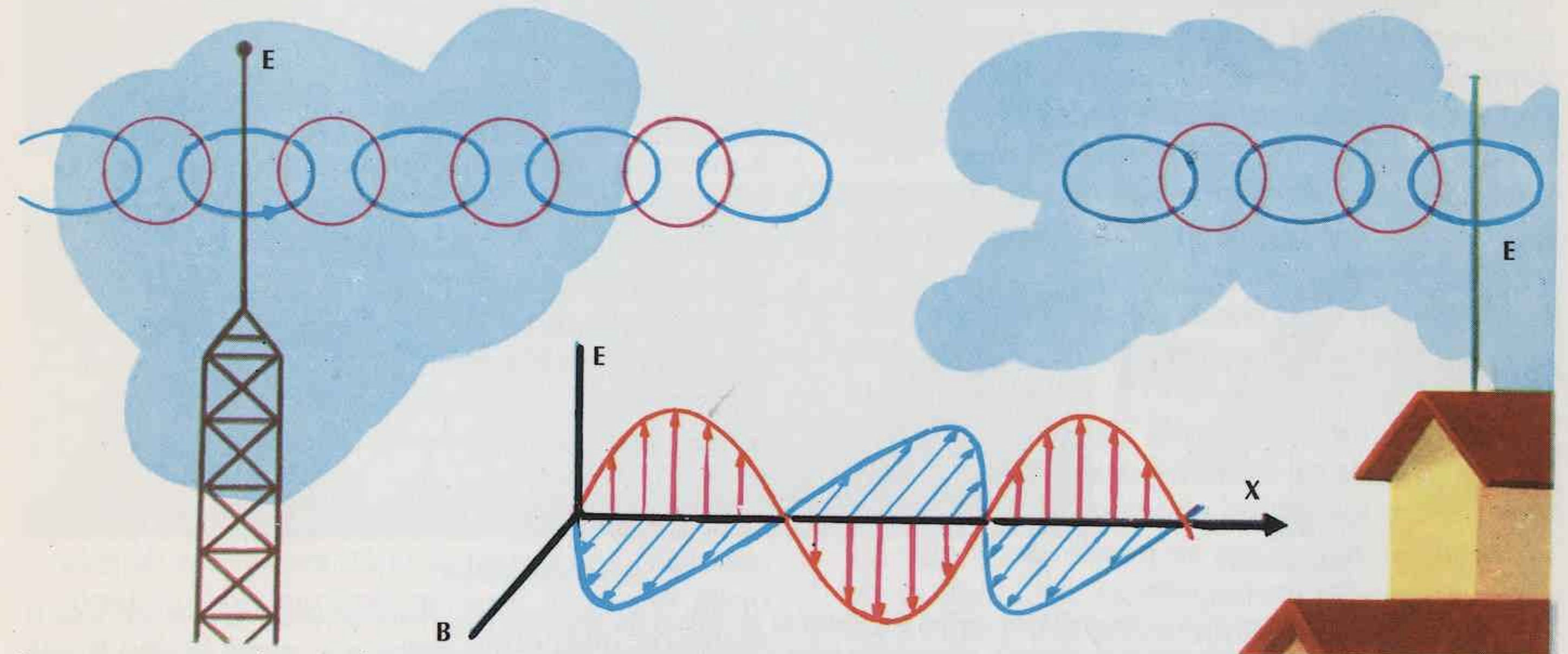
Como los campos crecen al unísono, esta energía crecerá, lo cual sólo puede ser debido a que penetre en el volumen por una de las caras paralelas a los campos. ¿Por cuál de ellas? Del estudio de la teoría electromagnética resulta que la energía del campo electromagnético se propaga siempre perpendicularmente a los campos y en el sentido en que avanzaría un sacacorchos que girase llevando  $E$  sobre  $B$  por el camino más corto. Así, pues, en la figura, la energía debe penetrar en el volumen por la cara de la izquierda. Más tarde, los campos menguan al unísono hasta anularse, lo cual significa que disminuye la energía contenida en el volumen porque sale por la cara de la derecha. Después, los campos crecen en sentidos respectivamente opuestos a los anteriores, con lo que el sentido de propagación de la energía sigue siendo el mismo, pues no se invierte el de uno solo de los campos, sino el de los dos. De esta manera, la energía del campo electromagnético se propaga por ondas, ya que tendremos una superficie que, en un instante dado, presentará máximos los campos en todos sus puntos (superficie de onda), y al cabo de un tiempo esto ocurrirá en otra superficie situada a una distancia igual a  $c \cdot t$ , donde  $t$  es el tiempo considerado y  $c$  es la velocidad de propagación de la onda electromagnética que, según los cálculos realizados en la teoría de Maxwell, es, para el vacío, muy aproximadamente igual a  $3 \cdot 10^8$  m/s, cualquiera que sea la frecuencia y amplitud del campo electromagnético. En realidad, de la teoría de Maxwell resulta que la velocidad de propagación de una onda electromagnética por un medio de permeabilidad  $\epsilon$  y permitividad magnética  $\mu$  es  $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ , y al sustituir  $\epsilon$  y  $\mu$  por sus valores para el vacío sale el anterior resultado. Ahora bien,  $\epsilon_0$  es una constante universal, pero la permitividad  $\epsilon$  de un medio cualquiera es consecuencia de la frecuencia del campo electromagnético existente en él; la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas por un medio material depende, pues, de su frecuencia.



La corriente de carga no crearía campo magnético en el dieléctrico.



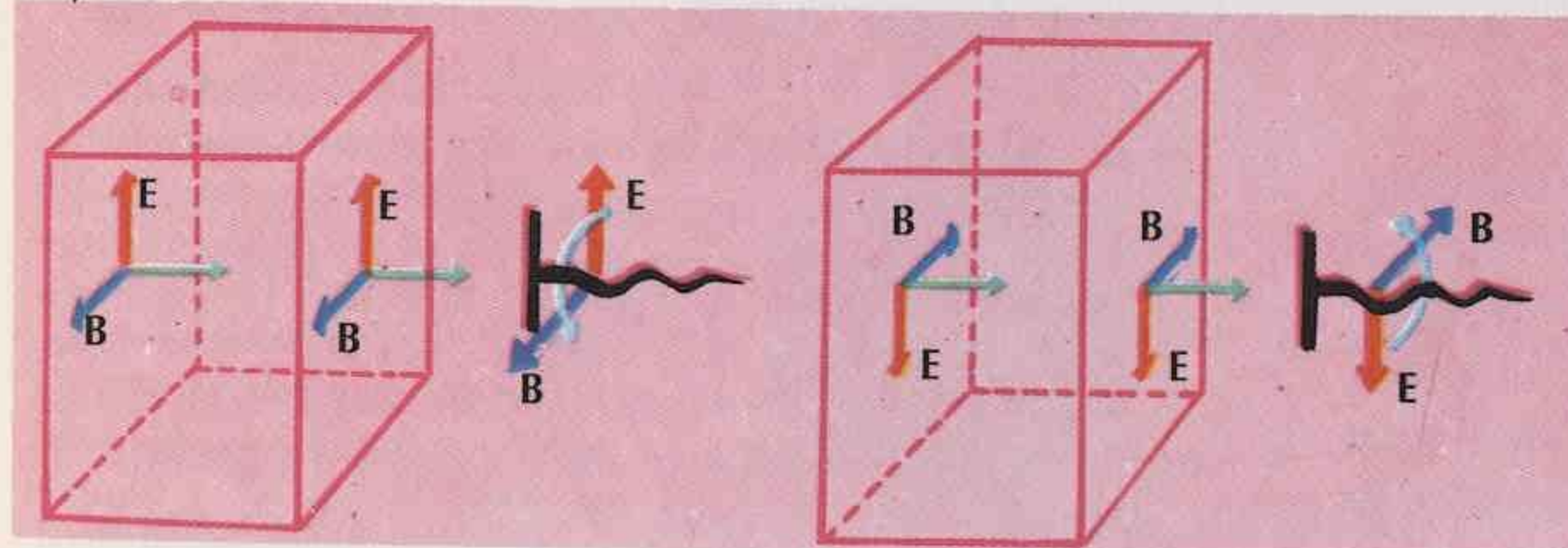
En el dieléctrico existe, en realidad, un campo magnético igual que el que crearía una distribución de corrientes de intensidad total  $I$ .



En una antena emisora existe un campo eléctrico alterno, que genera un magnético, y éste, otro eléctrico; etc.

Distribución, en un instante, del campo electromagnético a lo largo de una dirección del espacio.

En una antena receptora se induce un campo eléctrico de igual período que el electromagnético que llega a ella.



La energía se propaga en el sentido del vector verde.

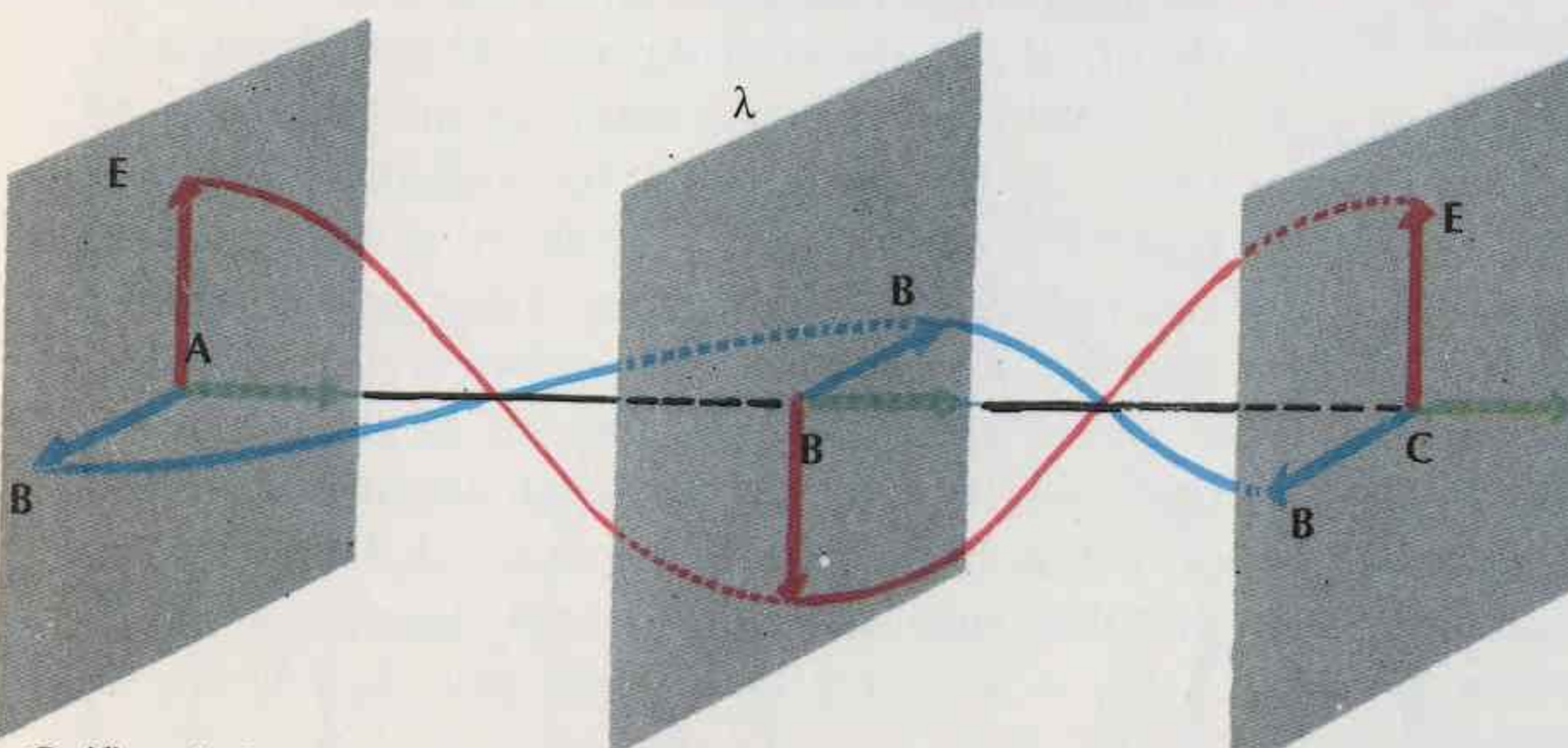
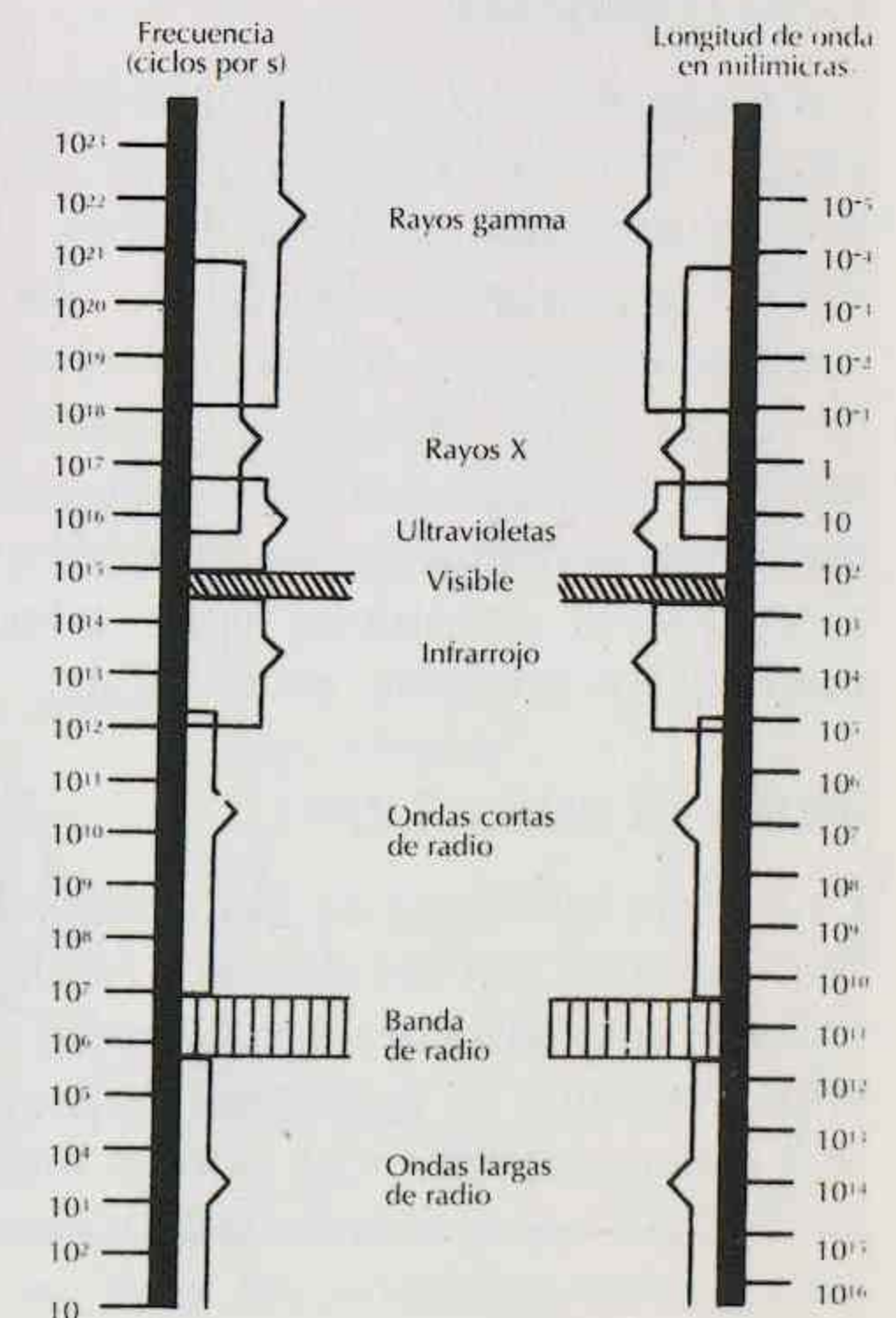


Gráfico de la propagación por ondas planas. Los planos en A, B y C son frentes de onda en los que la amplitud es máxima. La longitud de onda es  $\lambda = A C$ .



Espectro electromagnético.



# Óptica

## PROPAGACIÓN DE LA LUZ

La Óptica es la parte de la Física que estudia la luz y, en general, los fenómenos en que interviene. Desde muy antiguo, la luz fue objeto de atención por parte de los científicos, quienes intentaron medir su velocidad de propagación. El astrónomo danés Römer fue el primero en encontrar un resultado satisfactorio, que fue posteriormente corroborado por otros astrónomos, por Fizeau y Michelson, mediante medidas terrestres. La velocidad hallada era aproximadamente igual a  $3,10^8$  m/s, y como dicho valor coincidía con el calculado para la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas según la teoría de Maxwell, éste consideró que las ondas luminosas no eran otra cosa que ondas electromagnéticas, hipótesis que comprobó Hertz al reproducir con ondas de esta clase los fenómenos de reflexión y refracción, obteniendo las mismas leyes que ya se conocían para la reflexión y refracción de la luz. El carácter ondulatorio de ésta ya era cosa admitida a raíz de los trabajos de Fresnel y Foucault, sobre los cuales no vamos a entrar ahora en detalles. Así, pues, se puede decir que las radiaciones electromagnéticas de longitud de onda comprendida entre  $4.000 \text{ \AA}$  y  $7.000 \text{ \AA}$  en el vacío impresionan la retina del ojo humano y reciben el nombre de radiaciones luminosas o, más brevemente, luz ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ).

## RAYO LUMINOSO

Las trayectorias que sigue la energía transportada por la onda luminosa reciben el nombre de rayos luminosos, y, como hemos visto al estudiar la propagación de ondas electromagnéticas por el espacio, son normales a la superficie de onda. Esto deja de cumplirse cuando la onda se propaga por un medio anisótropo, es decir, cuyas propiedades dependen de la dirección que se considere; entre tales medios se cuentan los cristales, en general.

## ÍNDICE DE REFRACCIÓN

Una onda luminosa de frecuencia determinada se propagará por los distintos medios con velocidades que son características de cada uno de ellos. Más que la velocidad de propagación de una radiación luminosa por un medio, se utiliza en óptica el índice de refracción  $n$  del medio para dicha radiación, el cual se define por  $n = c/v$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el

vacío y  $v$  la velocidad de la radiación considerada por el medio en cuestión. Como  $v$  depende de la frecuencia de la radiación, también tendremos, para un medio determinado, un índice de refracción distinto para cada radiación.

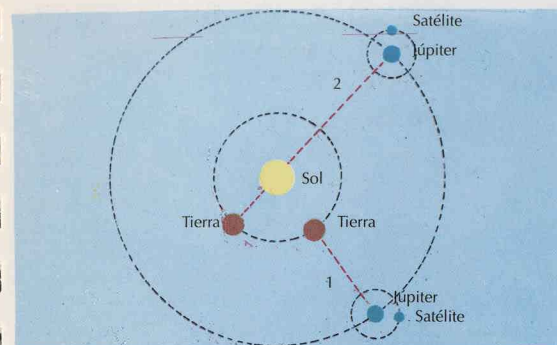
## PRINCIPIO DE HUYGENS-FRESNEL

El mecanismo de propagación y los fenómenos que sufren los movimientos ondulatorios de cualquier clase pueden interpretarse con ayuda del principio de Huygens, que Fresnel, en su intento de probar la naturaleza ondulatoria de la luz, adaptó al caso de las ondas luminosas. Tal principio dice que *todo punto alcanzado por una onda se convierte en centro emisor de perturbaciones secundarias de igual frecuencia, constituyendo la envolvente de ésta el nuevo frente de onda*. Según este enunciado de Huygens se generarían dos frentes de onda, uno que se propagaría en el mismo sentido que el movimiento ondulatorio (onda progresiva) y otro en sentido opuesto (onda regresiva). La modificación de Fresnel consistió en demostrar la no existencia de esta onda regresiva, que se destruía por un fenómeno de interferencias.

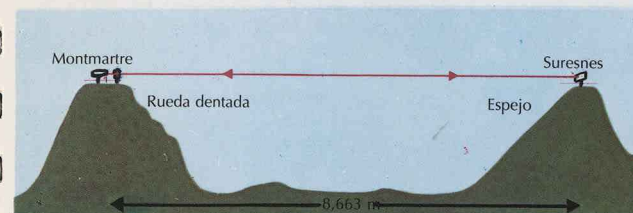
## REFLEXIÓN

Cuando la luz incide sobre la superficie de separación de dos medios diferentes, los puntos de dicha superficie se convierten en centros emisores de perturbaciones secundarias cuya envolvente constituye la nueva onda. La velocidad de propagación de estas perturbaciones por el medio en que se propaga la onda incidente será igual a la de ésta. En un instante determinado, la onda incidente  $AB$  alcanza el punto  $A$  de la superficie reflectora; al cabo de un tiempo  $t$  llega al  $A_1$ ; después de  $2t$ , al  $A_2$ ; de  $3t$ , al  $A_3$ ; de  $4t$  al  $A_4$ , etc. Al ser alcanzado el punto  $A$ , emite una onda secundaria que, al cabo de un tiempo  $4t$ , ha llegado hasta los puntos a distancia  $v \cdot 4t$  de  $A$ , donde  $v$  es la velocidad de propagación. Estos puntos constituyen un frente de onda esférico de radio  $AB_1 = v \cdot 4t$ . En el mismo instante, la onda secundaria emitida por  $A_1$ , al ser alcanzado un tiempo  $t$  más tarde, tendrá un radio  $A_1B'_1 = v \cdot 3t$ , mientras que la emitida por  $A_2$  tendrá un radio  $A_2B'_2 = v \cdot 2t$  y la emitida por  $A_3$ ,  $A_3B'_3 = v \cdot 3t$ .

(Continúa en la TARJETA D/4)



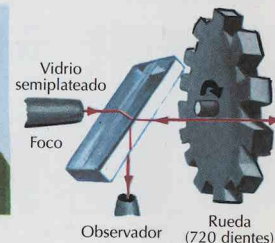
Método de Römer. La luz procedente del satélite de Júpiter, cuando la Tierra y Júpiter están alineados según (2), recorre una distancia superior a la de (1) en el diámetro de la órbita terrestre. En la alineación (2), el satélite se veía salir con un retraso de 16 mn 26 s respecto al tiempo correspondiente a (1). Dividiendo el diámetro de la órbita terrestre por ese retraso, obtuvo Römer la velocidad de la luz.



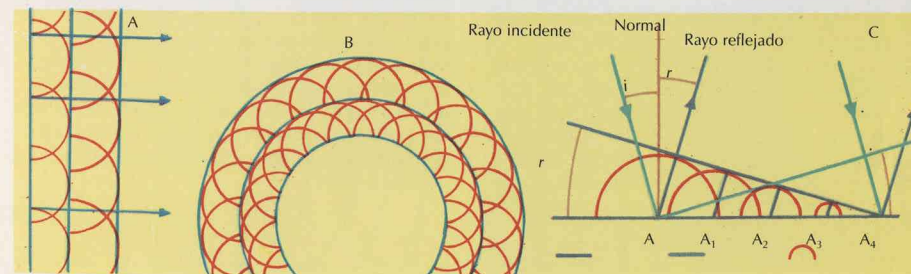
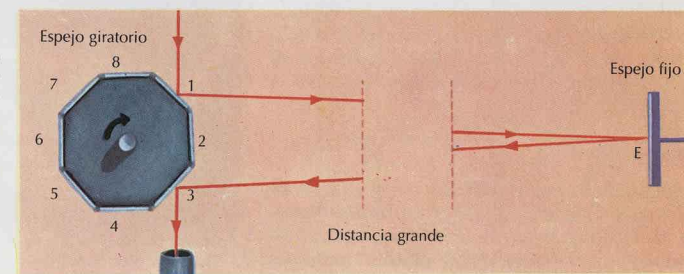
Método de Fizeau.

El rayo atraviesa el vidrio semiplatado, pasa por un hueco de la rueda, se refleja en el espejo y, si al volver halla un diente, no pasa. Si halla un hueco, sí; se refleja en el vidrio semiplatado y va al observador. Cuando la rueda daba 12 vueltas/s, no pasaba el rayo; si 24, sí. Dividiendo  $2 \times 8,633$  por el tiempo que tarda el hueco en ser sustituido por el diente (o el hueco) inmediato ( $1/17.280$  s), se halla la velocidad de la luz en km/s.

Detalle del observatorio de Montmartre.



Método de Michelson. Cuando el tiempo que emplea el rayo en recorrer el camino 1E3 es igual al que tarda la cara (2) en ocupar el sitio de la (3), el observador ve el rayo. Si no, no. Dividiendo la distancia recorrida por el rayo por dicho tiempo ( $1/8$  de período), se tiene la velocidad de la luz.



Propagación según el principio de Huygens. En A, ondas planas; en B, ondas esféricas. En C, reflexión de ondas.

REFRACCIÓN, DISPERSIÓN Y DIFRACCIÓN

REFRACCIÓN

Estudiamos ahora la propagación por el segundo medio de las perturbaciones secundarias. Si los medios son diferentes, la velocidad de propagación no es la misma en uno que en otro medio. Llamemos  $v_1$  a la correspondiente al primer medio y  $v_2$  a la del segundo. En el tiempo  $4t$  la onda incidente ha recorrido la distancia  $BA_4 = v_1 \cdot 4t$ , mientras la onda secundaria emitida por  $A$  habrá recorrido  $AC = v_2 \cdot 4t$ . Llamando  $r'$  al ángulo que forma la onda transmitida con la superficie de separación de los medios, o ángulo de refracción, se tiene:

$$BA_4 = AA_4 \operatorname{sen} i, AC = AA_4 \operatorname{sen} r',$$

y dividiendo

$$\frac{BA_4}{AC} = \frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r'}$$

y como

$$\frac{BA_4}{AC} = \frac{v_1}{v_2} \frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r'} = \frac{v_1}{v_2}$$

que puede escribirse en la forma

$$\frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r'} = \frac{c : v_2}{c : v_1} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21},$$

donde  $n_1$  es el índice de refracción del primer medio,  $n_2$  el del segundo, y  $n_{21}$  recibe el nombre de *índice de refracción relativo* del segundo miembro respecto al primero. La fórmula anterior, junto con el hecho de que el rayo incidente, el refractado y la normal están en un mismo plano, constituyen las dos leyes de la refracción.

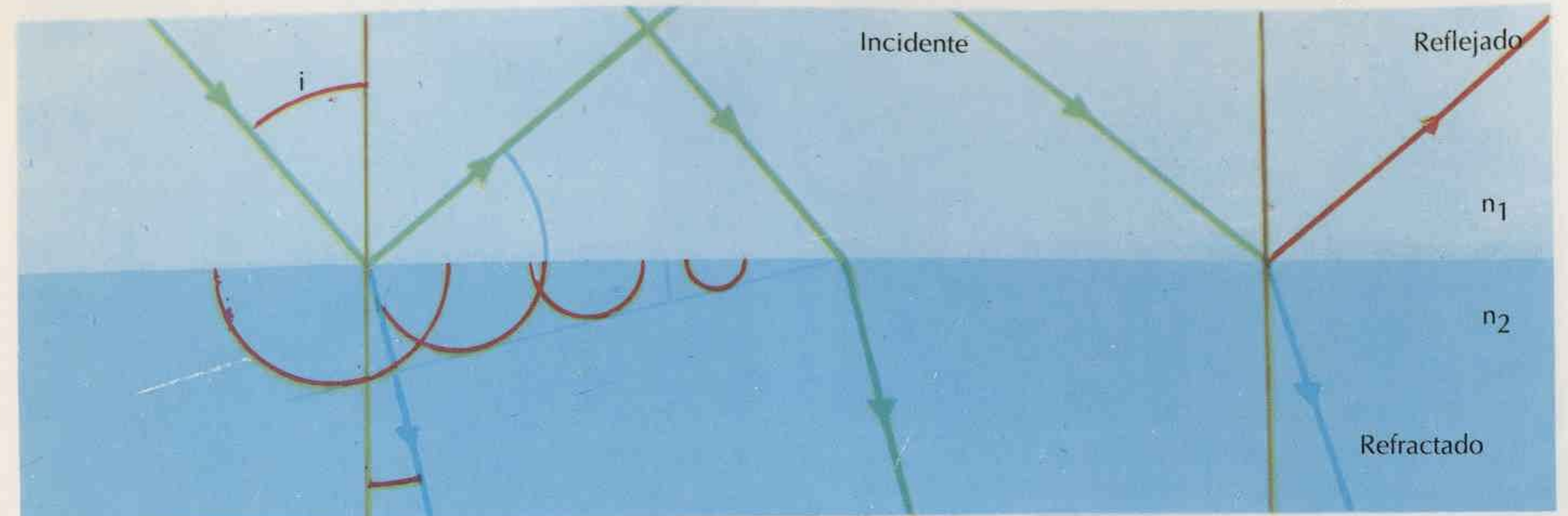
DISPERSIÓN

Hemos dicho que el índice de refracción de un material cualquiera depende de la frecuencia, y, si no nos salimos de las frecuencias correspondientes a radiaciones visibles, podemos afirmar, además, que es función creciente de la frecuencia. Esto significa que los fenómenos de refracción serán más acentuados para las radiaciones de frecuencias elevadas que para las de frecuencias bajas. Este fenómeno se pone fácilmente de manifiesto haciendo pasar luz blanca (que es la que contiene todas las radiaciones visibles) a través de un prisma, pues en éste los rayos sufren dos refracciones consecutivas que

originan desviaciones importantes. Se ve, entonces, que las radiaciones de menor frecuencia, las rojas se desvían mucho menos que las de frecuencia más elevada, cual son las violeta. A este fenómeno se da el nombre de *dispersión*.

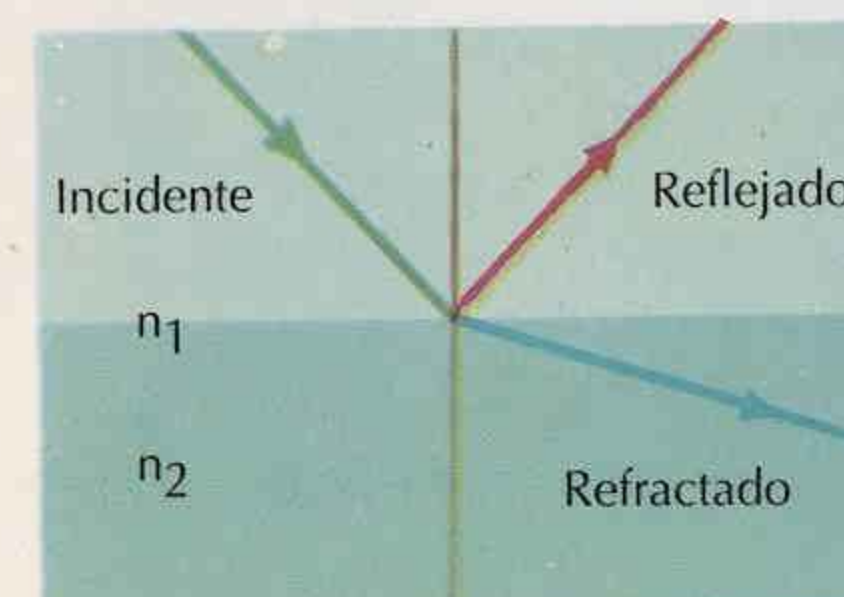
DIFRACCIÓN

Veamos qué nos dice el principio de Huygens en el caso de un tren de ondas planas que alcancen un obstáculo en el que exista un orificio pequeño. Entonces, los puntos del obstáculo y del orificio se convierten en centros emisores de ondas secundarias, ya que, exceptuando las generadas en el orificio, las demás no pueden progresar y forman la onda reflejada que regresa, mientras que las del orificio pasan al segundo medio, donde se propagan en forma de ondas esféricas. La dirección de propagación de las ondas (rayos) se ha desviado al llegar al obstáculo, y a este fenómeno se le llama *difracción*. Se ha alterado, pues, la propagación rectilínea. Como con el principio de Huygens puede explicarse la difracción, además de la reflexión y refracción, admitiremos como bueno dicho principio. La difracción era fenómeno ya conocido en tiempos de Newton, aunque en otros movimientos ondulatorios. La difracción del sonido por una puerta o ventana la experimentamos a diario; en cambio, la difracción de la luz no es fácil de observar, y ello fue lo que indujo a Newton a no considerarla como movimiento ondulatorio. El orificio que hemos considerado antes dijimos que era pequeño, pero el fenómeno descrito puede materializarse en una cubeta con agua en la que se provocan las ondas planas mediante un listón que golpea periódicamente la superficie del agua. Aumentemos ahora el tamaño del orificio separando poco a poco los diques que lo forman. Cuando la abertura sea de dimensiones bastante superiores a la longitud de onda del movimiento veremos que los fenómenos de difracción son mucho menos perceptibles, es decir, que para que se hagan bien patentes es preciso que las dimensiones del orificio, obstáculo o agente difractor sean del mismo orden de magnitud que la longitud de onda del movimiento. Como la longitud de onda de la luz es tan corta, se comprende que sea difícil poner de manifiesto la difracción de la luz con los objetos usuales.

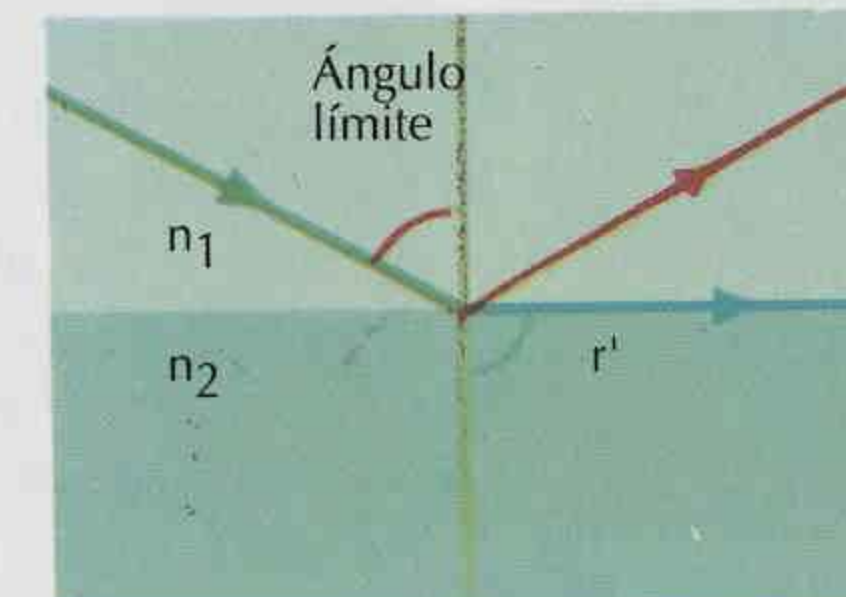


Refracción: en verde, onda incidente; en azul, onda transmitida; en rojo, onda reflejada.

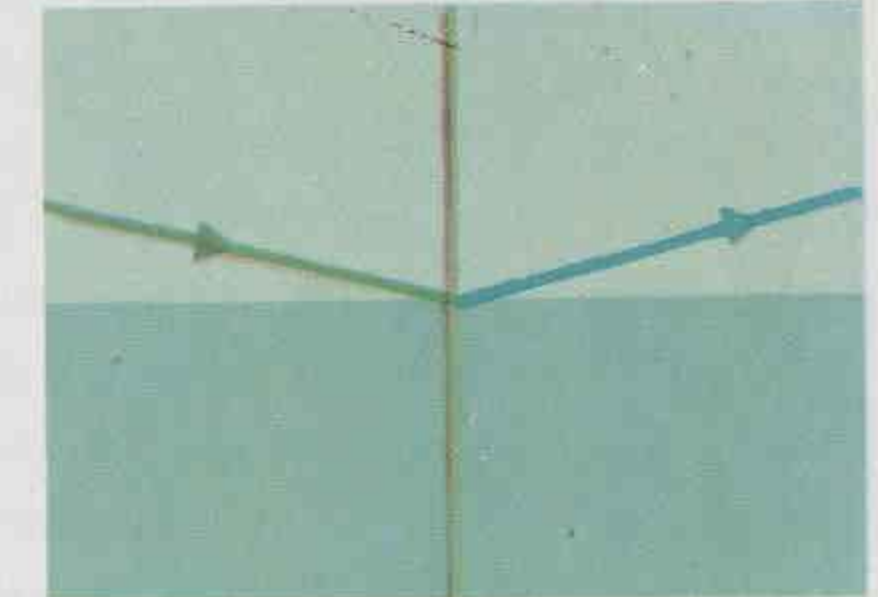
Si el segundo medio es más refringente que el primero ( $n_2 > n_1$ ), el rayo refractado se acerca a la normal.



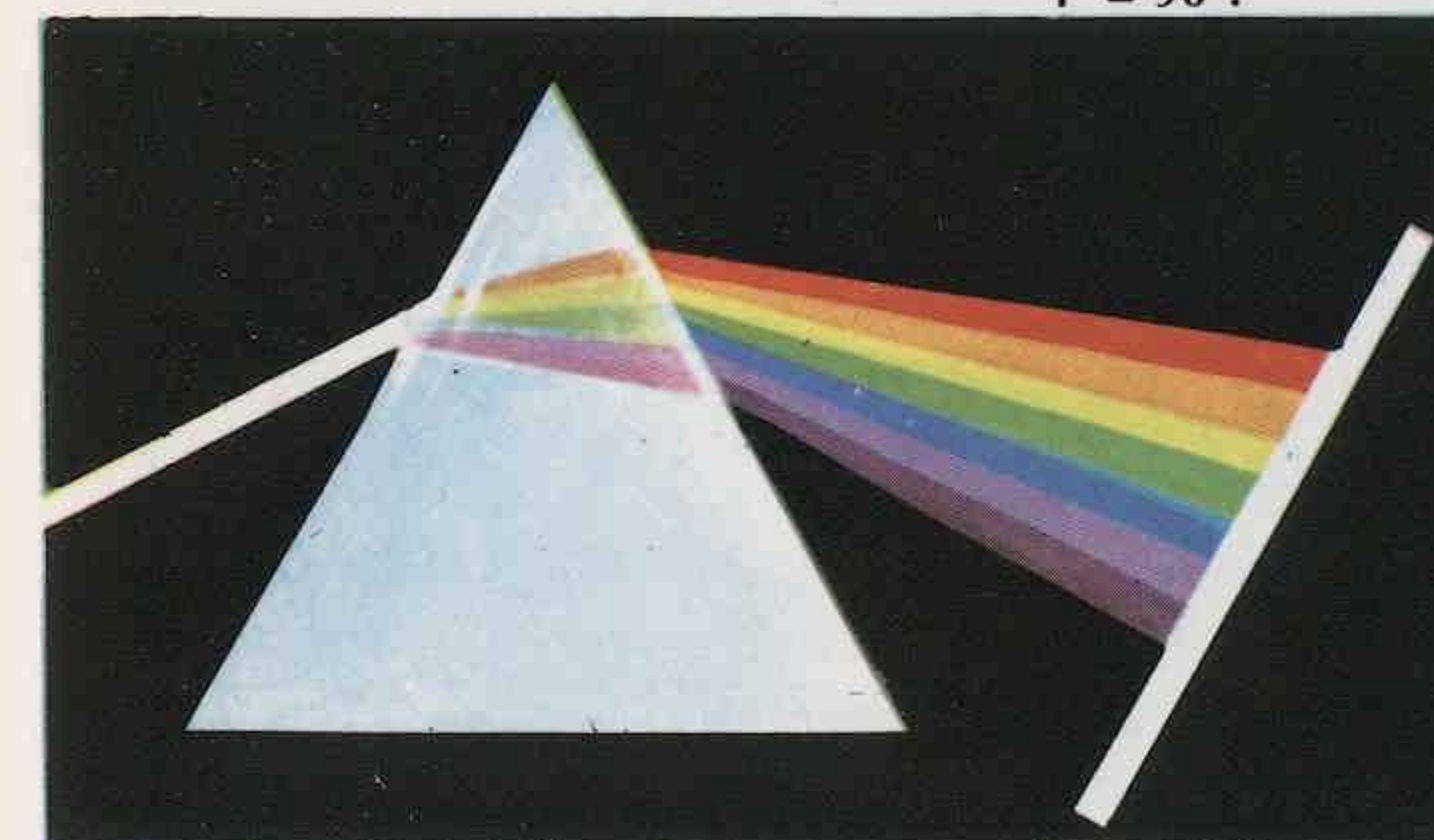
Si el segundo medio es menos refringente que el primero ( $n_2 < n_1$ ), el rayo reflejado se aleja de la normal.



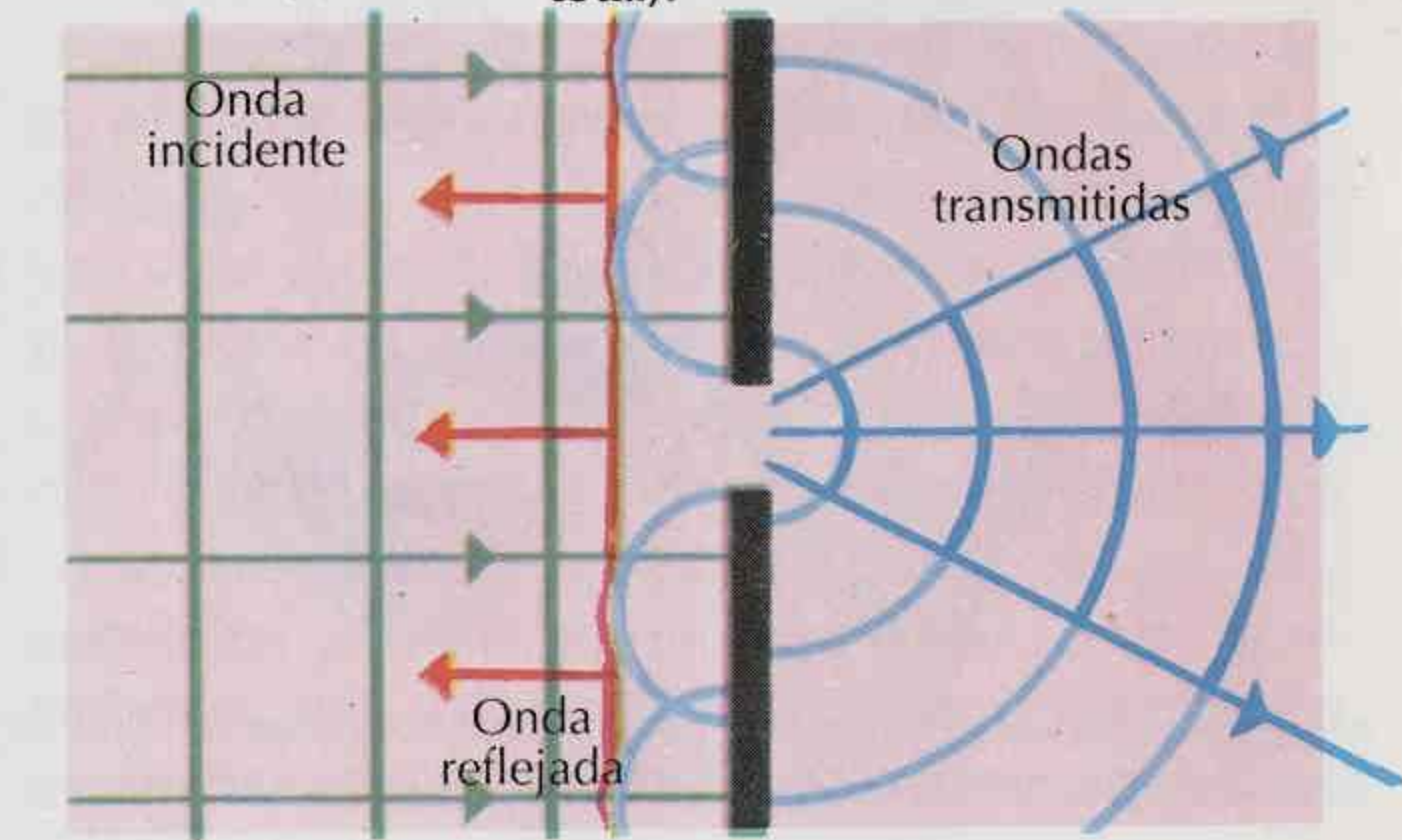
Cuando se dan las circunstancias anteriores, existe un ángulo de incidencia (límite) al que corresponde  $r' = 90^\circ$ .



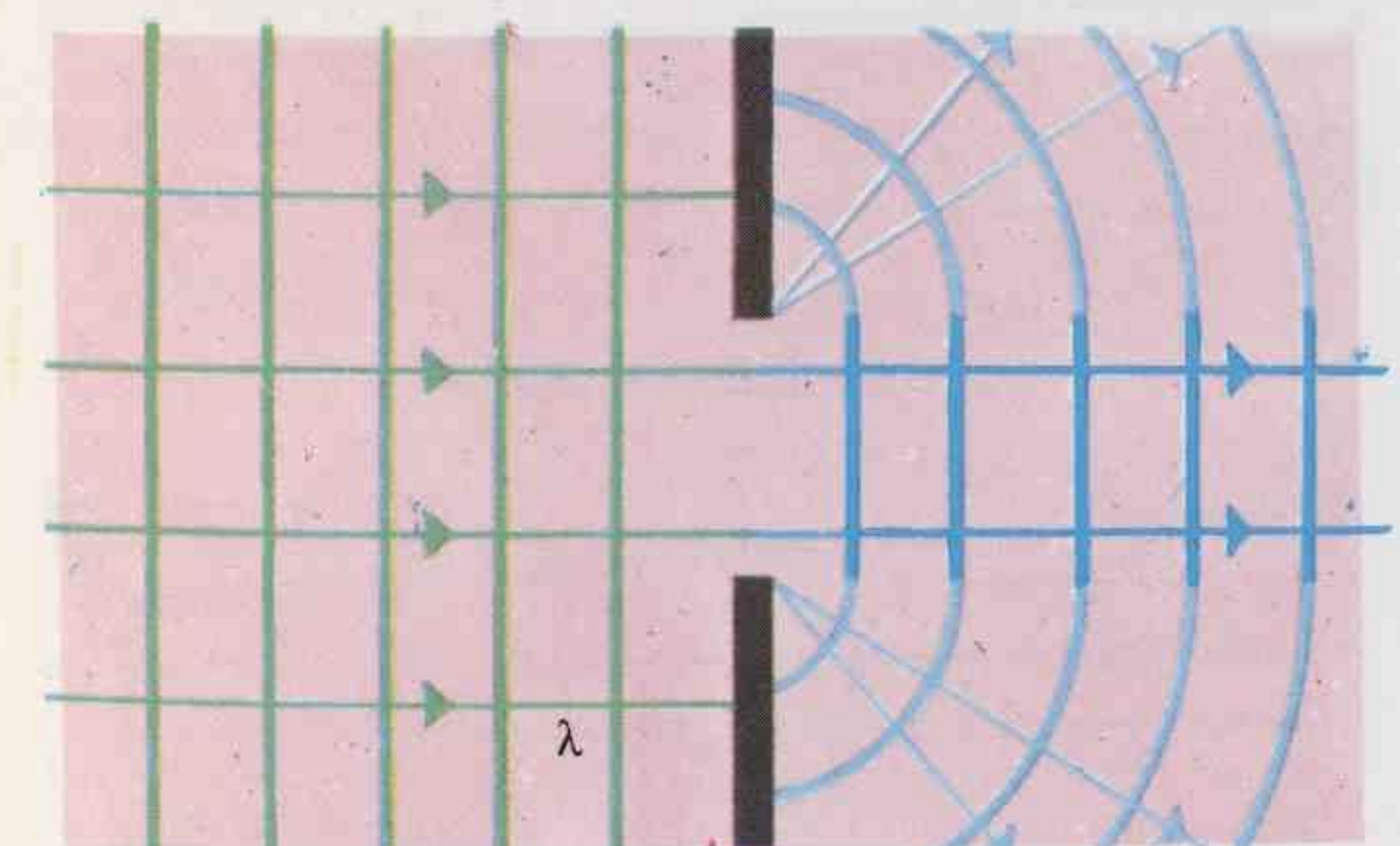
Si el ángulo de incidencia es superior al ángulo límite, no hay rayo refractado, sino que es reflejado (reflexión total).



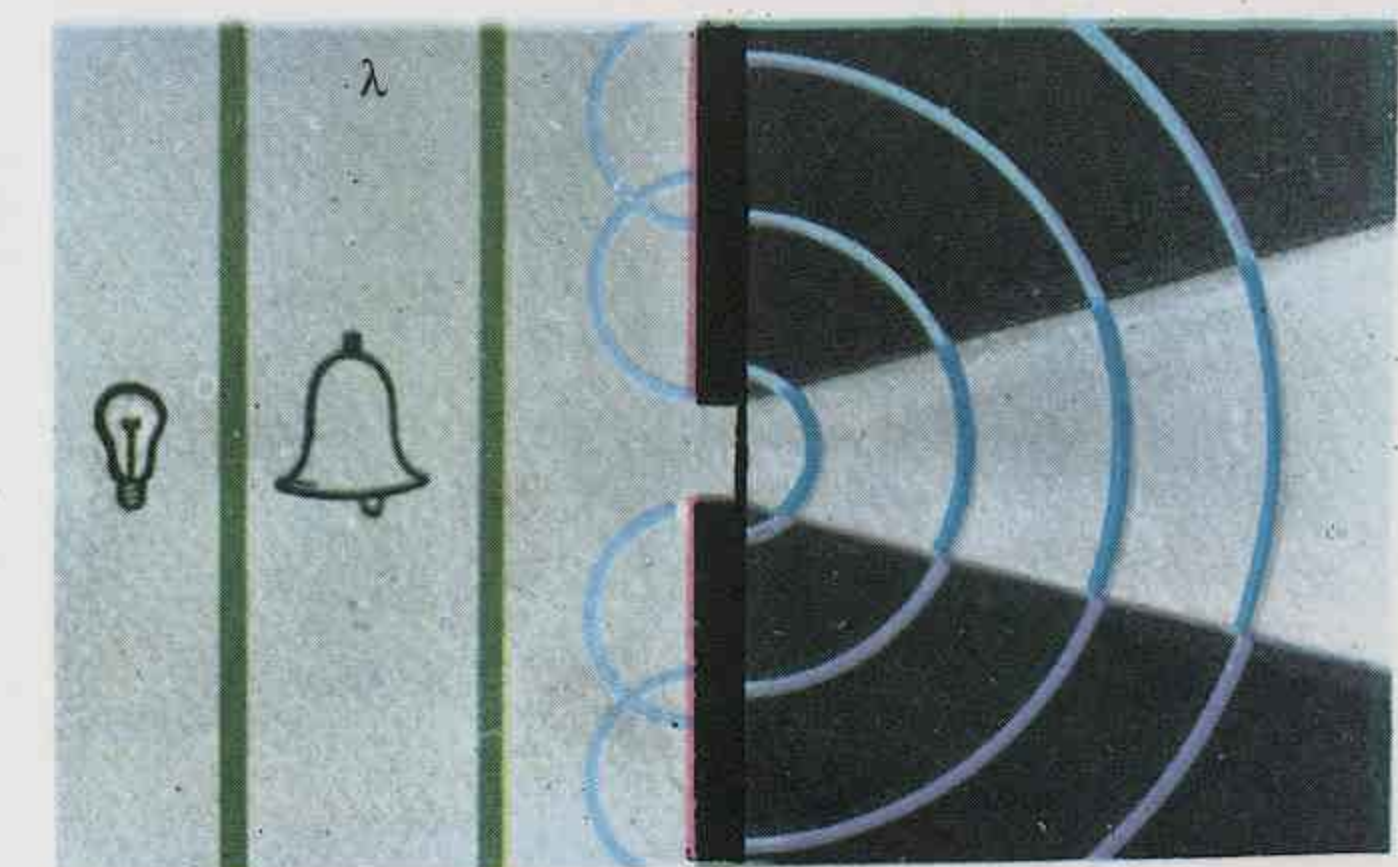
Dispersión de la luz por medio de un prisma triangular de cristal.



Difracción por un orificio.



Al hacerse, el orificio, mayor, los fenómenos de difracción son menos importantes.



Una ventana difracta perfectamente el sonido ( $\lambda \approx 1 \text{ m}$ ), pero no la luz ( $\lambda \approx 10^{-7} \text{ m}$ ).

INTERFERENCIAS Y POLARIZACIÓN

Otro fenómeno característico de los movimientos ondulatorios es el de las *interferencias*, que vamos a examinar rápidamente. En primer lugar, llamaremos *focos coherentes* a dos centros emisores de ondas de igual frecuencia y que mantengan invariable su diferencia de fase. Para mayor sencillez, podemos considerar que se hallan constantemente en concordancia de fase. La superposición de los movimientos ondulatorios procedentes de dos focos coherentes recibe el nombre de *interferencia*. Resulta muy difícil conseguir focos coherentes, si no es mediante un dispositivo que los proporcione a partir de un foco único. Los modernos *laser* constituyen una excepción a lo dicho, pero no estamos en condiciones de estudiarlos aquí, por lo que nos limitaremos a indicar cómo pueden lograrse por medios clásicos. En la lámina se ha representado, de entre éstos, las ventanas de Young, los espejos de Fresnel y el biprisma de Fresnel y la bilente de Billet.

El aspecto más interesante del fenómeno de las interferencias luminosas es el mayor o menor brillo (u oscuridad) que existe en un punto cualquiera al superponerse las dos ondas. Si ambas se hallan en concordancia de fase, los dos vectores eléctricos tendrán siempre el mismo sentido y darán como resultante otro vector eléctrico de igual sentido y módulo igual a la suma de los módulos; la amplitud resultante será, pues, igual a la suma de las amplitudes, y la energía luminosa que incide en el punto de superposición considerado será muy grande. Colocando en él una pantalla, se verá muy brillante. Esto ocurre en los puntos en los que la diferencia de marcha de los dos rayos es nula o es un múltiplo de la longitud de onda, y se dice que en tal punto se tiene *interferencia constructiva*. En otros puntos, en cambio, las ondas estarán en oposición de fase, los dos vectores eléctricos serán de sentidos contrarios y su

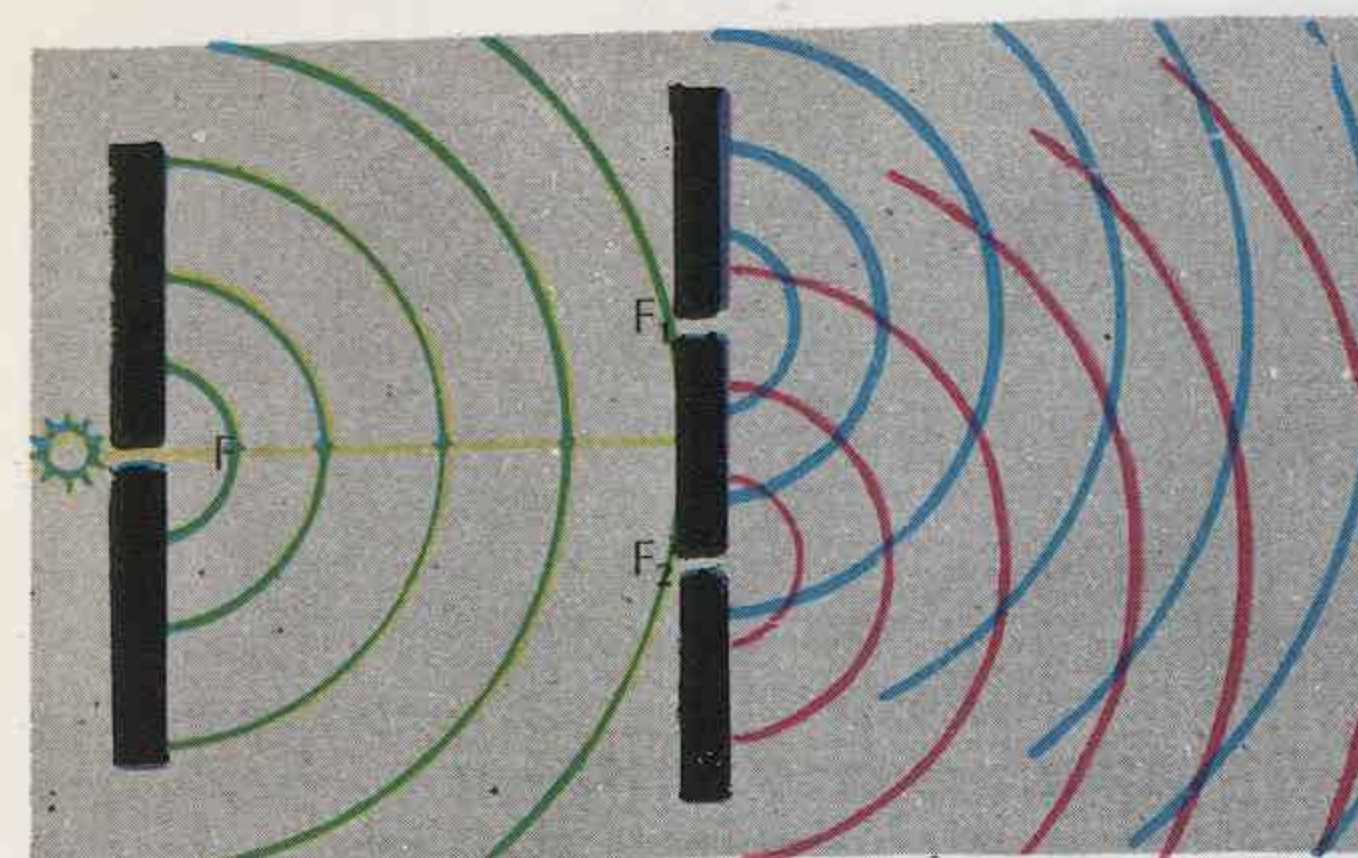
resultante tendrá por módulo la diferencia de los módulos. Con los dispositivos que hemos mencionado y representado para producir focos coherentes, los dos vectores eléctricos componentes son de igual módulo, con lo que la diferencia es nula. Por tanto, en dicho punto existirá oscuridad absoluta, pues la energía lumínica que sobre él incide es nula. Esto ocurre en los puntos en que los rayos que interfieren llevan una diferencia de marcha de un número impar de semilongitudes de onda, según puede apreciarse en la figura adjunta. Se dice entonces que se produce *interferencia destructiva*. En los puntos situados entre los de interferencia constructiva y los de destructiva la intensidad luminosa será intermedia. De esta manera, sobre una pantalla situada en la región en que se superponen las ondas procedentes de los dos focos coherentes podrán recogerse *franja de interferencia* si los focos son rendijas. En el centro de la pantalla se tendrá siempre una franja brillante correspondiente a diferencia de marcha nula, pues el centro de la pantalla es el punto equidistante de los dos focos coherentes (señalado *O* en las figuras). Llamando *a* a la separación entre los focos coherentes y *D* a la distancia entre éstos y la pantalla, un cálculo muy sencillo demuestra que las franjas brillantes se hallan a distancias de la franja central en *O* iguales a

$$0, \frac{D\lambda}{a}, \frac{2D\lambda}{a}, \frac{3D\lambda}{a} \dots$$

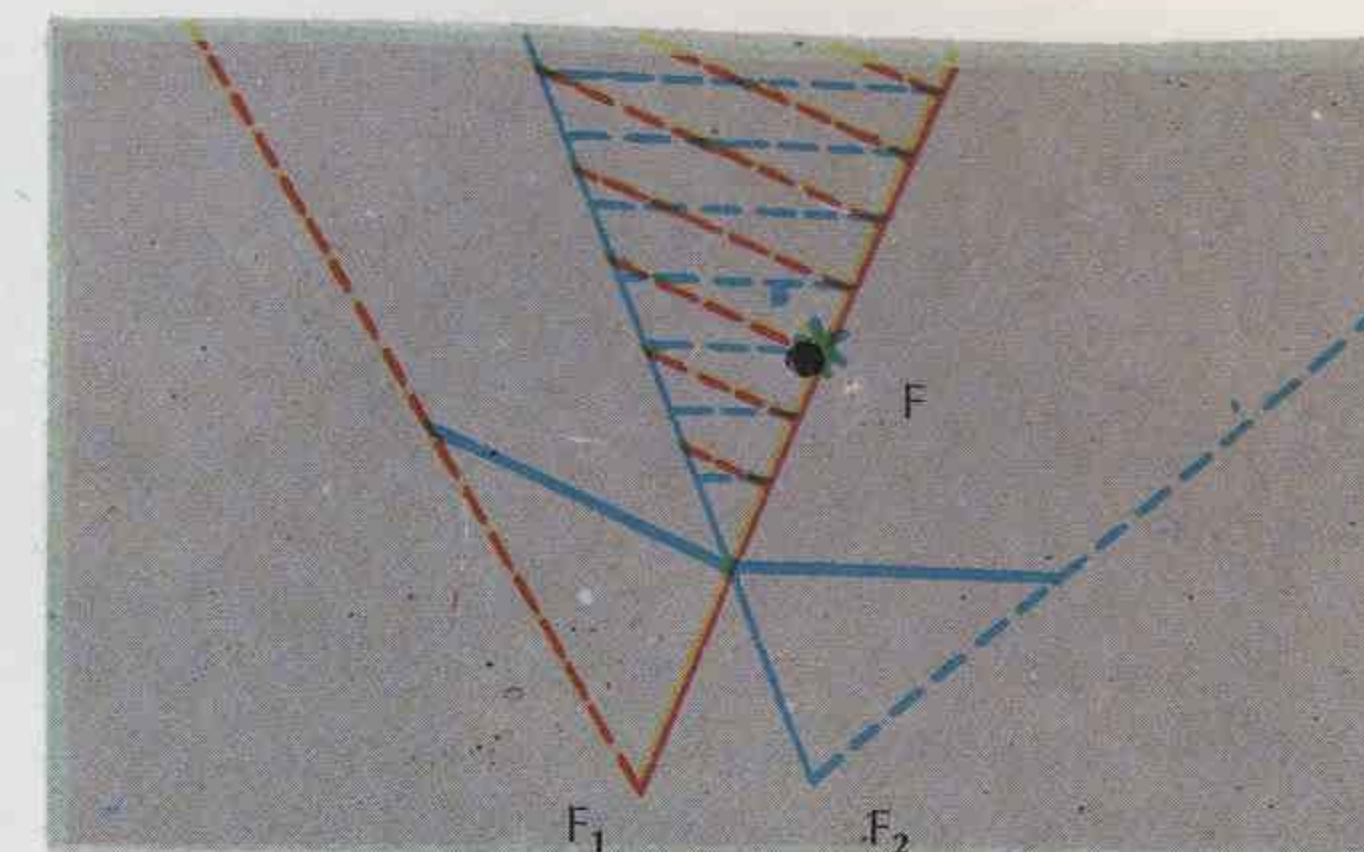
y las franjas oscuras a

$$\frac{D\lambda}{2a}, \frac{3D\lambda}{2a}, \frac{5D\lambda}{2a} \dots$$

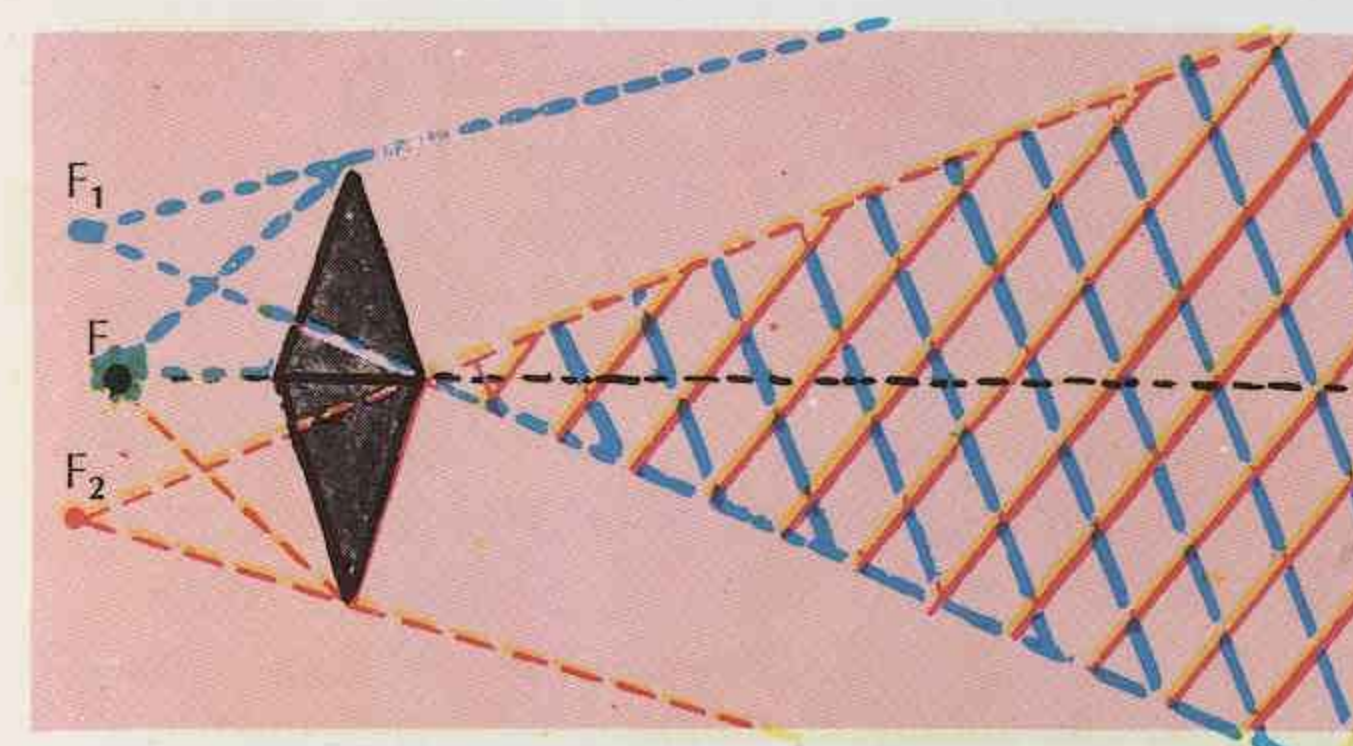
Se comprende, pues, que esto nos permite determinar con facilidad la longitud de onda de la luz empleada, sin más que medir la distancia de una franja cualquiera al centro de la franja brillante central.



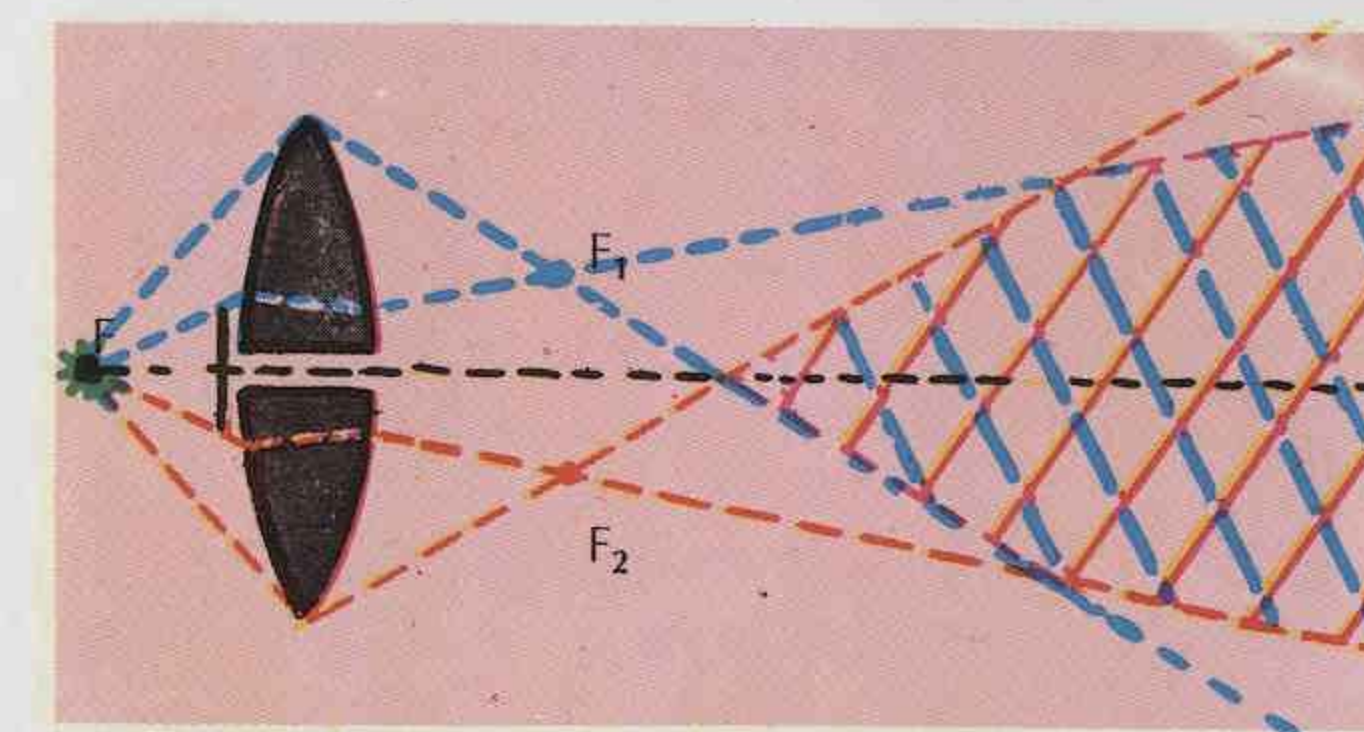
Ventanas de Young. A los orificios  $F_1$  y  $F_2$  llega una misma superficie de ondas; serán, pues, focos coherentes.



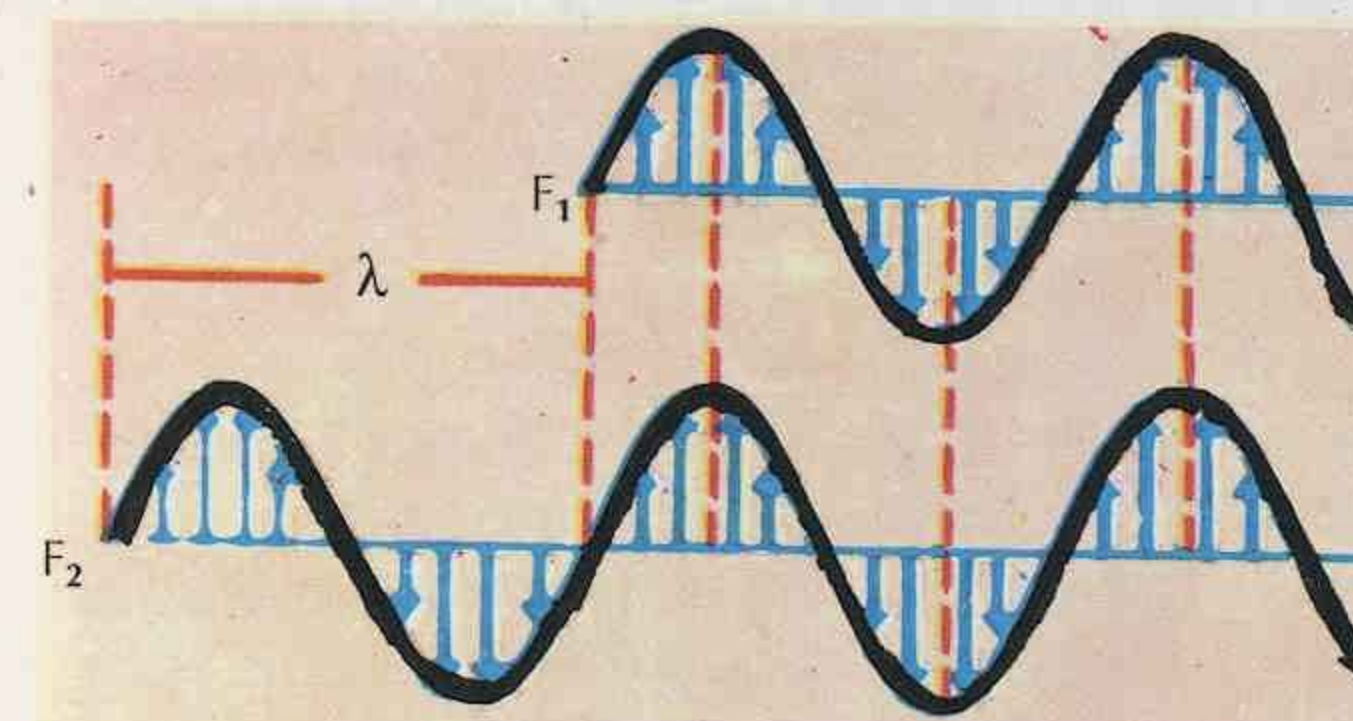
Espejos de Fresnel. Las imágenes  $F_1$  y  $F_2$  del foco  $F$ , dadas por los dos espejos, constituyen dos focos coherentes. En la zona sombreada se producen las interferencias.



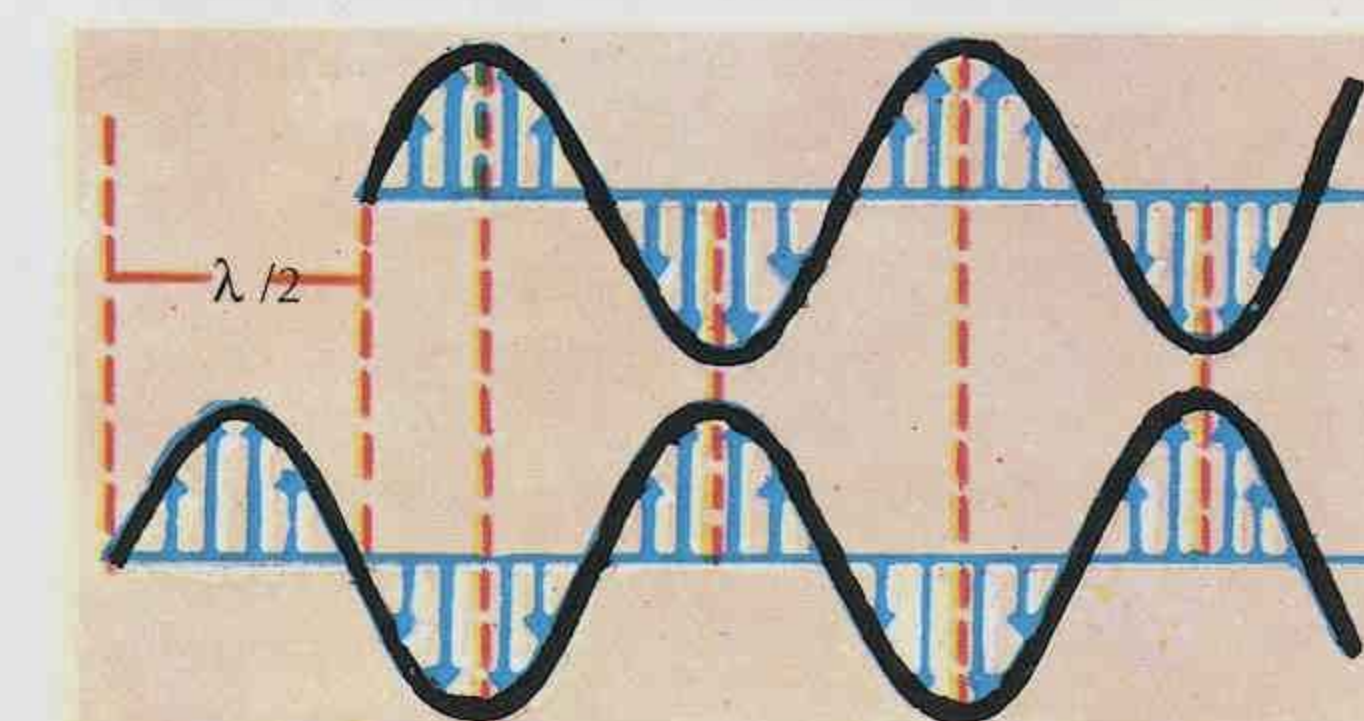
Biprisma de Fresnel. Las imágenes  $F_1$  y  $F_2$  del foco  $F$ , dadas por los dos prismas, constituyen dos focos coherentes. En la zona sombreada se producen las interferencias.



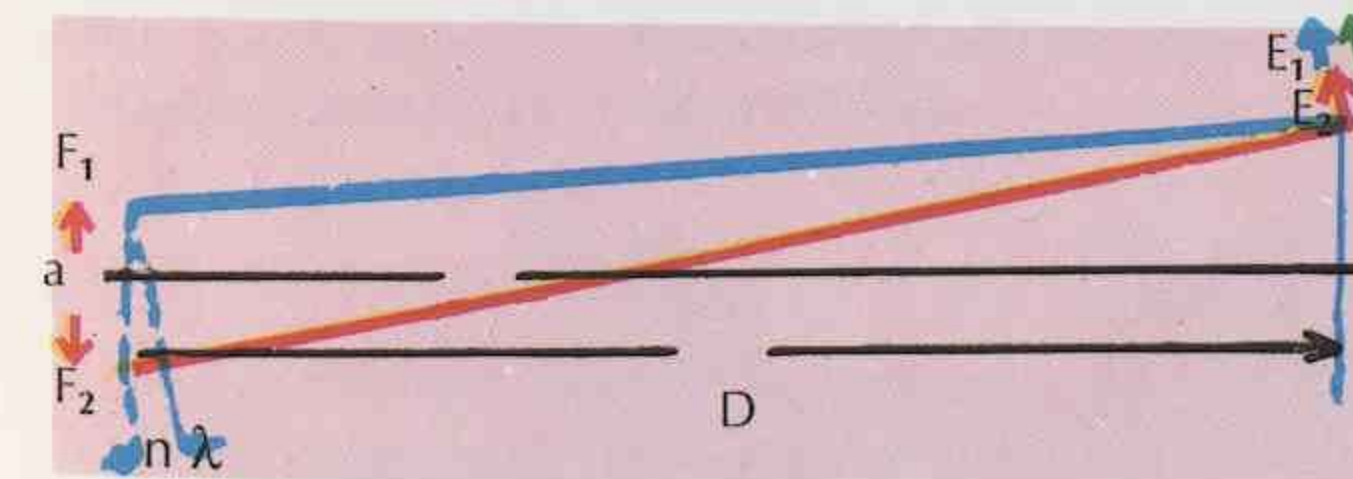
Bilente del Billet. Una lente partida en dos da dos imágenes  $F_1$  y  $F_2$  de un foco  $F$ , que constituyen dos focos coherentes.



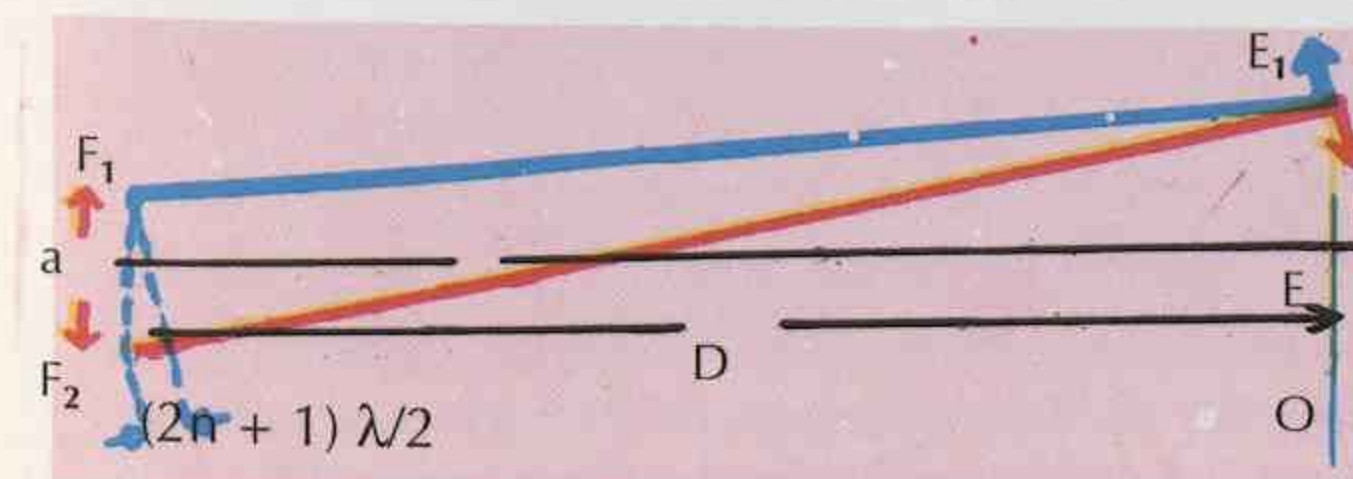
Si la diferencia de marcha entre dos rayos coherentes es de un número entero de longitudes de onda, estos rayos están siempre en concordancia de fase.



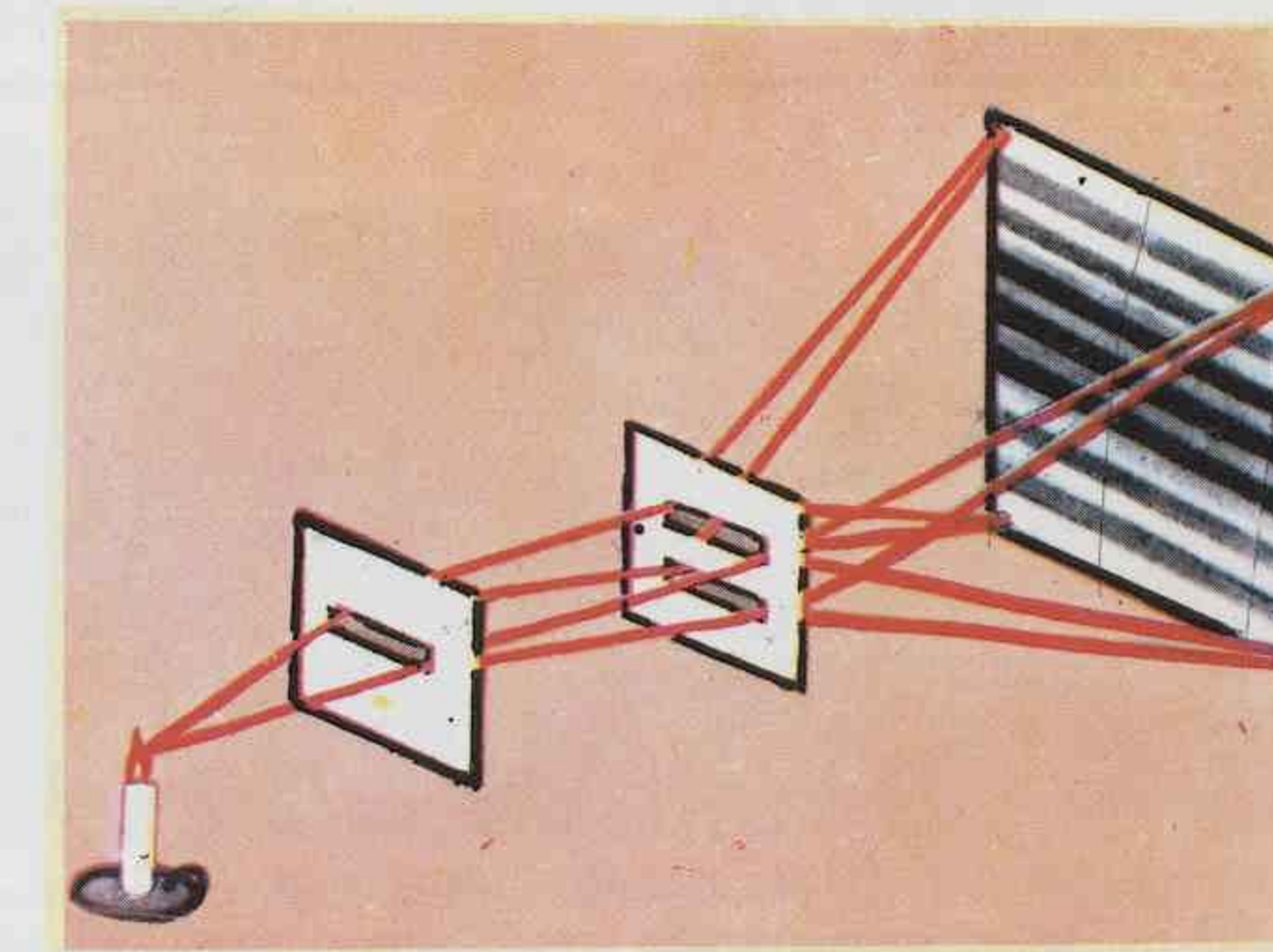
Si la diferencia de marcha entre dos rayos coherentes es de un número impar de semilongitudes de onda, estos rayos están siempre en oposición de fase.



Interferencia constructiva.



Interferencia destructiva.



Franjas de interferencia.

**POLARIZACIÓN**

Los fenómenos ópticos que hemos visto hasta el momento eran ya conocidos con anterioridad a la presentación por Maxwell de la teoría electromagnética de la luz, y constituyeron evidencias de que la luz se propaga por ondas, pero nada puede afirmarse acerca de si dichas ondas son longitudinales o transversales a partir de los fenómenos mencionados, pues son comunes a unas y otras. No obstante, existe un tercer fenómeno que ya indicó a los físicos anteriores a Maxwell que se trata de una propagación por ondas transversales; es éste el de la *polarización* de la luz. Cuando la vibración que se transmite tiene lugar en una dirección fija (perpendicular a la de propagación) se dice que la onda está polarizada en un plano, llamándose al plano normal a la dirección de vibración *plano de polarización*. Es decir, la luz polarizada mantiene siempre el vector eléctrico paralelo a una dirección fija, y el plano de polarización es el normal a ésta y contiene el rayo.

La luz natural no suele estar polarizada, lo cual significa que si pudiéramos mirar de frente un rayo de luz veríamos el vector eléctrico vibrando por igual en todas las direcciones perpendiculares al rayo. Lo que en realidad ocurre es que los focos luminosos, en general, emiten una serie de trenes de ondas muy cortos (del orden del metro de longitud), cada uno de ellos polarizado en una dirección diferente, y ello hace que pueda observarse una simetría casi perfecta en torno al rayo. Determinados dispositivos suprimen algunas direcciones de vibración o reducen la amplitud de vibración según ellas, y entonces se dice que la luz está *parcialmente polarizada*. Eso ocurre con el rayo reflejado cuando el incidente no está polarizado. Pero en este caso, variando el ángulo de incidencia puede conseguirse que el rayo reflejado y el refractado sean perpendiculares, y enton-

ces el reflejado está totalmente polarizado en el plano de incidencia, es decir, el vector eléctrico del rayo reflejado es normal al plano determinado por el rayo y la normal. Este hecho se conoce con el nombre de *ley de Brewster*.

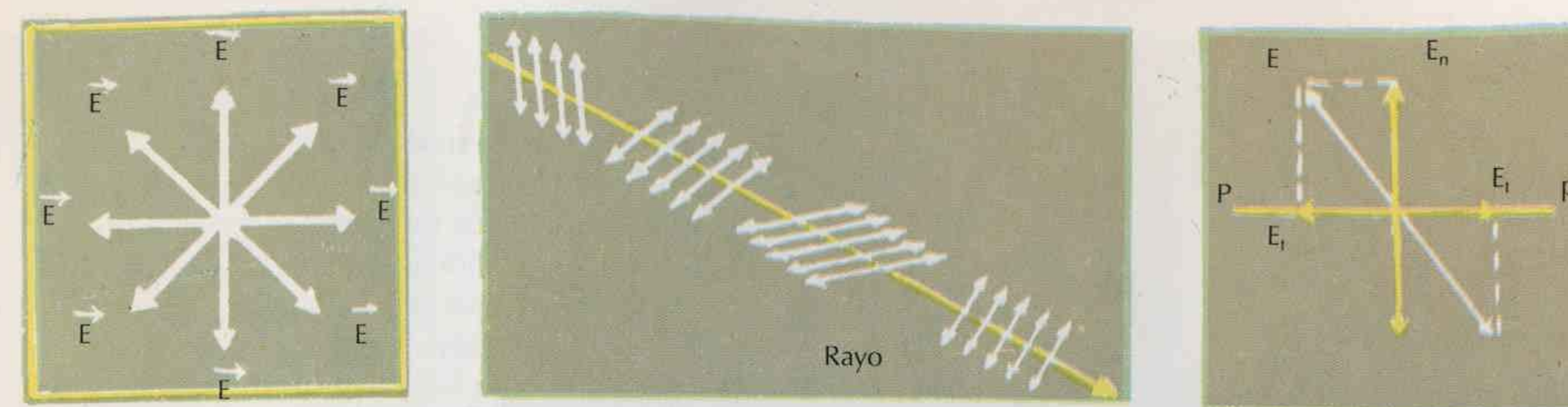
En la naturaleza existen ciertos minerales, tales como la calcita, el cuarzo, la turmalina y otros, que tienen la propiedad de dejar pasar solamente luz polarizada en un plano. Eso quiere decir que de los vectores eléctricos existentes en el rayo que atraviesa la sustancia sólo pasa la componente normal al plano de polarización. La explicación del fenómeno requiere conocimientos superiores de óptica cristalina, por lo que no podemos abordarla. No obstante, es posible dar una idea de la acción para el caso de ondas transversales en una cuerda.

La manera más económica, en la actualidad, de polarizar la luz se consigue con los *polaroid*, que consisten en una capa de cristallitos de yodosulfato de quinina situados entre dos capas de plástico que los fijan. Los cristallitos tienen forma muy alargada y se orientan todos previamente en la misma dirección con ayuda de un campo eléctrico intenso. De esta manera, el polaroid sólo deja pasar luz polarizada en un plano. Los polaroid se emplean en instrumentos de laboratorio y además para evitar el deslumbramiento que produce la luz solar reflejada por la carretera. Dicha luz está muy polarizada en el plano de incidencia, por lo que, si se dispone de un parabrisas o unas gafas de polaroid que sólo dejen pasar la luz cuyo vector eléctrico vibre en la dirección de intersección del plano vertical con el parabrisas, el vector de la luz reflejada por la carretera no tiene componente importante, según dicha dirección, y prácticamente no podrá pasar y, por lo tanto, no deslumbrará. En cambio, con la luz procedente de los demás cuerpos no ocurre lo mismo, por tener dicha componente un valor considerable.

(Continuación de la TARJETA D/1)

Es decir, los radios de las ondas secundarias son proporcionales a las distancias de sus centros a  $A_4$ , y  $BA_4 = AB'$ , con lo que la envolvente de las ondas secundarias será el plano tangente común a ellas que pasa por la perpendicular al dibujo en  $A_4$ . La anterior proporcionalidad hace que los triángulos  $ABA_4$  y  $AB'A_4$  sean rectángulos semejantes con la hipotenusa común; son, pues, iguales. Por

tanto, los ángulos  $i$ , que forma la onda incidente con la superficie reflectora, y  $r$ , que forma con éste la onda reflejada, son iguales. Estos ángulos son respectivamente iguales a los que forman con la normal a la superficie los rayos incidente y reflejado, que determinan un plano en el cual se halla la normal. Las leyes de la reflexión son, pues: 1.<sup>a</sup>, *el rayo incidente, el reflejado y la normal se hallan en un mismo plano*; 2.<sup>a</sup>, *el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión*.



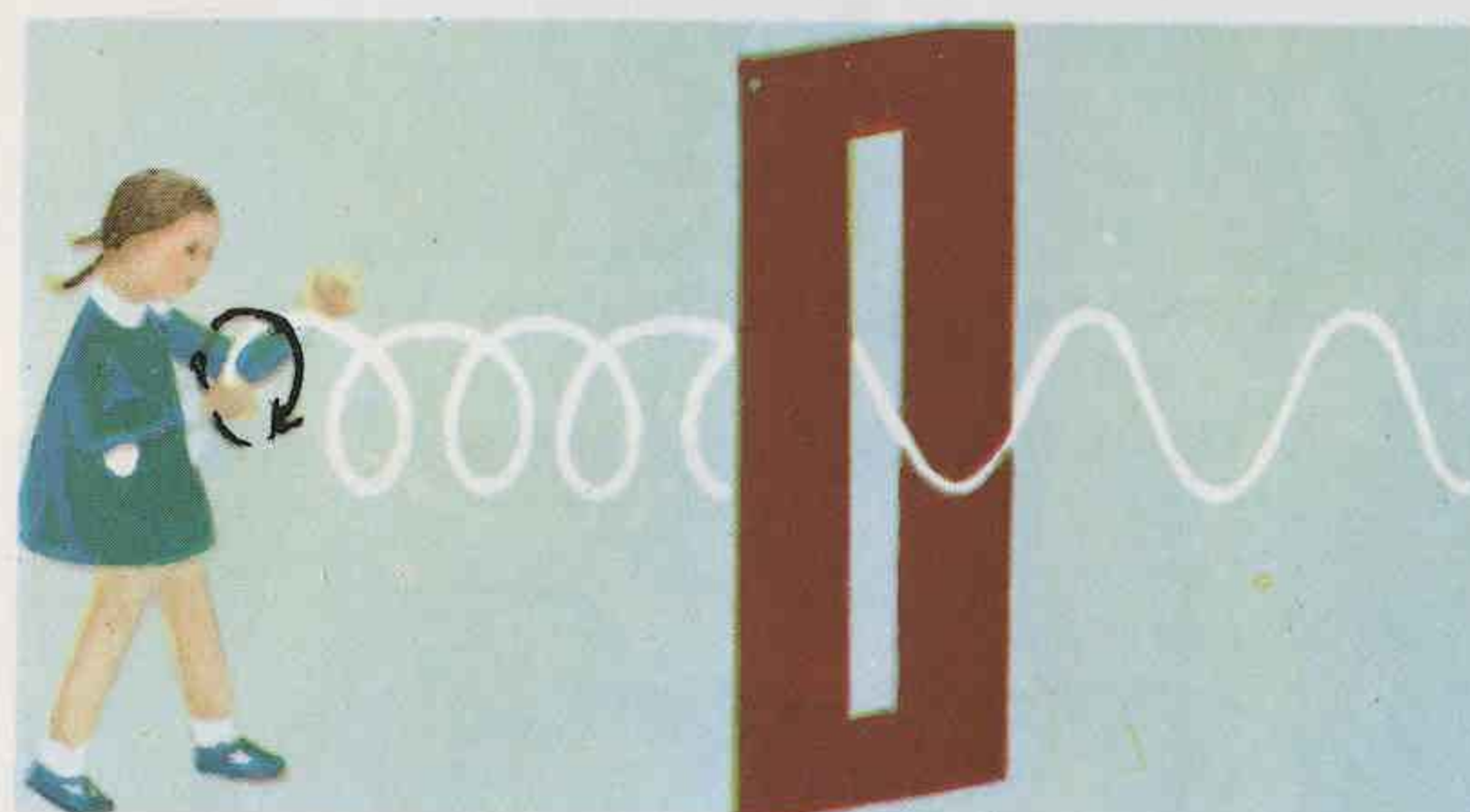
Izquierda: rayo de luz no polarizada, visto de frente. El vector E vibra por igual en todas direcciones perpendiculares al rayo. Centro: luz no polarizada. Los distintos trenes de onda vibran en direcciones diferentes. Derecha: si una sustancia sólo deja pasar luz polarizada en el plano P P', pasará la componente  $E_n$  normal a dicho plano, suprimiendo la  $E_t$  tangente a él.



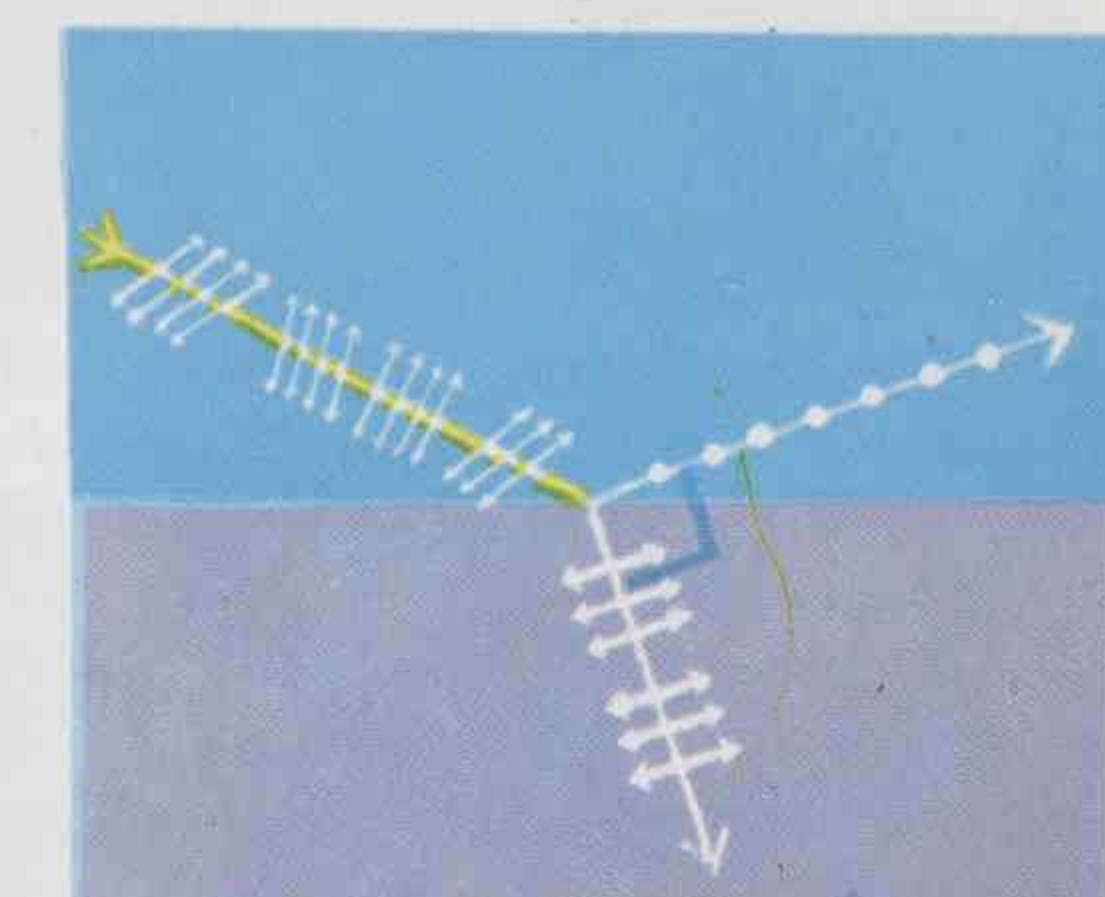
Las ondas transversales que se propagan a lo largo de la cuerda no son afectadas por la presencia de la rendija.



La rendija destruye las ondas transversales contenidas en un plano normal a ella.



Si la cuerda accionada circularmente, sólo conserva, tras pasar la rendija, la componente de vibración según ella.



Ley de Brewster



La luz del Sol reflejada por la carretera está muy polarizada en el plano vertical. Si el parabrisas (o las gafas del conductor) sólo dejan pasar vibraciones perpendiculares a las de la luz reflejada, ésta no pasa y se elimina el deslumbramiento.

## IONIZACIÓN Y FOTOELECTRICIDAD

Los objetos visibles, aunque sea con ayuda de instrumentos ópticos, constituyen lo que podemos llamar mundo *macroscópico*, para diferenciarlo del *submicroscópico*, constituido por otros cuerpos que sólo pueden observarse a través de ciertos atributos, tales como su energía cinética y su cantidad de movimiento. Es decir: no podemos observar un electrón en movimiento como se observa un balón de fútbol, sino que lo único que lograremos observar de él será, por ejemplo, el tiempo que tarda en recorrer el espacio comprendido entre el cátodo y el ánodo de una válvula electrónica, la energía de una corriente constituida por electrones, etc., siéndonos imposible describir el electrón como describiríamos el balón. Esto podemos hacerlo extensivo a todas las «partículas» de dimensiones tan pequeñas que no es posible observarlas directamente, y que sólo describiremos a través de sus efectos. Ahora bien, éstos indican unas veces que una partícula se comporta como un corpúsculo, o sea como un grano de pequeñísimas dimensiones, y en otro actúa como ondas (!), pero como no podemos *verla*, no puede afirmarse que sea una u otra cosa. Dice Sommerfeld que ello se debe a nuestra tendencia a buscar modelos mecánicos para cosas que escapan a la Mecánica clásica. Un electrón, por ejemplo, es «algo» eléctrico, y lo queremos representar por un corpúsculo con los atributos de los cuerpos mecánicos, o por un *movimiento* ondulatorio, que también es un hecho puramente mecánico. No obstante, los modelos mencionados presentan muchas ventajas y nos ayudan a progresar si comprendemos su verdadero alcance, cosa que puede lograrse a través de los experimentos que pasamos a relatar.

### IONIZACIÓN DE UN GAS

Un gas está constituido por gran número de partículas, llamadas moléculas, que se mueven con entera libertad, sin estar sometidas a fuerza alguna. Cada molécula tiene una carga eléctrica total nula. Por eso, cuando se aplica un campo eléctrico entre dos placas no circula corriente entre ellas. Irradiemos ahora el gas con ondas electromagnéticas de longitud de onda corta y observaremos que circula la corriente. Ello se debe a que las ondas electromagnéticas arrancan electrones de las molécula,

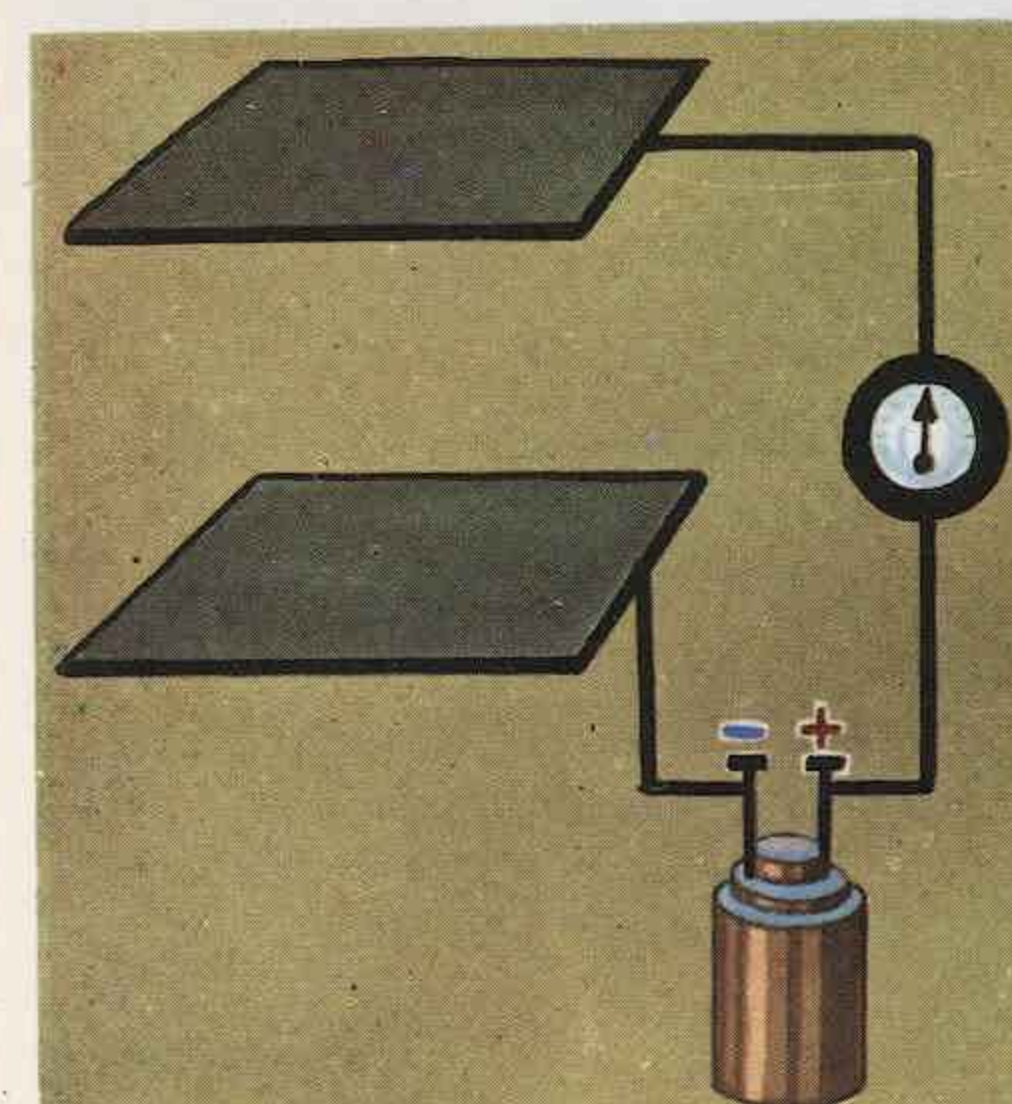
los cuales van hacia la placa positiva y pasan luego al circuito exterior. Las moléculas que han perdido electrones se dice que están *ionizadas*, tienen una carga eléctrica total positiva y son atraídas por la placa negativa, en la cual toman los electrones perdidos, volviendo a convertirse en moléculas neutras. Para arrancar un electrón de una molécula hay que gastar una energía y ésta la proporciona la onda electromagnética. Si las ondas son débiles, transportan poca; por cuya causa deberían llegar ondas durante un cierto tiempo, y así, entre todas, suministrar la energía necesaria para ionizar una molécula. En cambio, si son muy intensas, las ondas transportan mucha energía, y la ionización de las moléculas se producirá mucho antes. En la realidad no ocurre así. La ionización es casi siempre simultánea a la llegada de las ondas. Si éstas son débiles, en cada segundo se ionizan pocas moléculas y si son intensas, muchas; pero no ha de transcurrir más tiempo en el primer caso que en el segundo para que aparezca la ionización. La radiación, pues, no actúa por igual sobre todas las moléculas, sino que concentra sus efectos en algunas aisladas, como si estuviera constituida no por ondas, sino por un enjambre de pequeños proyectiles rápidos, a los que se da el nombre de *fotones*. He aquí la primera evidencia de que las ondas cortas se pueden comportar como corpúsculos.

### EFECTO FOTOELÉCTRICO

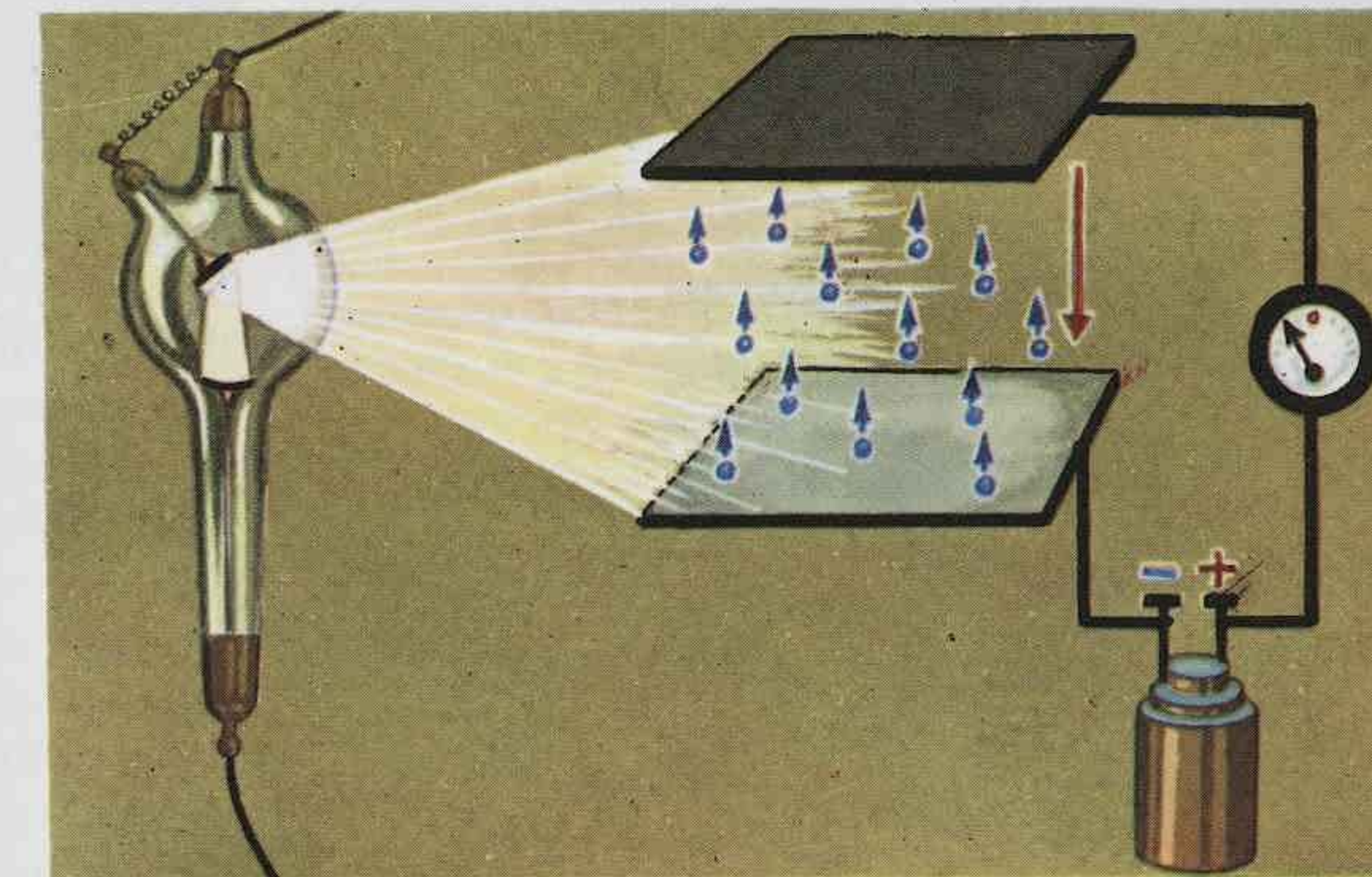
La segunda evidencia es el *efecto fotoeléctrico*. Cuando una onda electromagnética de frecuencia suficientemente elevada incide sobre un metal, le arranca electrones. Ello se aprovecha en la *célula fotoeléctrica*. El mecanismo de este efecto es parecido al de la ionización. Para extraer un electrón es preciso darle, como mínimo, una energía llamada *energía de extracción*, que es característica de cada metal. Cuando se le entrega exactamente esta energía, el electrón sale del metal, pero queda sin energía cinética; en cambio, si se le suministra una energía superior a la de extracción gasta ésta en salir y el resto le queda en forma de energía cinética. Irradiando una superficie metálica con ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias observamos que existe una frecuencia umbral  $f_0$  tal que las radiaciones de frecuencia inferior a ella no producen efecto fotoeléctrico y sí las de frecuencia superior o igual.



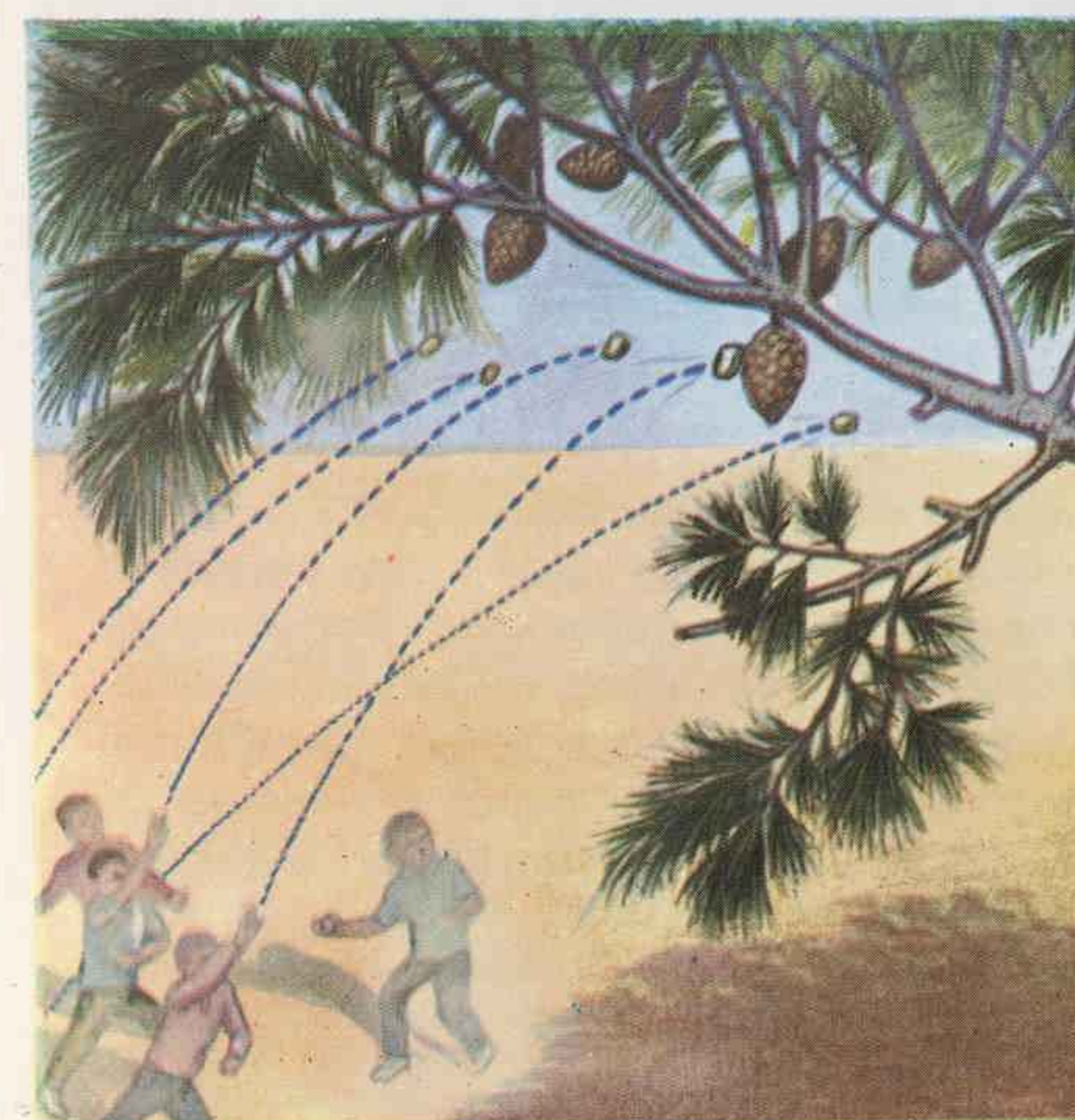
Las partículas de polvo movidas por el viento y las ondas sonoras producidas, verbigracia, por una banda de música, son totalmente diferentes por pertenecer aquéllas al mundo macroscópico.



No circula corriente entre las placas.



Los rayos X ionizan el gas entre las placas y circula la corriente al atraer éstas a los iones.



Analogía con la ionización y con el efecto fotoeléctrico. Un número grande de piedras (fotones) lanzadas da una probabilidad de choque contra las piñas (electrones). Siendo pocas las piedras, la probabilidad es menor. En ambos casos arrancarán las piñas, si tienen la energía suficiente.

Por muy intensa que sea la radiación incidente de frecuencia inferior a la umbral, no conseguiremos emisión de electrones; en cambio, si la frecuencia es superior a  $f_0$ , tendremos siempre emisión, por muy débil que sea la radiación incidente. En este caso, cuanto más intensa sea la radiación tanto mayor será el número de electrones emitidos por segundo. La frecuencia umbral corresponde al caso en que los electrones emitidos carecen de energía cinética. Todo lo anterior nos indica que en la interacción de la radiación electromagnética con la superficie de los metales aquella se comporta más como enjambre de fotones que como onda continua. La onda incide sobre toda la superficie, pero sólo arranca un electrón en un punto, otro en otro, etc. Midiendo la energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos por una superficie a la que corresponde una frecuencia umbral  $f_0$ , y variando la frecuencia  $f$  de la radiación incidente, dicha energía cinética máxima resulta ser proporcional a la diferencia  $f - f_0$ , es decir,

$$T_{\text{máx}} = h(f - f_0) = hf - hf_0$$

Es curioso que el valor de la constante de proporcionalidad  $h$  sea siempre el mismo,  $h = 6,6 \times 10^{-34}$  J.s, independientemente de cuál sea la superficie metálica, cosa que no ocurre con  $f_0$ . La explicación de esto se encuentra en la teoría cuántica de Planck, quien vio que la energía radiada por un cuerpo, lo es en forma de paquetitos, cada uno de los cuales tiene una energía igual a  $hf$  (quantum de energía). Un fotón es pues, un quantum de energía, y su contenido energético es proporcional a la frecuencia  $f$  de la radiación. Esta teoría permitió a Einstein explicar el efecto fotoeléctrico. Cuando un fotón de frecuencia  $f > f_0$  incide en una superficie metálica entrega su energía a un electrón que gastará por lo menos una cantidad  $hf_0$  en salir. El resto de la energía aparece en forma de energía cinética, que será la máxima si para salir sólo gasta  $hf_0$ . Luego  $hf = T_{\text{máx}} + hf_0$ ; donde  $T_{\text{máx}}$  representa la energía cinética máxima posible de los fotoelectrones emitidos. Esto está de acuerdo con las medidas experimentales, lo que abona la validez de la teoría cuántica de la luz. Como la energía cinética no puede ser negativa, deberá ser  $f \geq f_0$  o sea que: *Para cada emisor de fotoelectrones existe una frecuencia umbral  $f_0$  tal que las radiaciones de frecuencia inferior a ella no pueden extraer fotoelectrones.* (1ª ley de Einstein.)

Como  $f_0$  es constante, para aumentar la energía cinética máxima de los fotoelectrones habrá que aumentar  $f$ ; es decir que:

*Al intensificar la radiación incidente, aumenta la emisión de fotoelectrones, pero no la energía cinética máxima de éstos, que precisa, para aumentar, de una elevación de la frecuencia de la radiación incidente.* (2ª ley de Einstein.)

### FOTONES MUY ENERGÉTICOS

#### RAYOS X

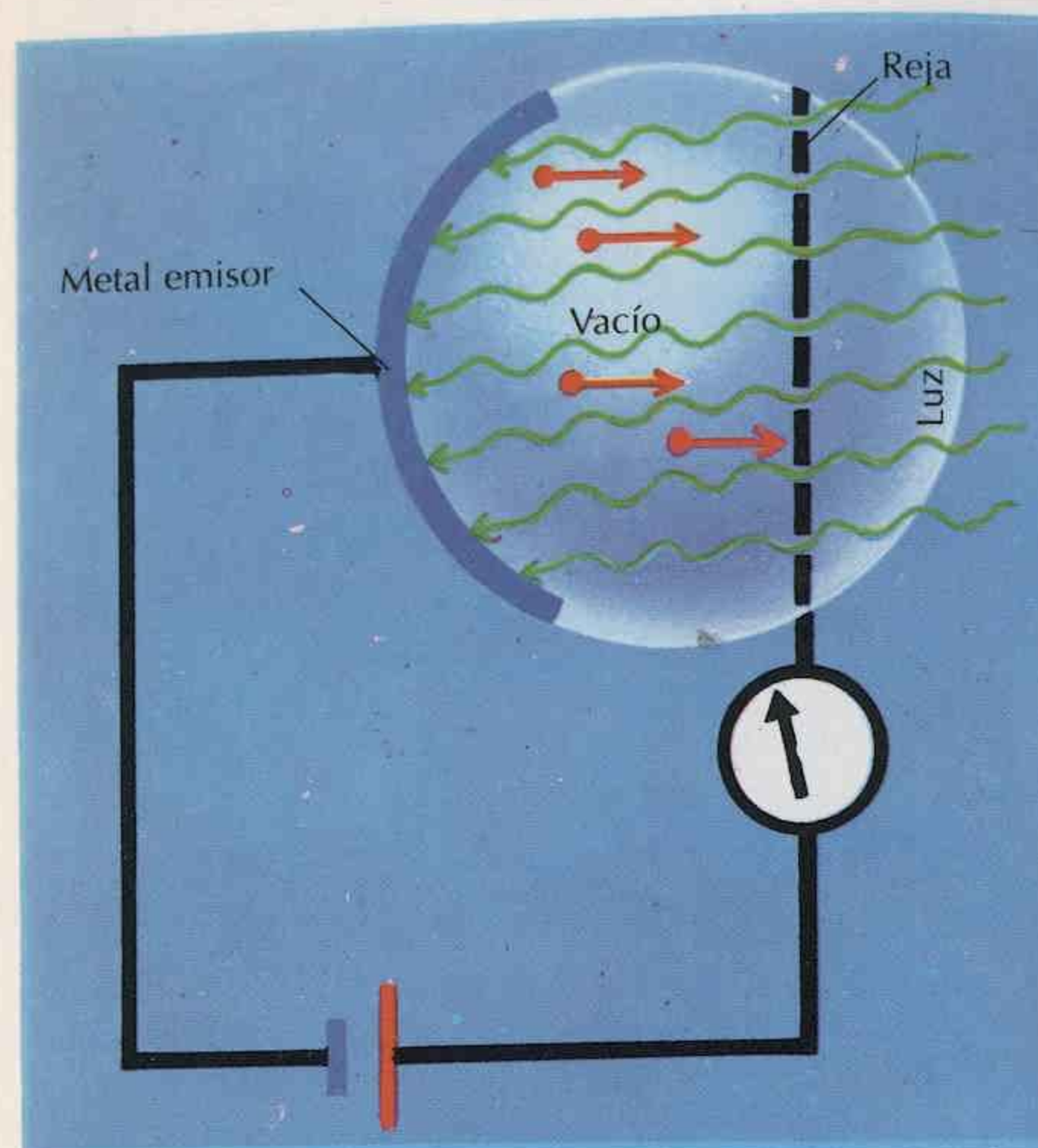
Vamos a tratar ahora de la generación de rayos X, que puede considerarse efecto inverso del fotoeléctrico porque consiste en que al chocar electrones rápidos contra un metal éste emite fotones. La explicación es fácil: al chocar un electrón contra el metal pierde velocidad, o sea energía cinética. Ésta se transforma, total o parcialmente, en energía radiante; es decir, la energía cinética del electrón puede transformarse íntegramente en un fotón, o bien en un fotón y en calor en los choques contra los átomos del metal. Si el electrón, de carga  $e$ , ha sido acelerado por una diferencia de potencial  $V$ , su energía cinética será igual a  $eV$ , o sea  $eV = hf + \text{calor}$ . Algunos electrones transformarán toda su energía en energía radiante, con lo que será nulo el desprendimiento de calor y se originarán los rayos X de frecuencia máxima en tal dispositivo, siendo  $hf_{\text{máx}} = eV$ . Es decir, se generará un haz de rayos X cuya longitud de onda mínima será

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{c}{f_{\text{máx}}} = \frac{ch}{eV}$$

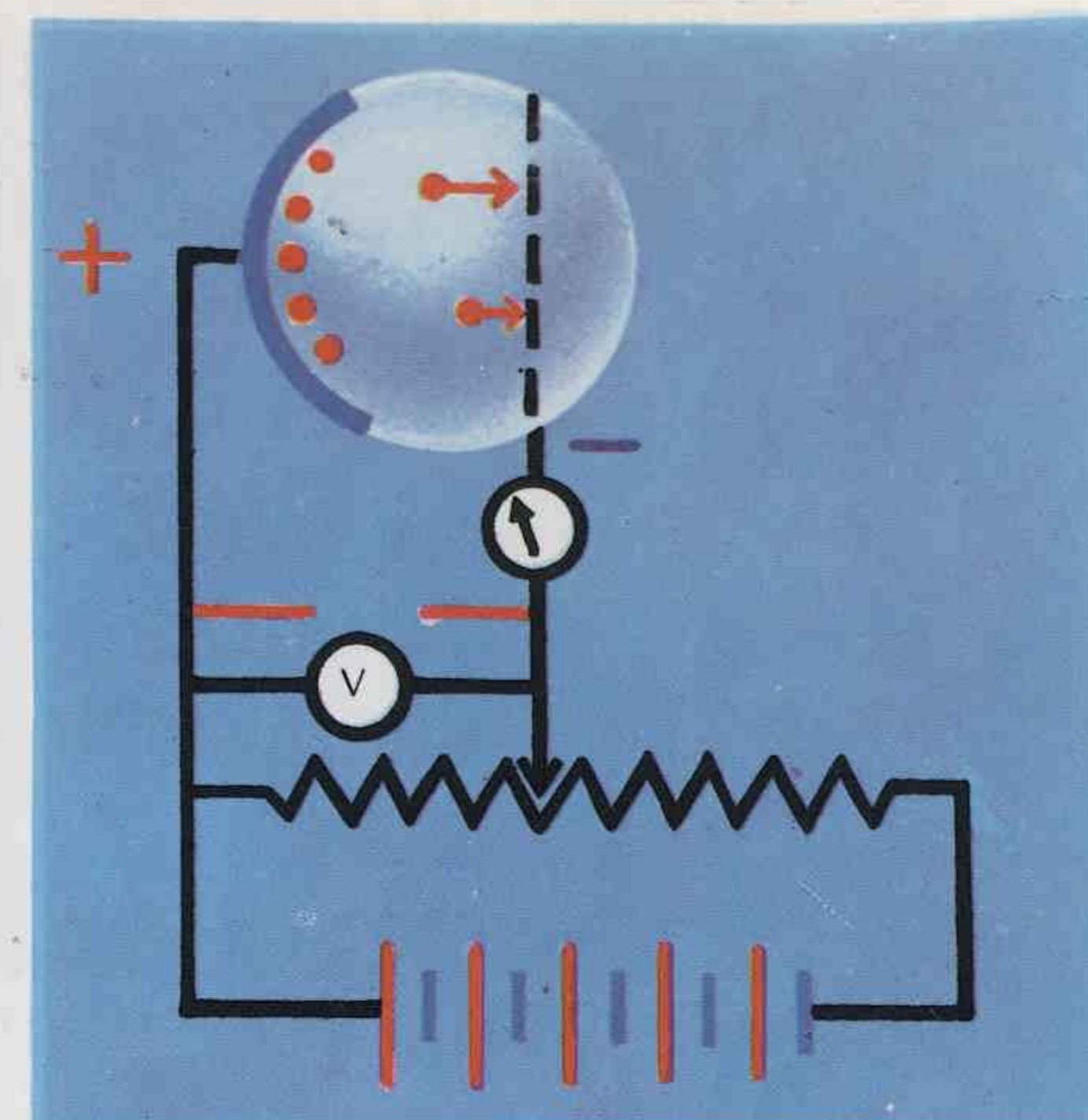
La teoría electromagnética de la luz está de acuerdo con este fenómeno, pues el enfrentamiento del electrón representa una aceleración, y toda carga acelerada emite energía en forma de ondas electromagnéticas.

#### EFEECTO COMPTON

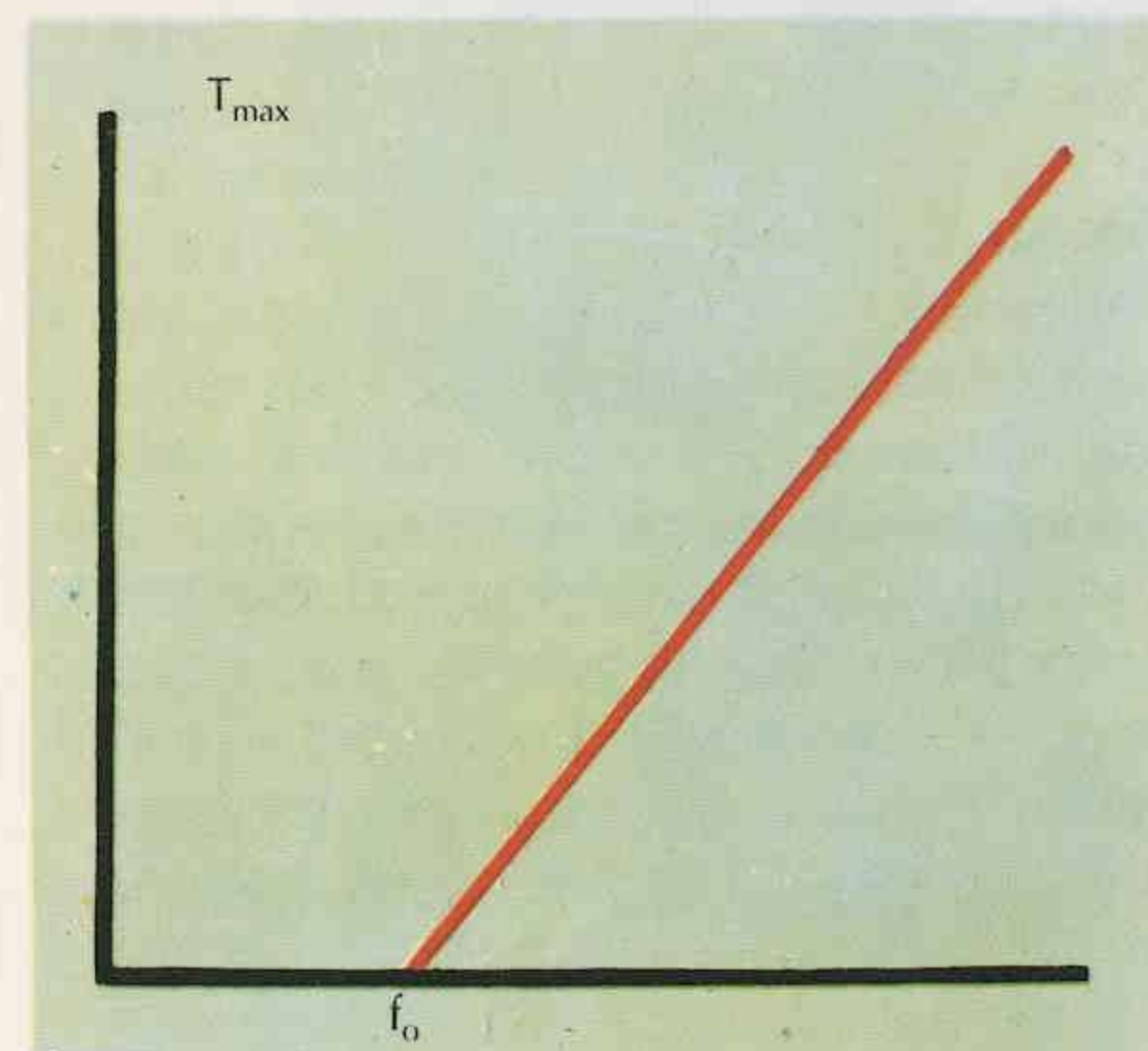
Aunque la teoría electromagnética está de acuerdo con la emisión de rayos X, los fotones se comportan como corpúsculos al chocar con los electrones, y así, cuando un fotón suficientemente energético choca contra un electrón puede observarse que ambos se desvían de igual manera como lo harían dos bolas de billar al chocar una con la otra.



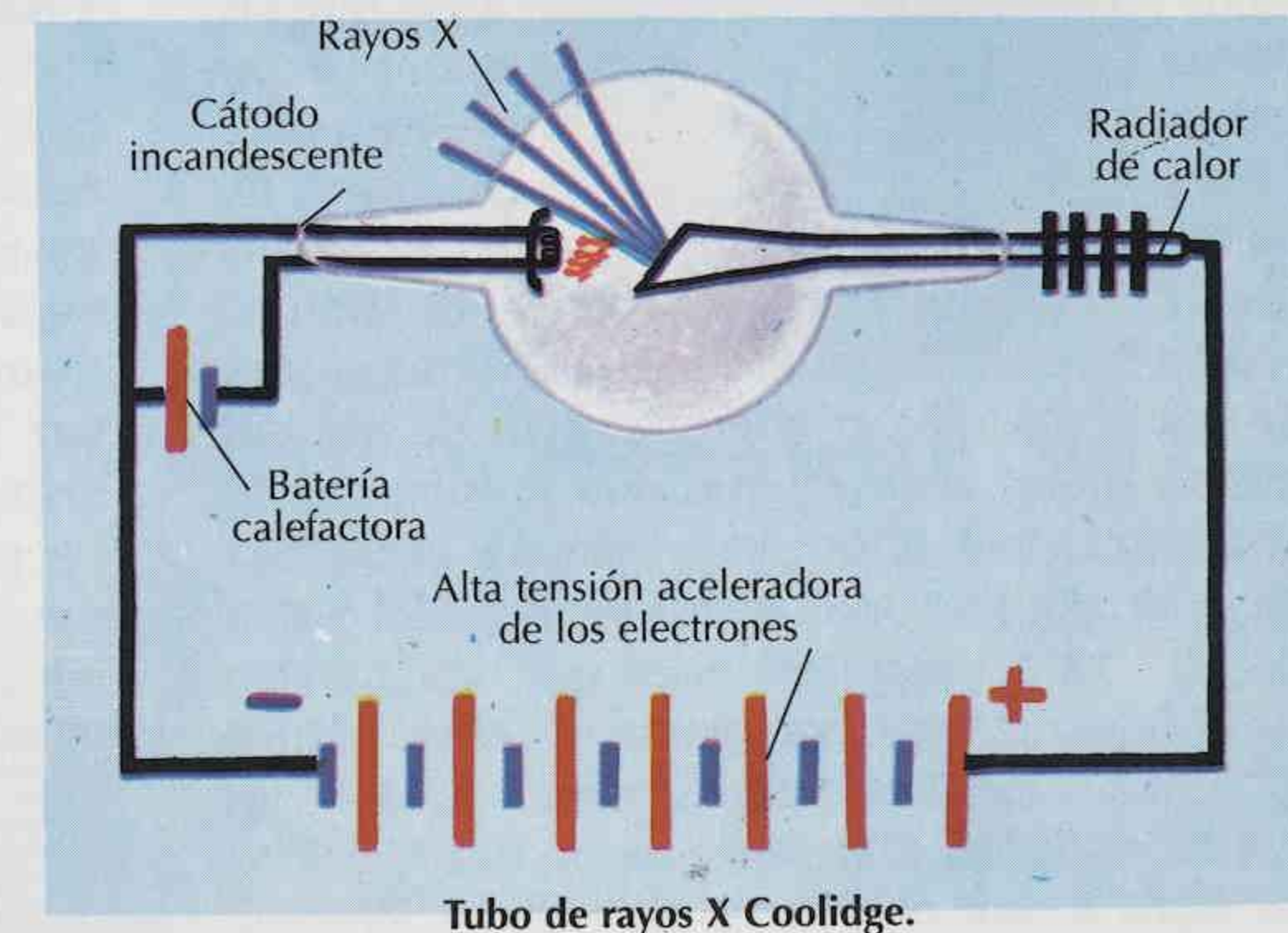
Célula fotoeléctrica. Si la rejilla es positiva, atrae a los fotoelectrones, y el microamperímetro señala paso de corriente.



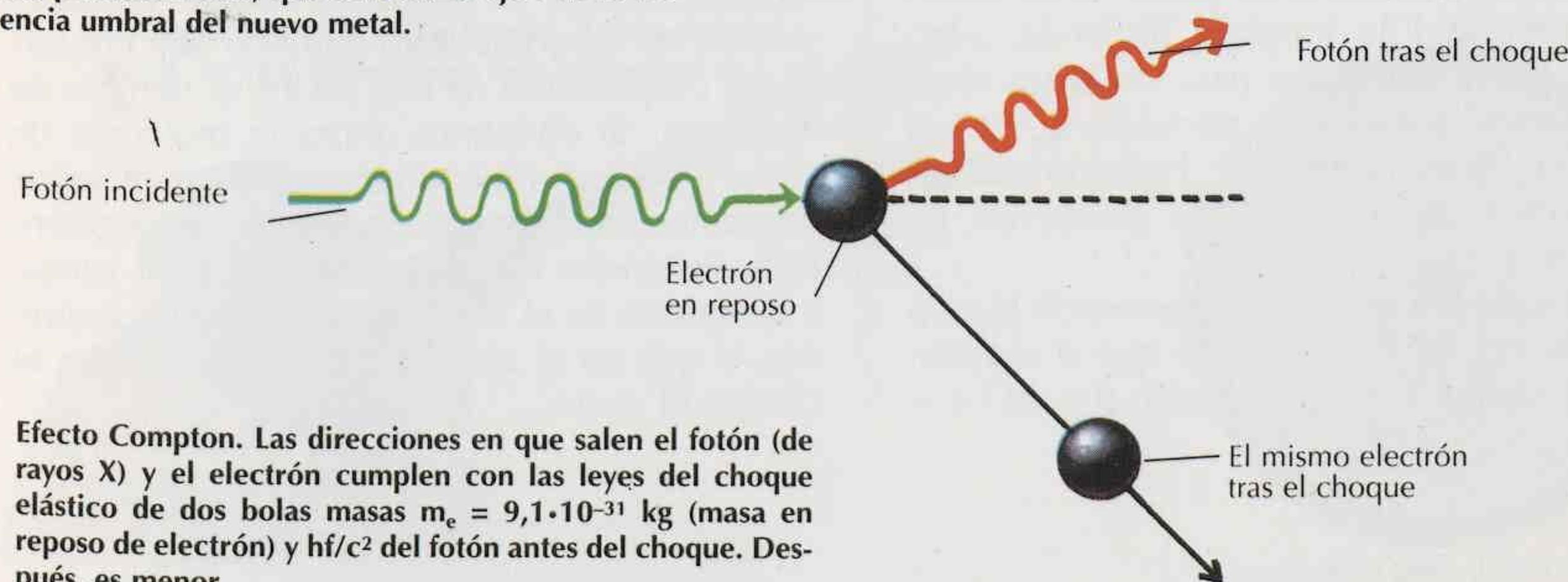
Medida de  $T_{\text{máx}}$ . Haciendo negativa la rejilla, sólo llegarán a ella los fotoelectrones emitidos con energía cinética  $> eV$ . Aumentando el potencial retardador  $V$ , llegará un momento en que  $eV = T_{\text{máx}}$  y para valores de  $V$  no inferiores a éste, no podrán circular electrones.



Gráfica experimental que corrobora las leyes de Einstein. Si cambiásemos el metal, obtendríamos otra recta, paralela a ésta, que cortaría al eje  $f$  en la frecuencia umbral del nuevo metal.



Tubo de rayos X Coolidge.



Efecto Compton. Las direcciones en que salen el fotón (de rayos X) y el electrón cumplen con las leyes del choque elástico de dos bolas masas  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg (masa en reposo de electrón) y  $hf/c^2$  del fotón antes del choque. Después, es menor.

Es decir, el intercambio de energía cinética y de cantidad de movimiento se rige por las mismas leyes del choque elástico, así como las direcciones de movimiento tras el choque. La energía del fotón después del choque (suponemos el electrón inicialmente en reposo) será menor que antes de él, lo cual significa que su frecuencia  $f'$ , después del choque, ha de ser menor que antes, pues será  $hf \geq hf'$ . Ahora bien, para hablar de cantidad de movimiento del fotón deberemos definir primero qué se entiende por masa del fotón. La teoría de la Relatividad dice que toda energía  $E$  equivale a una masa  $m$  con la cual está relacionada por la ecuación  $E = mc^2$  donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. Por tanto, en el caso del fotón,  $hf = mc^2$ , de donde  $m = hf/c^2$ , y como el fotón se mueve a la velocidad de la luz, su cantidad de movimiento será  $mc = hf/c$ .

DUALIDAD CORPÚSCULO-ONDA

Hemos visto que las radiaciones electromagnéticas, en su interacción con la materia, pueden presentar características análogas a las de los corpúsculos en el sentido de la Mecánica clásica de Newton. Ahora bien, vamos a ver que las partículas de tamaño muy pequeño pueden presentar características ondulatorias. Para ello, bastará poner de manifiesto que un chorro de partículas puede difractarse. La difracción es característica de los movimientos ondulatorios, y, para ponerla de manifiesto, las dimensiones de los obstáculos o aberturas han de ser del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación difractada. La pequeñez de la longitud de onda de los rayos X (del orden de  $10^{-9}$  m e inferiores) hace que sea preciso recurrir a cristales cuya separación entre planos iónicos sea del orden de magnitud de la longitud de onda. La difracción de un haz estrecho de rayos X, por el método de Debye-Scherrer, da unos anillos de difracción bien característicos, y midiendo su diámetro puede determinarse con precisión la longitud de onda. Algo parecido habrá que hacer para ver si los electrones tienen naturaleza ondulatoria, y así Thompson y Reid, ya en 1927, lograron realizar experimentos convincentes de difracción de electrones.

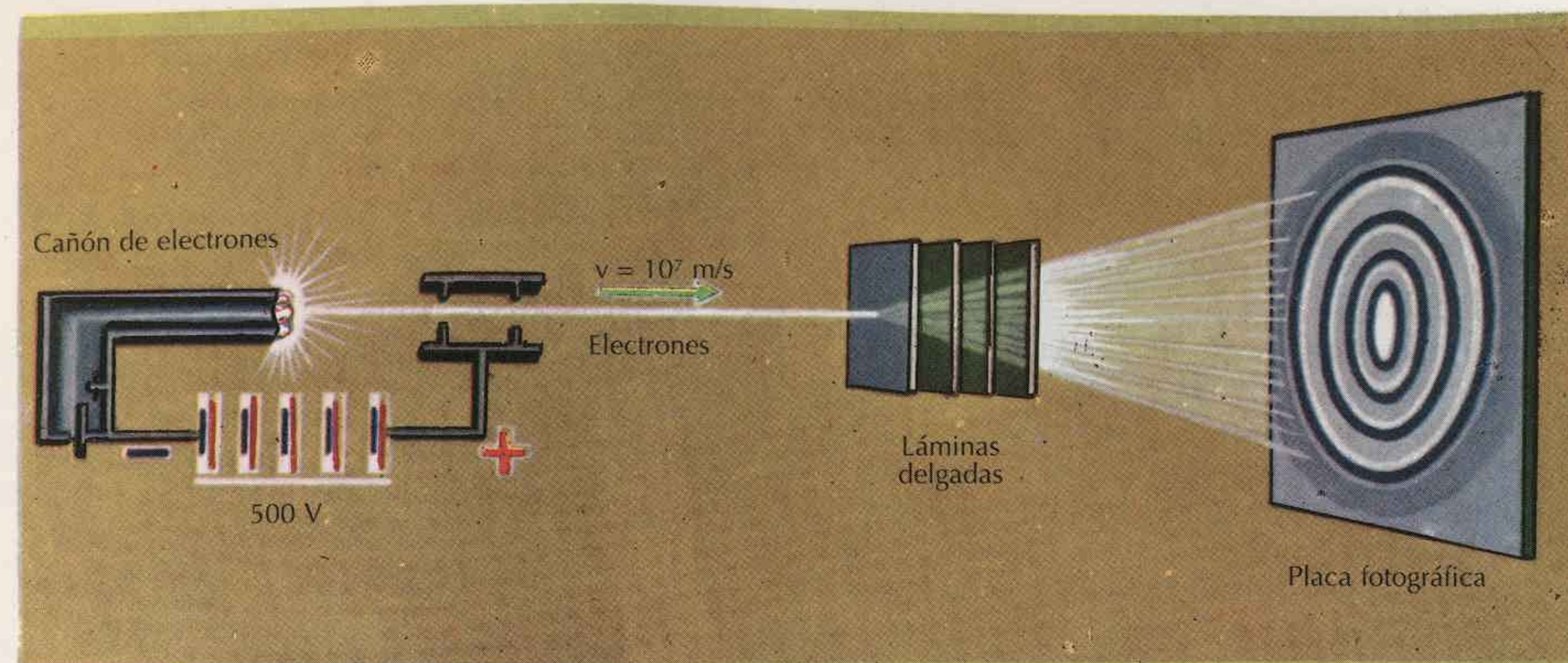
La idea que llevó a la anterior experiencia la tuvo De Broglie en 1924. Éste pensó que si el fotón tiene una cantidad de movimiento  $p = hf/c =$

$h/\lambda$ , como  $\lambda = h/p$ , a toda partícula que tenga una cantidad de movimiento  $p$  se le puede asociar una longitud de onda  $\lambda = h/p$ . Es decir, que una partícula puede comportarse en determinadas ocasiones como un tren de ondas caracterizado por la longitud de onda de De Broglie. Las ideas de De Broglie se han visto plenamente confirmadas al lograrse la difracción de los neutrones, partículas sin carga eléctrica de las que pronto nos ocuparemos.

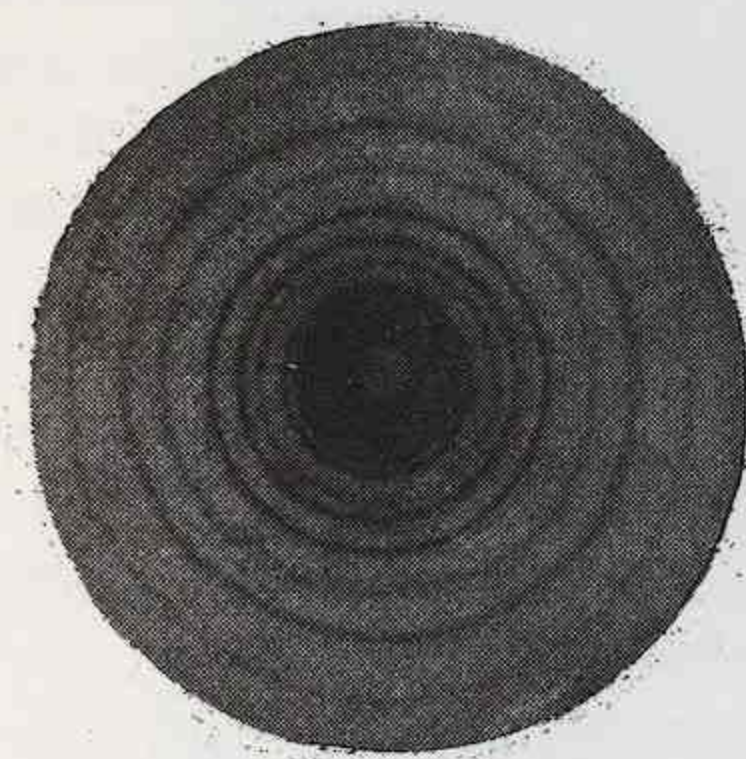
El aspecto ondulatorio de la materia tendrá importancia solamente cuando la longitud de onda de De Broglie sea del mismo orden de magnitud que las dimensiones geométricas del cuerpo considerado. Los ejemplos de la lámina E/3 siempre dan longitudes de onda mucho menores que el objeto móvil. En cambio, a los electrones del experimento de Thompson y Reid corresponde una longitud de onda de De Broglie de  $5,5 \times 10^{-11}$  m, que ya es del orden de magnitud de las distancias entre planos iónicos de los cristales, por lo que se ponen de manifiesto los fenómenos de difracción de electrones.

MOLÉCULAS Y ÁTOMOS

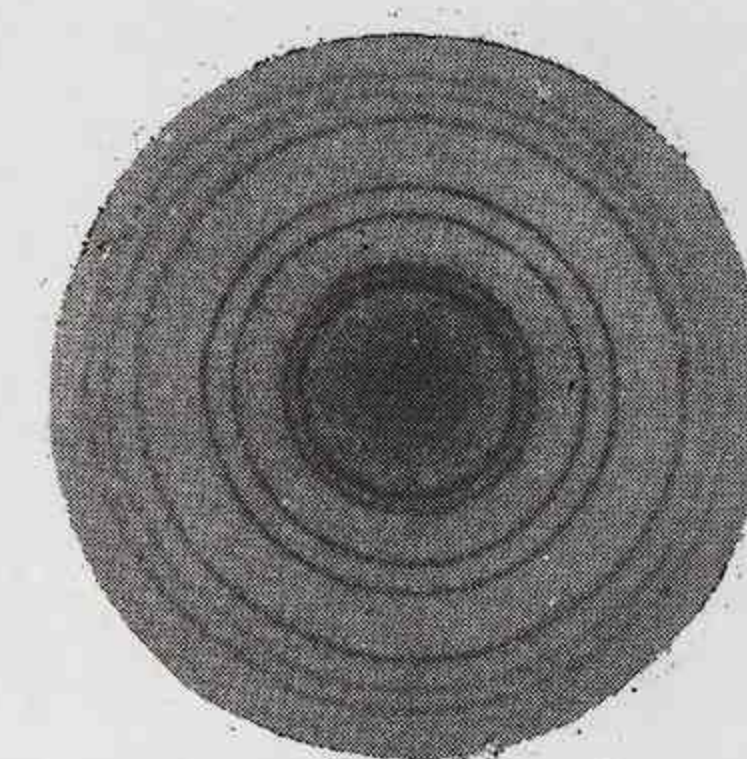
Vayamos a la cocina y tomemos un poco de sal común. Veamos que está constituida por unos cristallitos, pero si partimos uno de ellos, los nuevos fragmentos siguen siendo cristales de la misma sustancia. Podemos aún dividir de nuevo estos cristales más pequeños, y así sucesivamente, obteniendo siempre trocitos cada vez menores de sal común. Imaginemos que disponemos de medios para seguir dividiendo los pedacitos, hasta que lleguemos a uno que sigue siendo sal común (cloruro sódico, en términos químicos), pero que, dividido, los fragmentos que se obtienen ya no son sal común, pues tienen propiedades totalmente diferentes de las del cloruro sódico. Esta partícula, que constituye la menor cantidad posible existente de sal común, recibe el nombre de *molécula* de cloruro sódico. Es decir, la menor cantidad posible de un compuesto químico que conserve las propiedades de éste recibe el nombre de *molécula*. Si dividimos ahora la molécula de cloruro sódico, obtendremos unos fragmentos diferentes entre sí: son partículas pertenecientes a sustancias no compuestas de otras varias, a las que se da el nombre de *elementos químicos*, y que en el ejemplo presentado serían el cloro y el sodio.



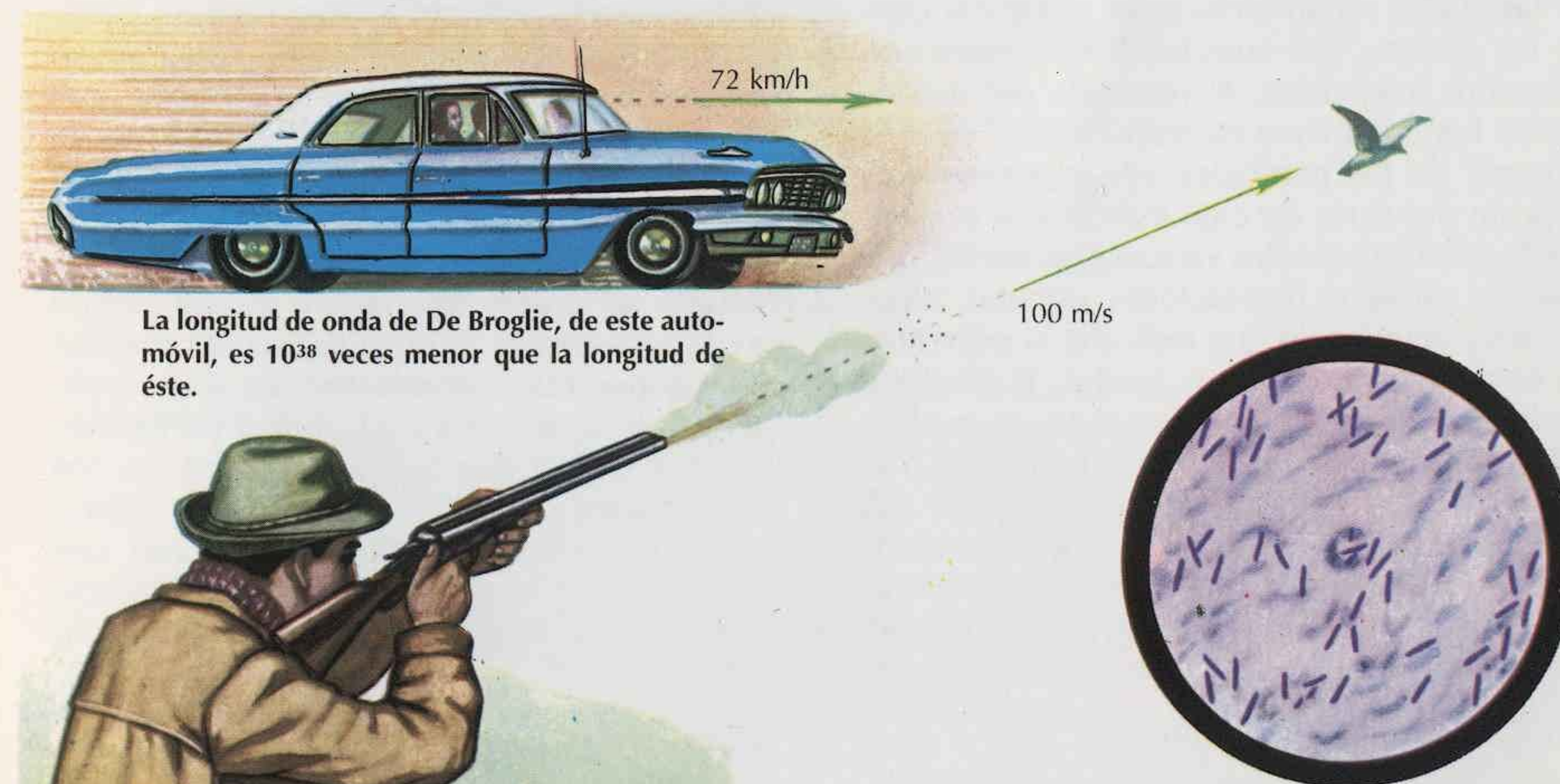
Experimento de Thompson-Reid. El haz de electrones lleva una velocidad de  $10^7$  m/s, atraviesa varias láminas e incide en la placa fotográfica. En este caso resulta  $\lambda = 5,5 \times 10^{-11}$  m.



Anillos de difracción, de electrones acelerados por un potencial de 36 kV  $\lambda = 0,06$  Å.



Difracción de rayos X de  $\lambda = 1,54$  Å.



La longitud de onda de De Broglie, de este automóvil, es  $10^{38}$  veces menor que la longitud de éste.

La longitud de onda de De Broglie de un perdigón es  $30 \cdot 10^{28}$  veces menor que su diámetro.

La longitud de onda de De Broglie de un microbio es unas 100.000 veces más corta que él.

Dichas partículas se creía en un principio que no podían dividirse y, por ello, se les dio el nombre de átomos (indivisibles, en griego). Por tanto, los elementos químicos vienen caracterizados por sus átomos, los cuales, al asociarse, constituyen las moléculas de los compuestos químicos.

MODELOS ATÓMICOS

Por lo anteriormente dicho, podría considerarse el átomo como una bolita uniforme de materia que contiene la mínima cantidad posible de ésta. Es decir, hemos llegado a la partícula base, y cualquier porción de materia no será sino una asociación de átomos. Pero el efecto fotoeléctrico y otros muchos fenómenos indican que la materia, y los átomos, por tanto, contienen electrones. Si la materia, en conjunto, no presenta características de electrización será debido a que en ella, además de electrones, existen cargas positivas que compensan exactamente la negativa de los electrones. Éstos se emiten con relativa facilidad calentando un metal (emisión termoiónica), iluminándolo (efecto fotoeléctrico), etc. En cambio, las cargas positivas no son tan fáciles de extraer, por lo que deben de hallarse ligadas firmemente a la masa del átomo. Todo esto sugirió a Thompson el modelo de la figura. Para comprobarlo, Rutherford indicó la conveniencia de disparar, a través de una hoja metálica, partículas alfa (tienen doble carga que el electrón, pero positiva), emitidas con gran energía por un cuerpo radioactivo. El campo eléctrico débil debería desviar poco de su camino las partículas alfa, muchas de las cuales serían rechazadas al chocar contra los átomos, que constituirían un muro con pequeños intersticios. El resultado del experimento fue totalmente contrario a esto, pues la mayoría de las partículas alfa atravesaron la hoja sin desviarse (lo cual indicaba la existencia de grandes espacios vacíos) y las demás que pasaron sufrieron desviaciones variadas, algunas muy grandes, lo que indicaba la presencia de campos eléctricos muy fuertes. Rutherford explicó este resultado presentando un modelo atómico constituido por un núcleo central que contenía toda la masa y la carga positiva del átomo, y, girando lejos de él, los electrones, formando un sistema planetario en miniatura. Así, el átomo resultaba tener un tamaño mucho mayor que el núcleo, porque entre la capa de

electrones y el núcleo existe un gran espacio vacío. Esto permite explicar que la mayoría de partículas alfa no sean desviadas. Las que lo son es que pasan cerca del núcleo y son repelidas por éste, que debe de tener una masa mucho mayor.

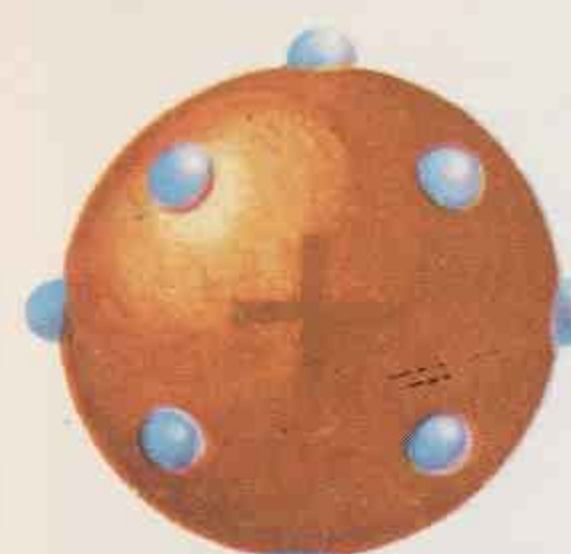
El átomo más sencillo que podemos considerar es el del hidrógeno, que tiene un solo electrón «planetario». Su núcleo tiene una masa 1.836 veces mayor que el electrón, y carga igual y de signo positivo. A este núcleo se le da el nombre de *protón*, y es una de las partículas elementales más importantes. La desproporción entre las masas hace que podamos considerar inmóvil el protón y que el electrón gire alrededor de él, como la Luna en torno a la Tierra. Se deduce fácilmente que la energía cinética del electrón es

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = e^2/8\pi\epsilon_0 r.$$

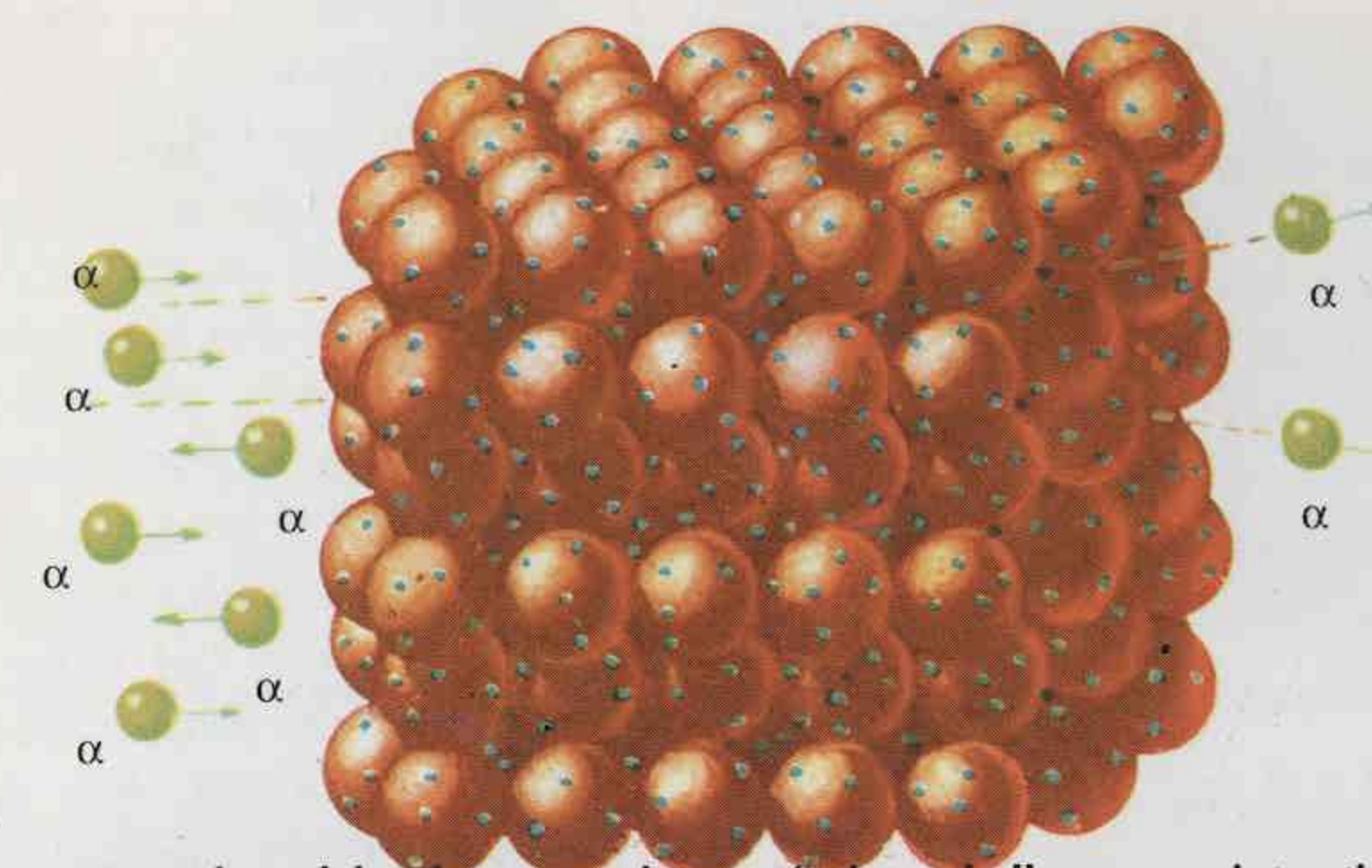
El protón crea un campo electrostático cuyo potencial es  $V = e/4\pi\epsilon_0 r$ , y la energía potencial del electrón será  $U = -eV = -e^2/4\pi\epsilon_0 r$ . Por tanto, la energía total,  $E = T + U = -e^2/8\pi\epsilon_0 r$ . No debe extrañarnos el signo -, pues para traer el electrón desde el infinito hay que realizar un trabajo negativo (contra las fuerzas atractivas del protón). De la última expresión podemos despejar el valor del radio de la órbita correspondiente a un valor  $E$  de energía:

$$r = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r (-E)}$$

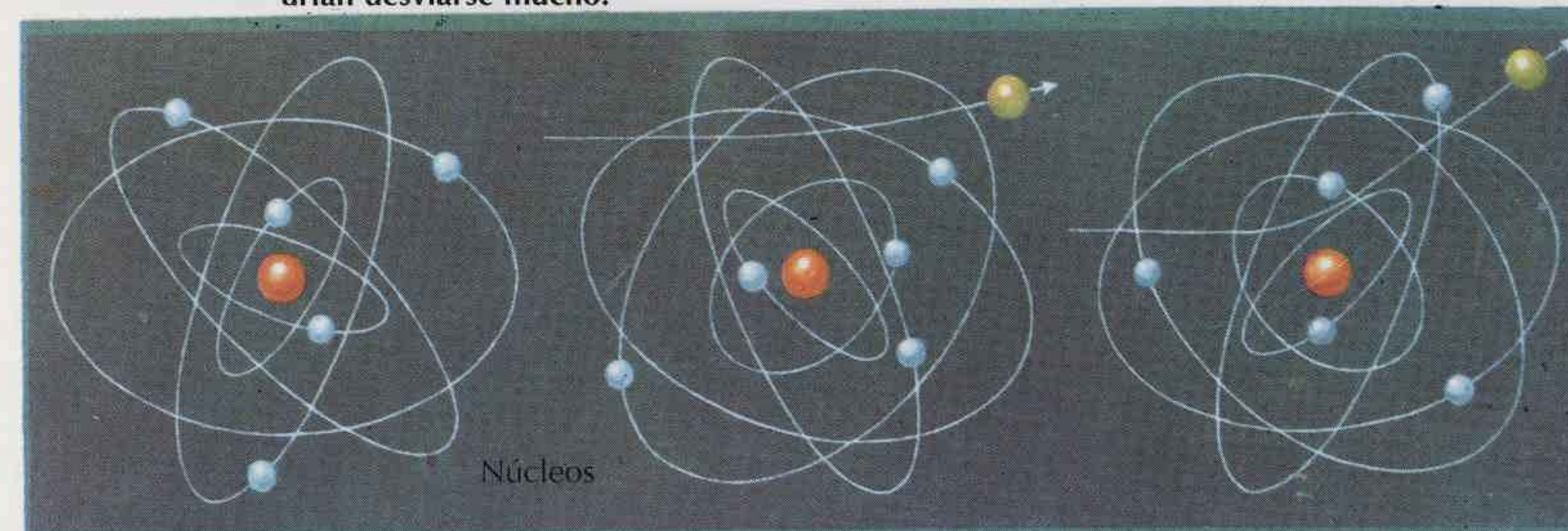
Es decir, a cada valor de la energía corresponde un valor determinado del radio de la órbita. Pero el electrón en movimiento circular tiene una aceleración, y toda carga acelerada emite ondas electromagnéticas que transportan una energía que toman de la carga. Por tanto, en el modelo atómico de Rutherford el electrón iría perdiendo energía y disminuyendo su radio, con lo que su trayectoria se transformaría en espiral, como hacen los satélites artificiales cuando pierden energía por razonamiento al entrar en contacto con la atmósfera. El átomo de Rutherford nos indica que la Física clásica no nos sirve ya para describir los fenómenos atómicos, y es necesario estudiar el átomo con auxilio de la Física del mundo submicroscópico, algunas de cuyas ideas hemos esbozado anteriormente.



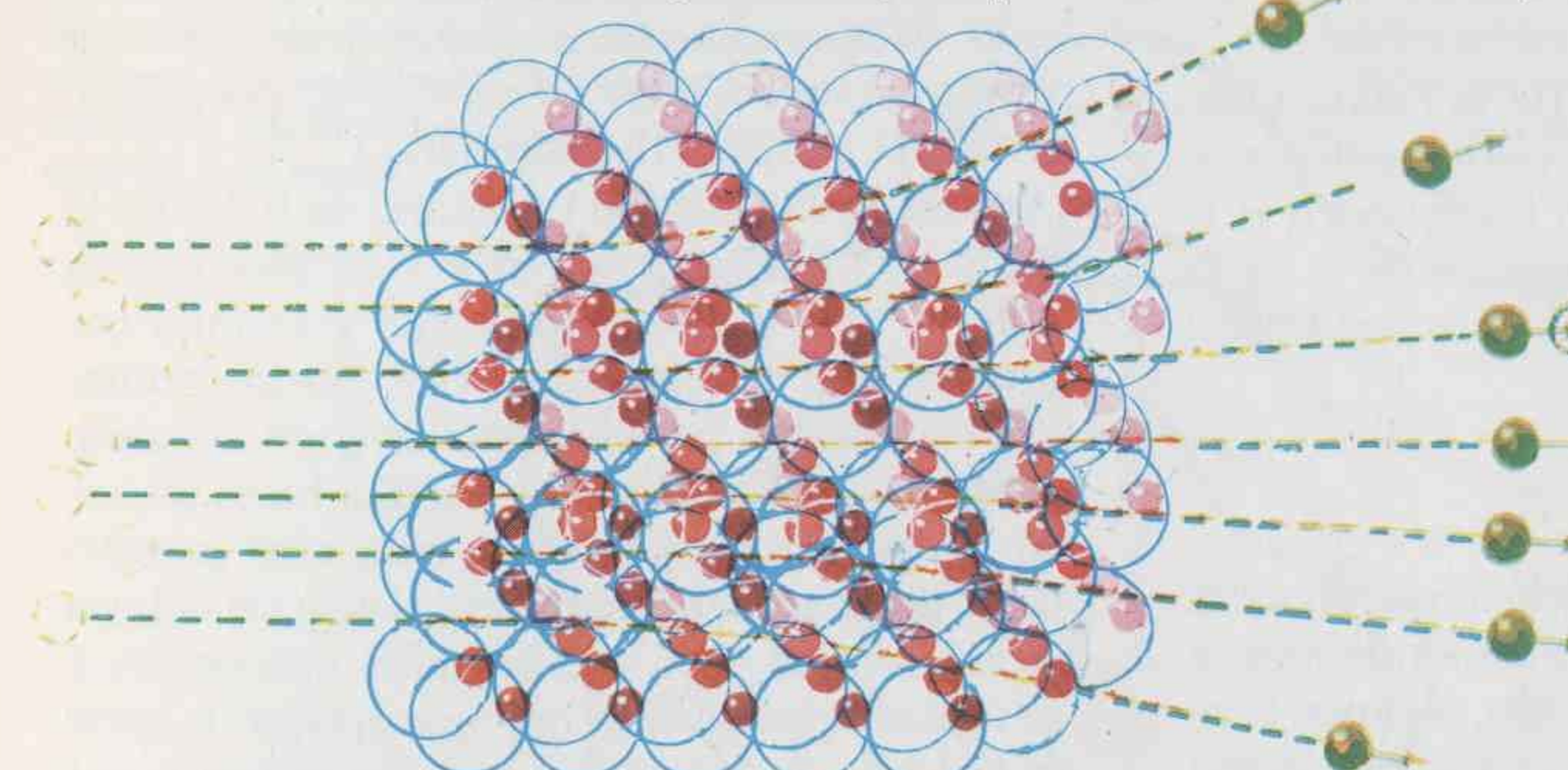
Modelo atómico de Thompson. El átomo es una esfera material con carga positiva distribuida y electrones incrustados.



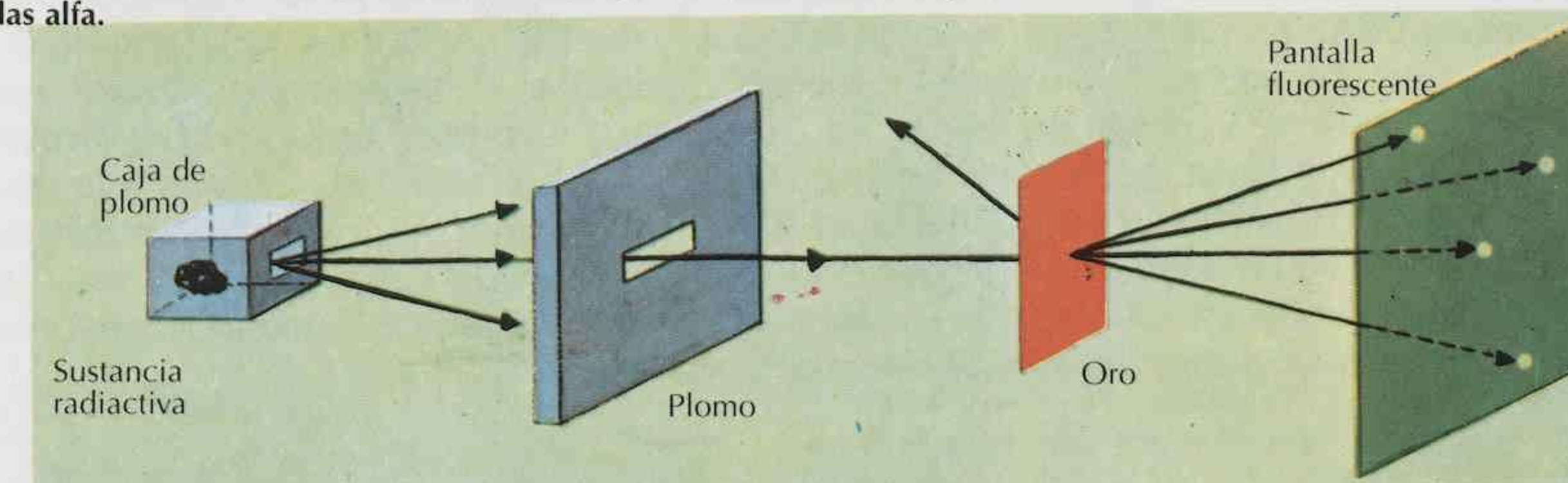
Con el modelo Thompson, las partículas α hallan pocos intersticios para pasar y el campo eléctrico creado es débil por lo cual no podrían desviarse mucho.



Modelo atómico de Rutherford. El átomo consta de un núcleo cargado positivamente y de electrones que giran a su alrededor. Una partícula α que no pase cerca del núcleo se desvía poco, pues los electrones casi no la afectan. Si la partícula α pasa cerca de él, se desvía mucho.



Por no influir apreciablemente los electrones, todo el espacio entre núcleos es permeable a las partículas alfa.



Experimento de Rutherford.



ÁTOMO DE BOHR

Volvamos al átomo de hidrógeno y estudiemos el electrón móvil bajo su aspecto ondulatorio. Constituirá un tren de ondas de De Broglie que se propagarán a lo largo de la órbita. La longitud de ésta debe ser un múltiplo de longitudes de onda de De Broglie, pues, si no fuera así, desaparecerían las ondas por interferencia destructiva y no podría haber electrón. Luego,

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{mv}$$

de donde

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

Esta cantidad  $mvr$  es el llamado *momento cinético* del electrón, y, como  $n$  ha de ser un número entero y  $h$  es la constante de Planck, resulta que el momento cinético del electrón sólo podrá tomar valores que sean múltiplos de  $h/2\pi$ : está *cuantizado*. Al entero  $n$  se le da el nombre de *número cuántico principal*. Elevando al cuadrado la expresión del momento cinético, tenemos  $m^2 v^2 r^2 = n^2 h^2 / 4\pi^2$ , y dividiéndola por la ya obtenida para la energía cinética,

$$\frac{1}{2} m v^2 = e^2 / 8\pi\epsilon_0 r,$$

resulta

$$r = \frac{\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m e^2}$$

que nos indica que el radio de la órbita electrónica no puede tener un valor cualquiera, sino sólo los que se obtienen haciendo  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Sustituyendo esta expresión de  $r$  en la que se halló para la energía,  $E = -e^2 / 8\pi\epsilon_0 r$ , resulta

$$E = \left( -\frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \right) \frac{1}{n^2}$$

es decir, que la energía no puede tomar un valor cualquiera, sino sólo los correspondientes a valores enteros de  $n$ . Como vemos, estamos conjugando los resultados obtenidos para el átomo de Rutherford con la aplicación del concepto cuántico de onda De Broglie, lo cual no ha hecho sino imponer restricciones a los valores posibles de  $r$  y de la energía del átomo. Esto fue realizado por el físico danés Niels Bohr, quien ideó este modelo atómico consistente en añadir al de Rutherford las condiciones de que *el electrón gira en órbitas estacionarias sin emitir energía radiante* (postulado 1.º); *el momento cinéti-*

*co del electrón es múltiplo de  $h/2\pi$*  (postulado 2.º), y que *cuando el electrón pasa de una órbita a otra de menor energía, la diferencia de energías la emite en forma de radiación de frecuencia  $f$ , tal que  $hf = \Delta E$* , donde  $\Delta E$  es la disminución de energía del átomo (postulado 3.º).

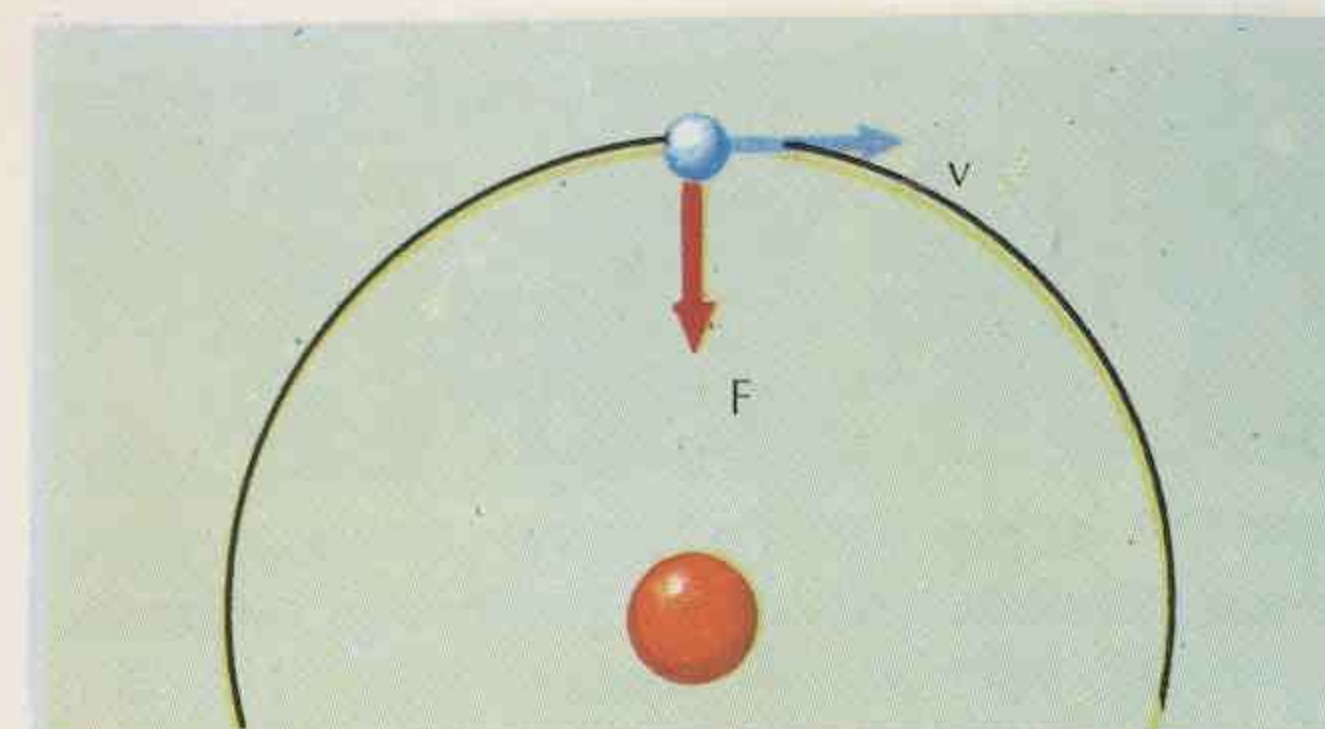
Este último postulado se comprende perfectamente. El electrón sólo puede pasar de una órbita a otra de radio distinto mediante un salto, ya que si lo hiciese siguiendo una trayectoria espiral el radio de curvatura pasaría por valores prohibidos. Por tanto, la energía pasará bruscamente del valor correspondiente a una órbita al de otra, y esta diferencia se emite en forma de fotón. Así, si el electrón salta de la órbita correspondiente al valor  $n$  del número cuántico principal a la correspondiente al valor  $n'$ , el fotón tendrá una frecuencia  $f$  tal, que

$$hf = -\frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n'^2} - \left( -\frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} \right) = \frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$$

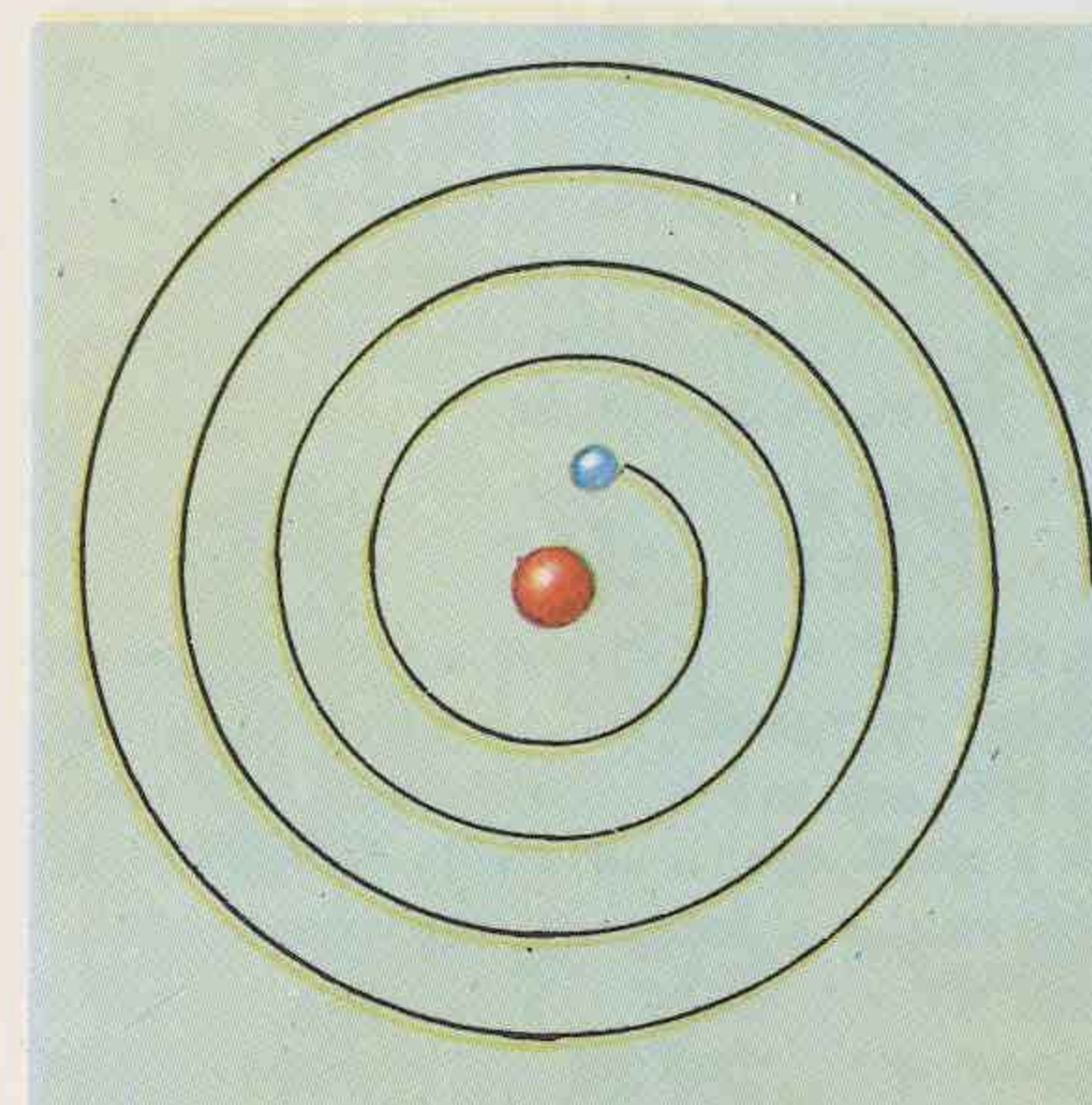
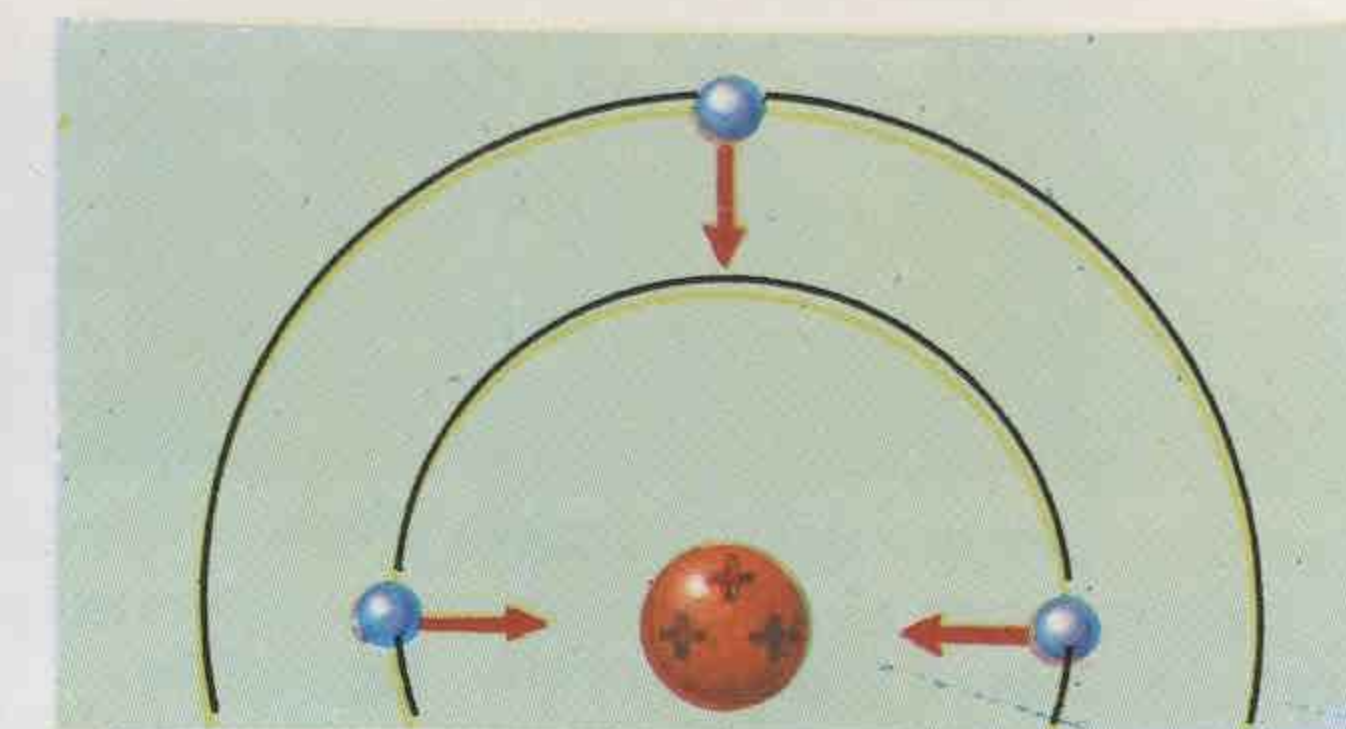
donde  $n'$  es un entero mayor que  $n$ , pues, por haber emisión de un fotón, la energía inicial de un átomo deberá ser superior a la final.

Cuando  $n = 2$ , es decir, cuando el electrón salta de una órbita exterior a la segunda, las radiaciones tienen longitudes de onda, correspondientes, del espectro. (Ya Balmer había observado estas radiaciones dispersando con un prisma o una serie de prismas la luz procedente de una lámpara de hidrógeno.)

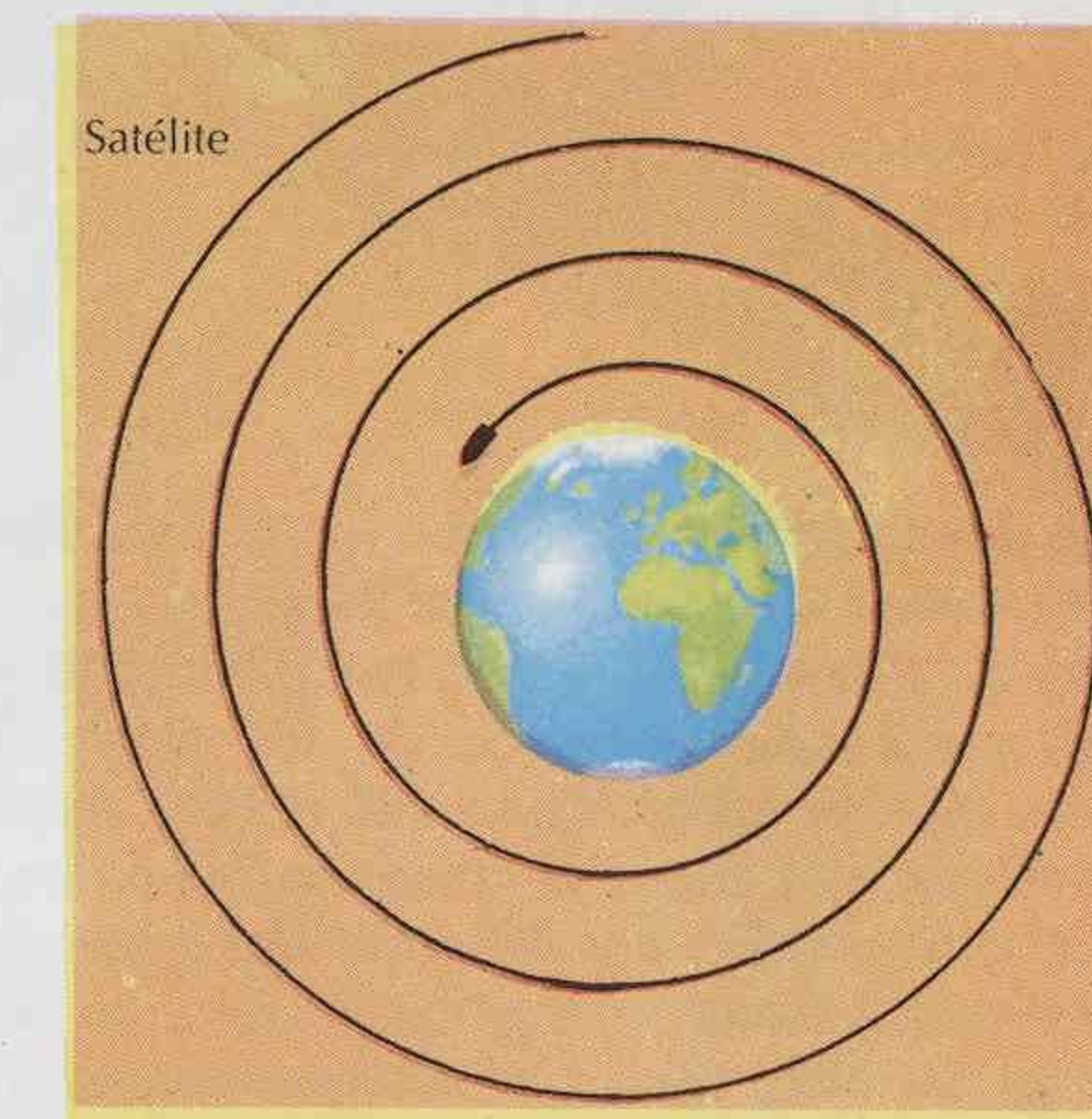
Cuando el electrón de un átomo se halla en la órbita de menor energía ( $n = 1$ ) se dice que se halla en su *estado fundamental*, y cuando no, diremos que está *excitado*. Los átomos excitados no pueden permanecer así y, en seguida, pasan a estados de menor energía hasta alcanzar el estado fundamental, cosa que pueden hacer directamente. Los saltos desde las órbitas tercera, cuarta, etc., a la segunda dan origen a las radiaciones visibles que constituyen la *serie de Balmer*. Los saltos a la primera órbita, o sea al nivel fundamental, corresponden a radiaciones de longitud de onda demasiado corta para excitar el ojo humano (radiaciones ultravioletas) y constituyen la *serie de Lyman*. Los saltos desde órbitas más externas a la tercera, cuarta y quinta dan radiaciones de longitud de onda demasiado largas para ser vistas (infrarrojas) y forman, respectivamente, las series de Pascher, Brackett y Pfund.



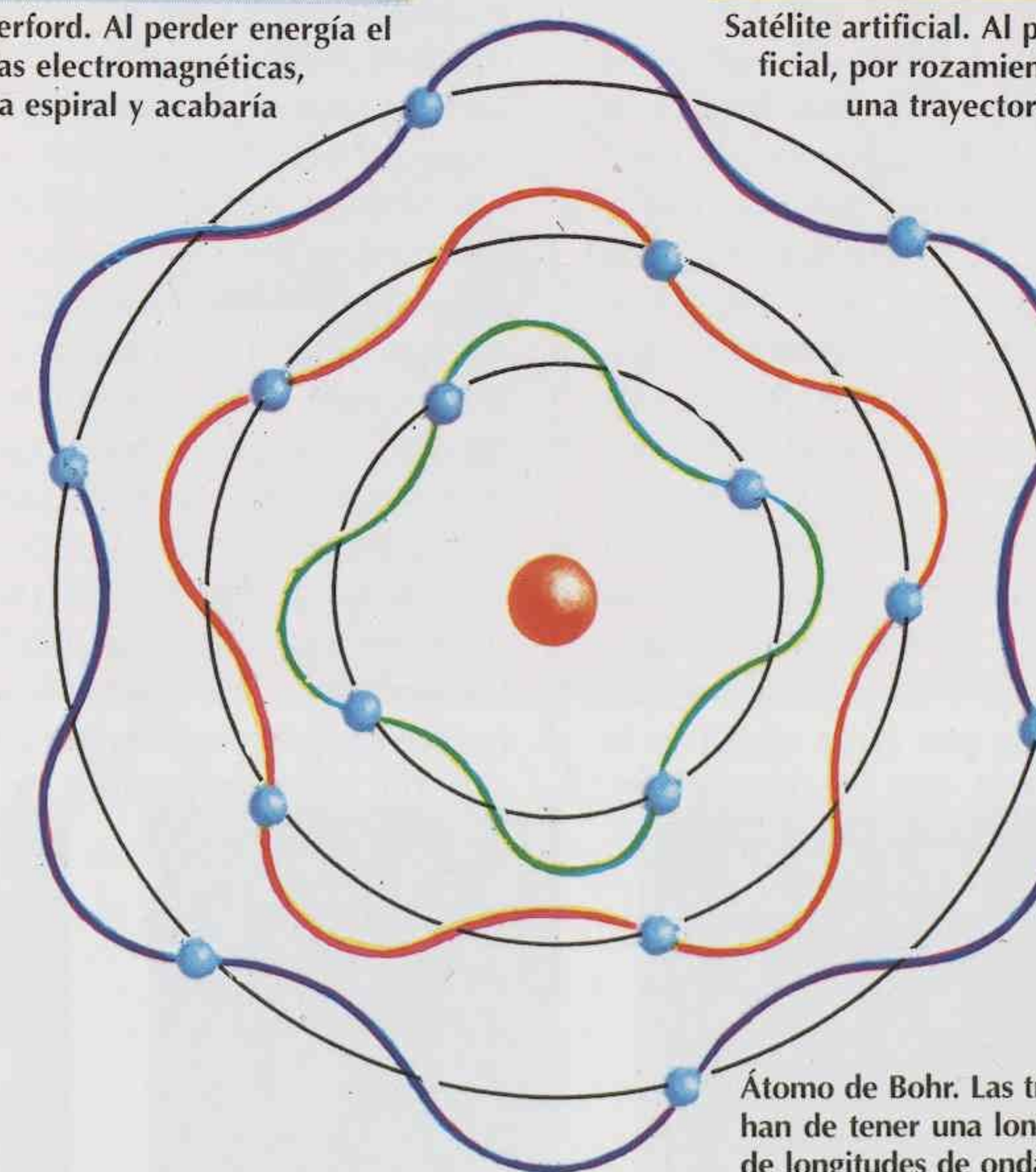
La fuerza centrípeta del electrón es la de atracción eléctrica que sobre él ejerce el núcleo.



Modelo atómico de Rutherford. Al perder energía el electrón, por emitir ondas electromagnéticas, describiría una trayectoria espiral y acabaría cayendo en el núcleo.



Satélite artificial. Al perder energía un satélite artificial, por rozamiento con la atmósfera, describe una trayectoria espiral y acaba cayendo en la Tierra.



Átomo de Bohr. Las trayectorias posibles del electrón han de tener una longitud igual a un número entero de longitudes de onda De Broglie (en la fig., casos 4, 5 y 6).

Resumiendo lo anterior: el átomo de hidrógeno y el de cualquier otro elemento sólo pueden hallarse en determinados estados a los que corresponden valores fijos de la energía atómica; o, como suele decirse, tienen unos niveles energéticos determinados y característicos del elemento, que son los que tendría un sistema solar constituido por un núcleo positivo masivo, con unos electrones girando alrededor de él en órbitas determinadas. Observe el lector que no decimos que el átomo sea un tal sistema solar, sino que se comporta como tal, añadiéndole los postulados de Bohr. Es decir, se trata de un modelo útil por lo muy intuitivo que es, si bien en la actualidad se trabaja con modelos mucho más abstractos que requieren el empleo de matemáticas muy elevadas, pero que permiten comprender fenómenos atómicos que no interpreta el modelo de Bohr.

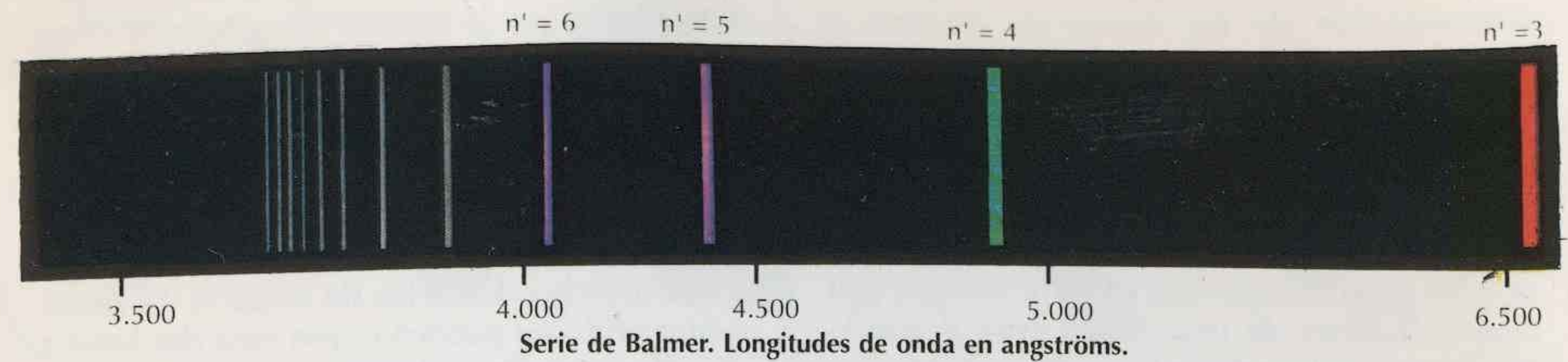
**NÚCLEO ATÓMICO**

Las propiedades químicas de los átomos vienen determinadas por el número de electrones existentes en su corteza, por lo que para estudiar el comportamiento químico de los átomos no sería preciso saber acerca del núcleo atómico gran cosa más que la ya conocida. Sin embargo, el núcleo puede sufrir determinadas transformaciones que lleven consigo una variación de su carga positiva, cosa que altera el número de electrones que la compensan, y, por tanto, se trataría de otro elemento químico diferente del que inicialmente se tenía. Ello nos induce a prestar atención especial al núcleo del átomo, definiendo algunos términos que vamos a emplear frecuentemente. Llamaremos *nucleón* a toda partícula constituyente del núcleo, y *número másico* al número de nucleones que contenga. Se observa que la masa de los núcleos es siempre igual, con gran aproximación, a un múltiplo entero de la masa del protón, por lo que pudiera colegirse que los núcleos están constituidos por protones. Sin embargo, en 1932, Chadwick descubrió la existencia de una partícula de masa muy próxima al protón y que carecía de carga eléctrica, por cuya causa se le dio el nombre de *neutrón*. Los núcleos están, pues, constituidos por protones y neutrones,

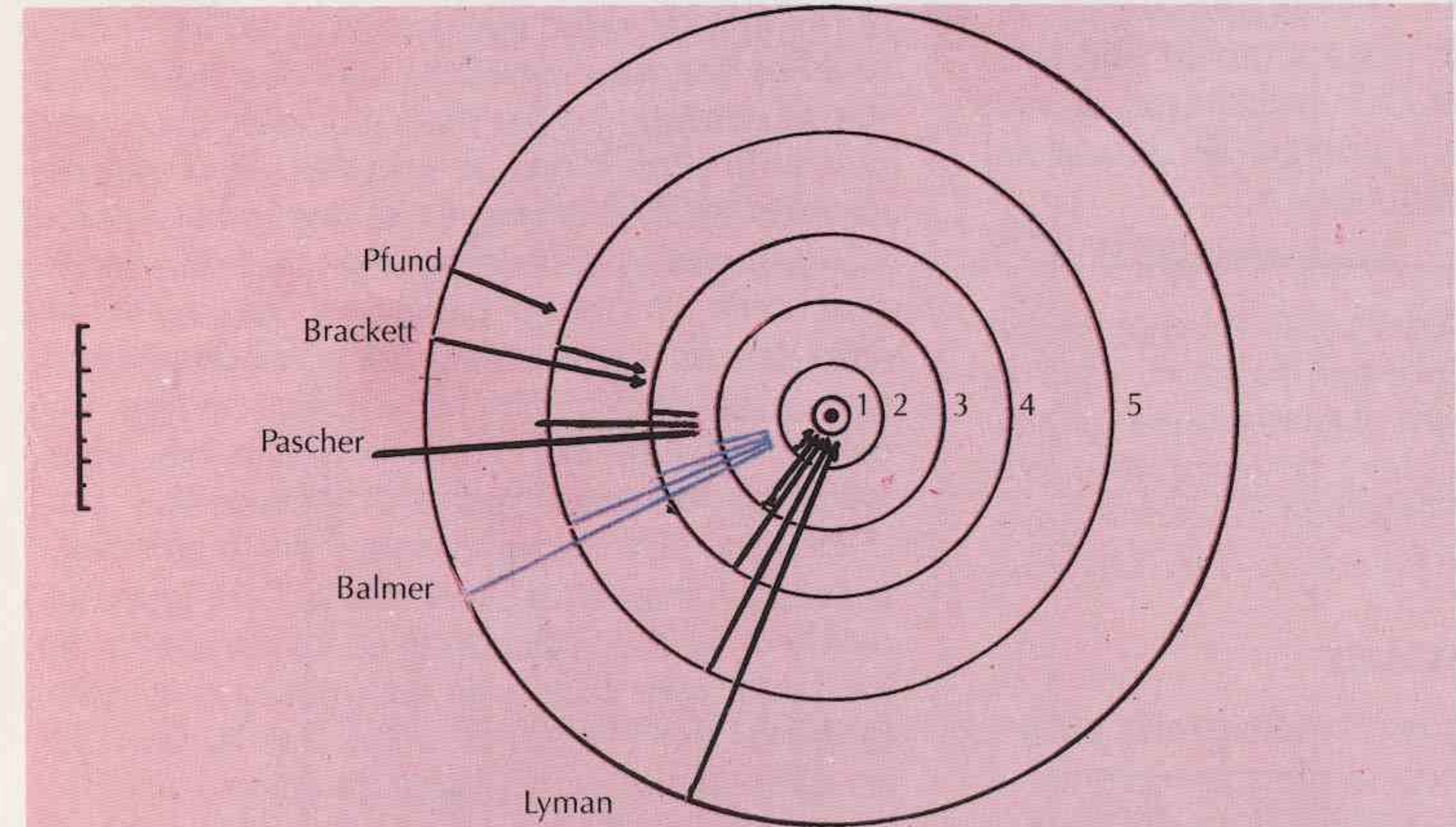
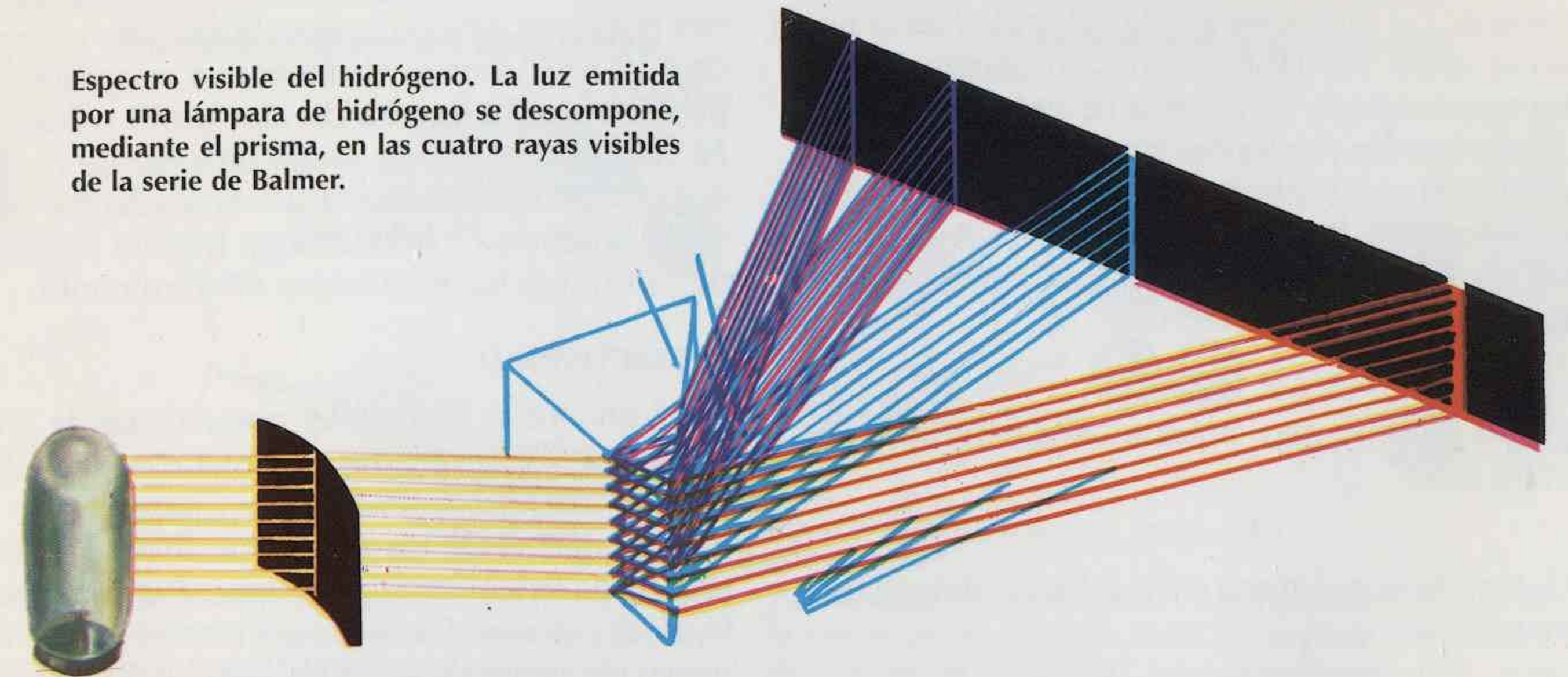
que son los nucleones. El número de protones que tiene un núcleo es igual al de los electrones de la corteza exterior, y recibe el nombre de *número atómico*. Los átomos de igual número atómico pueden contener en su núcleo números diferentes de neutrones. Su comportamiento químico es el mismo, pero las masas de dichos átomos deberán ser diferentes. Tales átomos reciben el nombre de isótopos. El hidrógeno tiene tres isótopos: el hidrógeno ordinario, cuyo núcleo tiene solamente un protón; el deuterio, que tiene, además, un neutrón; y el tritio, que tiene dos neutrones. Muchos elementos constan de varios isótopos y, entre ellos, el carbono tiene un isótopo con seis protones y seis neutrones. La dozava parte de la masa de este átomo se toma como unidad de *masa atómica relativa*, y se simboliza por la letra *u*. Esta unidad vale  $1,6603 \cdot 10^{-27}$  kg. Referidas a esta nueva unidad, las masas del electrón, protón y neutrón son, respectivamente:

$$m_0 = 5,486 \times 10^{-4} u; m_p = 1,0073 u; m_n = 1,0087.$$

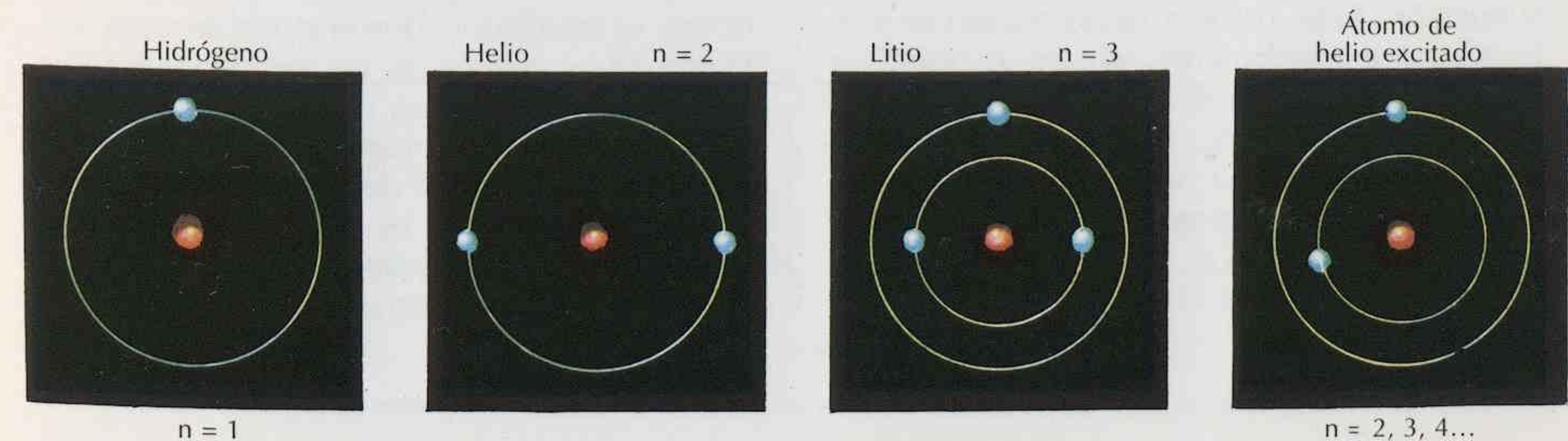
La existencia de los neutrones en el núcleo es fácilmente comprensible. Imaginando el núcleo como una esfera, uno de ellos que fuera bastante grande tendría un radio del orden de 10-15 m, es decir, unas cien mil veces menor que el tamaño del átomo, según se deduce del experimento de Rutherford. En un espacio tan pequeño como dicho núcleo deberán existir muchos protones (entre 50 y 100), que se ejercen repulsiones coulombianas fortísimas dada la pequeñez de las distancias que los separan. Ahora bien, entre los distintos nucleones existen *fuerzas de enlace*, que a distancias cortas son intensísimas, pero que disminuyen muy rápidamente al aumentar la distancia, hasta tal punto que fuera del núcleo ya son prácticamente nulas. Así, pues, un protón se hallará atraído por las fuerzas que sobre él ejercen todos los nucleones y repelido por las fuerzas eléctricas de los demás protones. Éstas serán menores cuando haya neutrones que separen los protones, por ser dichas fuerzas inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia, haciéndose posible de esta manera tener núcleos estables.



Espectro visible del hidrógeno. La luz emitida por una lámpara de hidrógeno se descompone, mediante el prisma, en las cuatro rayas visibles de la serie de Balmer.



Series espectrales del hidrógeno. Los saltos que se indican del electrón entre las órbitas, dan lugar a las cinco series espectrales. Los radios de las órbitas no están dibujadas a escala.



Átomos de distintos elementos en su estado fundamental.

**ENERGÍA NUCLEAR**

No podemos describir aquí métodos para la determinación de las masas de núcleos y nucleones, pero sí diremos que al buscar la masa que tiene un núcleo se halla siempre un valor poco inferior a la suma de las masas de los nucleones que lo integran. A dicha diferencia se llama *defecto de masa del núcleo*. ¿A qué se debe? Ya hemos dicho que la teoría de la Relatividad indica que masa y energía son manifestaciones de una misma cosa y que la relación entre la energía  $E$  y la masa  $m$  equivalente es  $E = mc^2$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. Por tanto, la masa desaparecida se ha transformado en *energía de enlace*, liberada al reunirse los nucleones para formar el núcleo, debiendo suministrar a éste dicha energía para desintegrarlo en sus componentes. Así, pues, un núcleo de número atómico  $Z$  tendrá  $Z$  protones que totalizan una masa

$$Zm_p$$

y si es  $A$  su número másico,  $A-Z$  neutrones de masa total

$$(A - Z) m_n.$$

Llamando  $m$  a la masa del núcleo, el defecto de masa será

$$Zm_p + (A - Z) m_n - m.$$

Como una unidad de masa atómica equivale, según la anterior relación relativista, a una energía de 931 MeV, la energía de enlace del núcleo considerado será igual a

$$931 [ Zm_p + (A - Z) m_n - m ] \text{ Me V.}$$

Los números más estables serán los que tengan mayor energía de enlace por nucleón, y por lo tanto requieren también mayor energía para su desintegración. En la curva de la figura puede verse que son los de número atómico mediano, a los que corresponde unos 8,75 MeV/nucleón.

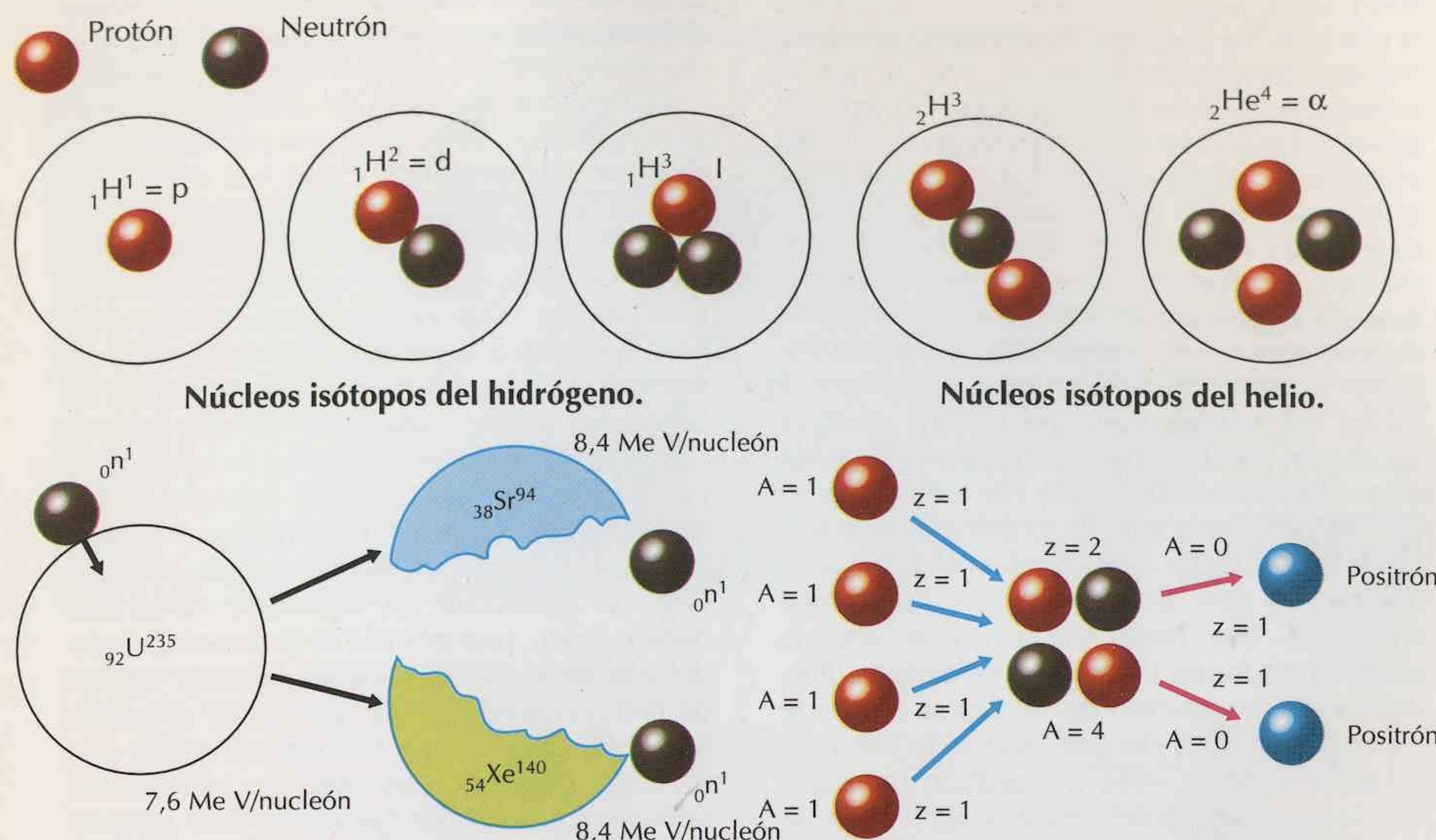
**FISIÓN Y FUSIÓN NUCLEARES**

La curva representativa de la energía de enlace por nucleón indica que la correspondiente al isótopo del uranio de masa 235 es de 7,6 MeV/nucleón. Si se partiera dicho núcleo en dos partes aproximadamente iguales se tendrían dos núcleos correspondientes a la región del máximo de la curva, por lo que poseerían ambos mayor energía de enlace por nucleón, es decir, se habría liberado una gran energía en este proceso llamado de *fisión*, pudiéndose calcular que cada fisión liberaría poco menos de

200 MeV. La gran cantidad de fisiones de este tipo que se producen en la *bomba atómica* primitiva hace que la enorme liberación de energía produzca resultados catastróficos. En la curva examinada hemos pasado del extremo de la derecha al centro, pero si buscamos elevar la energía de enlace por nucleón a fin de obtener liberación de energía también podríamos pasar del extremo de la izquierda (nitrógeno) al isótopo del helio de masa 4. Es decir, cuatro protones pueden unirse para dar lugar a un número de helio de masa 4 y a dos electrones positivos, con lo que se libera una energía de 27,7 MeV. Este es el efecto que se aprovecha para realizar la bomba de hidrógeno o *bomba H*. Para que se realice dicho proceso de *fusión* es necesaria una temperatura elevadísima, que suele obtenerse mediante una bomba atómica de fisión que hace las veces de fulminante.

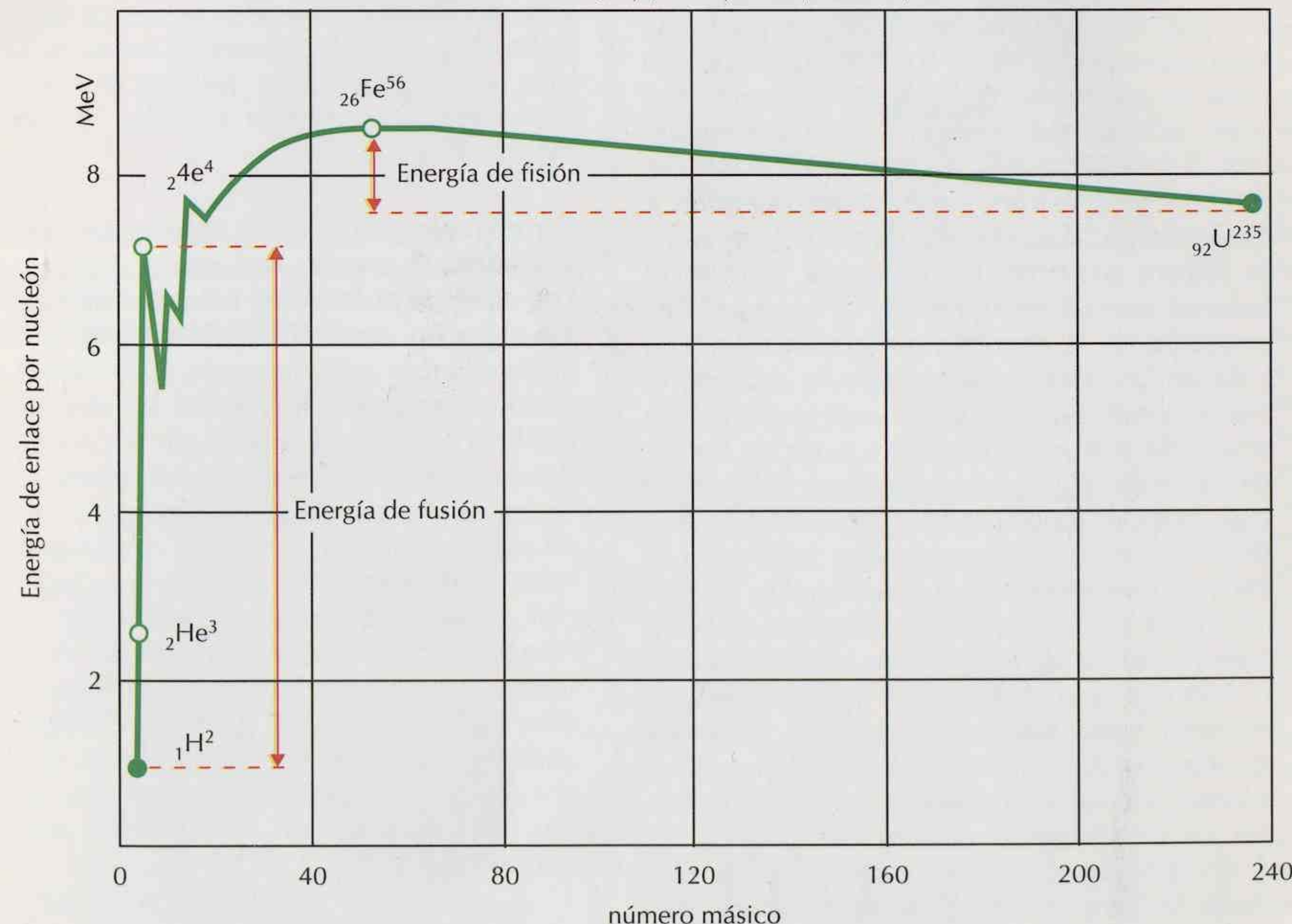
**RADIATIVIDAD**

En el año 1896, Becquerel observó que la presencia de determinadas sustancias velaba las placas fotográficas envueltas en papel negro e incluso dentro de los chasis metálicos. A tales sustancias se les llamó *radiactivas*. Posteriormente, los esposos Curie consiguieron aislar un nuevo elemento de la pechblenda, al que dieron el nombre de *radio* por presentar radiactividad. Muchos son los elementos naturales radiactivos que se conocen hoy en día; colocando uno cualquiera de ellos, o una de sus sales, en el interior de un bloque de plomo en el que se haya practicado un túnel, saldrán por éste las radiaciones que emite el cuerpo radiactivo, las cuales, al atravesar un campo magnético, observaremos que se escinden en tres haces de rayos: uno, los rayos *alfa*, se desvían como lo harían las cargas eléctricas positivas, estando constituidos por núcleos de helio (dos protones y dos neutrones), a los que llamaremos *partículas  $\alpha$* . Otro grupo se desvía en sentido opuesto al de los rayos alfa. Se les llama rayos *beta*, y se comprueba que están formados por electrones, a los que también se les suele llamar *partículas  $\beta$* ; de aquí que se llama *betatrón* al dispositivo acelerador de electrones, ya estudiado. El tercer grupo de rayos, llamados rayos *gamma* ( $\gamma$ ), no son desviados por los campos magnéticos ni eléctricos, pues se trata de ondas electromagnéticas, o sea fotones, de longitudes de onda del orden de las de los rayos X y más cortas; es decir, son fotones de energías iguales o mayores que las de los rayos X, según cuál sea el elemento que los emite.



Fundamento de la bomba atómica. La fisión de un núcleo de  ${}^{92}\text{U}^{235}$  da origen a fragmentos más estables, liberándose una gran energía (0,8 MeV por nucleón).

Fundamento de la bomba H. Cuatro protones se unen para formar un núcleo helio  ${}^2\text{He}^4$  y dos positrones (electrones positivos), liberando una energía de 27,7 MeV ( $27,7/4 = 6,9$  MeV/nucleón).



Energía de enlace por nucleón en función del número másico de los núcleos atómicos.

Cada elemento radiactivo, salvo unos pocos que pueden integrarse dando una partícula alfa o una beta, se desintegra siempre de la misma manera (dando siempre  $\alpha$  o siempre  $\beta$ ), yendo acompañada dicha desintegración de emisión gamma. Las teorías de las desintegraciones alfa y beta son complicadas, y aquí nos limitaremos a decir que, en el interior del núcleo, dos protones y dos neutrones pueden unirse para formar una partícula cuya energía de enlace por nucleón es bastante elevada, por lo que resulta muy estable. Si la energía total es suficientemente elevada, vencerá las fuerzas nucleares y saldrá del núcleo con una energía cinética igual a la que tenía dentro, menos la gastada contra las fuerzas nucleares. Por eso cada emisor alfa posee una energía cinética característica de las partículas  $\alpha$  emitidas. Al abandonar el núcleo, en éste se produce una hecatombe energética que hace que emita la energía sobrante en forma de fotón  $\gamma$ . La emisión  $\beta$  se debe a que un neutrón del núcleo se convierte en un protón y un electrón (que es la partícula  $\beta$ ), pero como la masa del neutrón es mayor que la suma de las del protón y el electrón, la masa aniquilada aparece en forma de energía electromagnética (fotón  $\gamma$ ) igual a  $mc^2$ , donde  $m$  es la masa aniquilada. En los procesos radiactivos, el principio de conservación de la energía debe entenderse desde un punto de vista relativista, es decir, considerando que una masa  $m$  equivale a una energía  $E = mc^2$ . Así, pues, la masa del neutrón de una desintegración  $\beta$  debe ser igual a la suma de las masas del protón y del electrón, y equivalente del fotón  $\gamma$ . Sin embargo, al medir esta última sólo aparece la tercera parte de la que haría cuadrar el balance energético. Tampoco se observa conservación de la cantidad de movimiento, a la vista de las direcciones en que se mueven el electrón emitido y el núcleo nuevo, por lo que se admite la existencia de otra partícula llamada *neutrino*, que carece de carga eléctrica y cuya masa en reposo es muy pequeña. Esta partícula se llevaría la energía que faltaba en el balance energético. En la actualidad se trabaja en buscar evidencias de su existencia, habiéndose llegado a algún resultado alentador. El lector puede comprender que cuando un elemento sufre una desintegración  $\alpha$ , su número atómico disminuye en dos unidades, y su número másico, en cuatro. Es decir, se transforma en un elemento distinto del anterior. La desintegración  $\beta$  también transmuta un elemento en otro, si bien el elemento «hijo» ten-

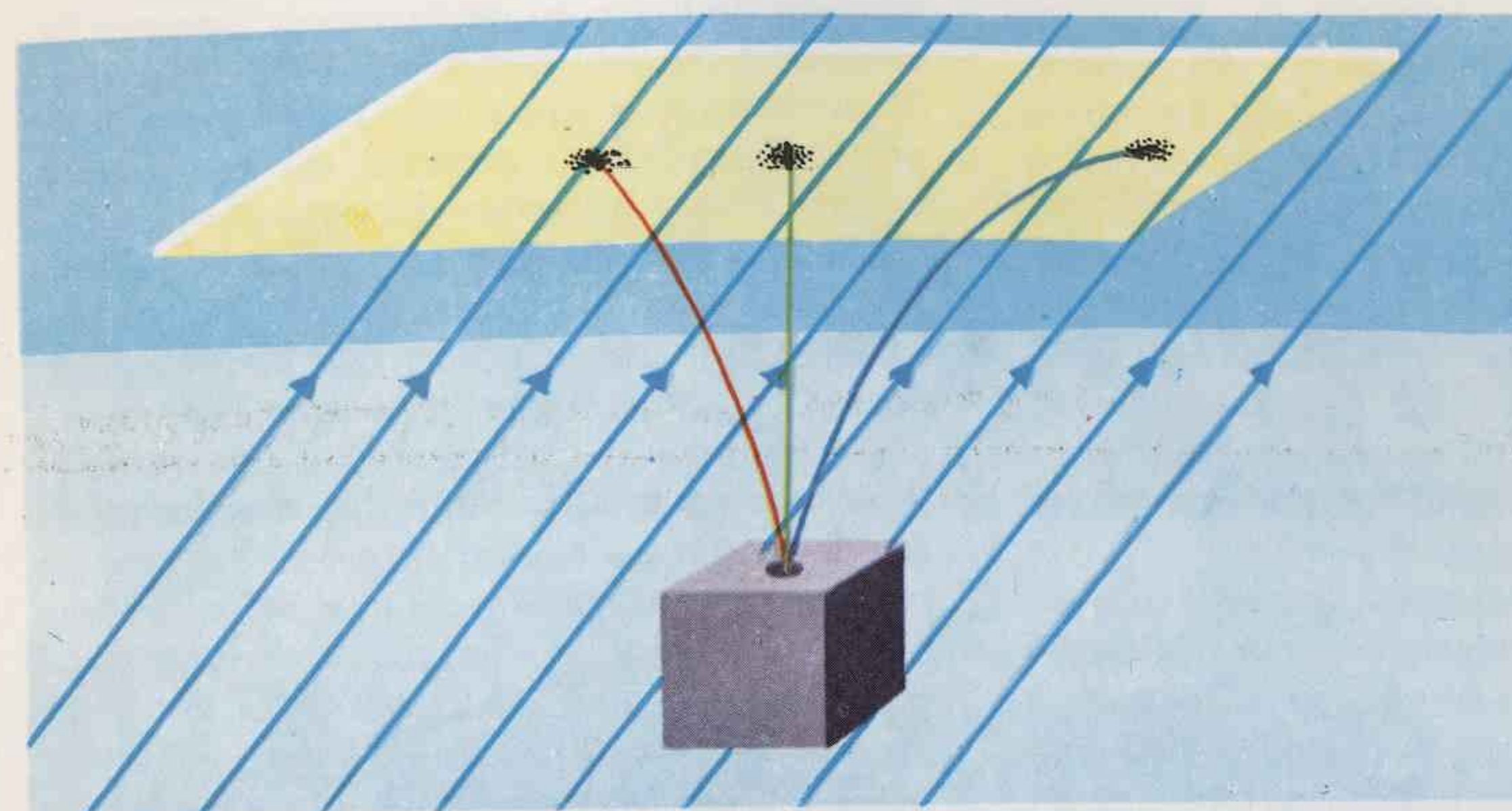
drá un número atómico superior en una unidad al del elemento «padre» (pues la carga positiva del núcleo ha aumentado en una unidad) y el número másico de padre e hijo será el mismo. Consideremos una masa de elemento radiactivo en ausencia de su elemento padre. Los átomos van desintegrándose uno tras otro, y no todos a la vez, pues no se hallan en un mismo instante en condiciones favorables para su desintegración. El tiempo que debe transcurrir para que la masa de elemento radiactivo se haya reducido a la mitad de la inicial recibe el nombre de *período de semidesintegración*. En las figuras se han consignado las tres familias radiactivas que se encuentran en la naturaleza, y al lado de cada elemento se consigna su período de semidesintegración. Así se comprende cómo al cabo de un tiempo suficientemente largo se alcanzará un *equilibrio radiactivo*, debido a que, procedentes de la desintegración del elemento padre, nacerán en cada unidad de tiempo un número de átomos de elemento hijo igual al de los que desintegran, con lo que la masa de cada elemento de una familia radiactiva permanece invariable. Ello permite calcular la edad de los minerales radiactivos.

REACCIONES NUCLEARES

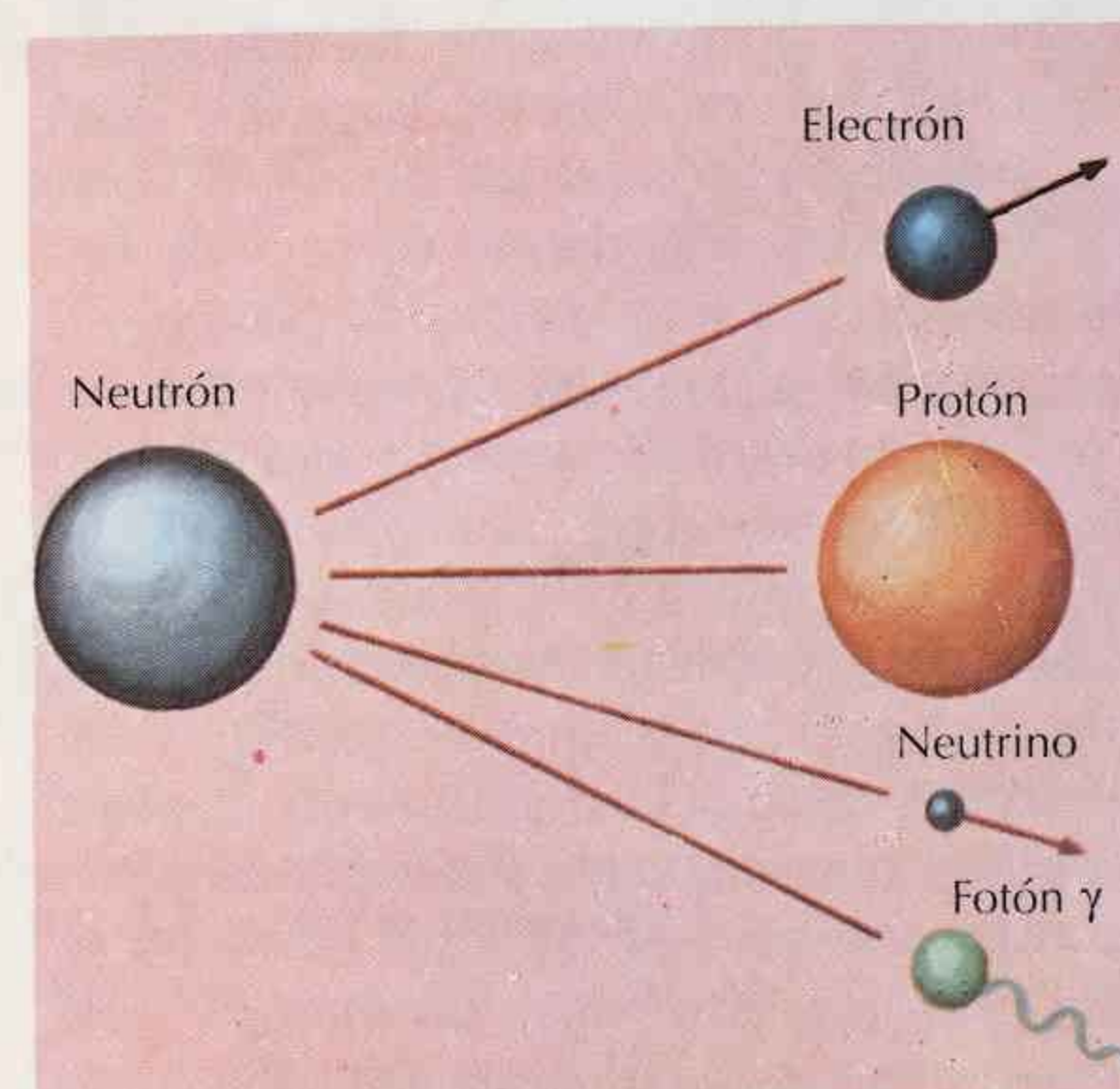
Para representar el núcleo de un elemento simbolizado por  $E$  colocaremos en forma de subíndice, a la izquierda, su número atómico  $Z$ , y como supraíndice, a la derecha, su número másico  $A$ ; así:

$${}^Z E^A$$

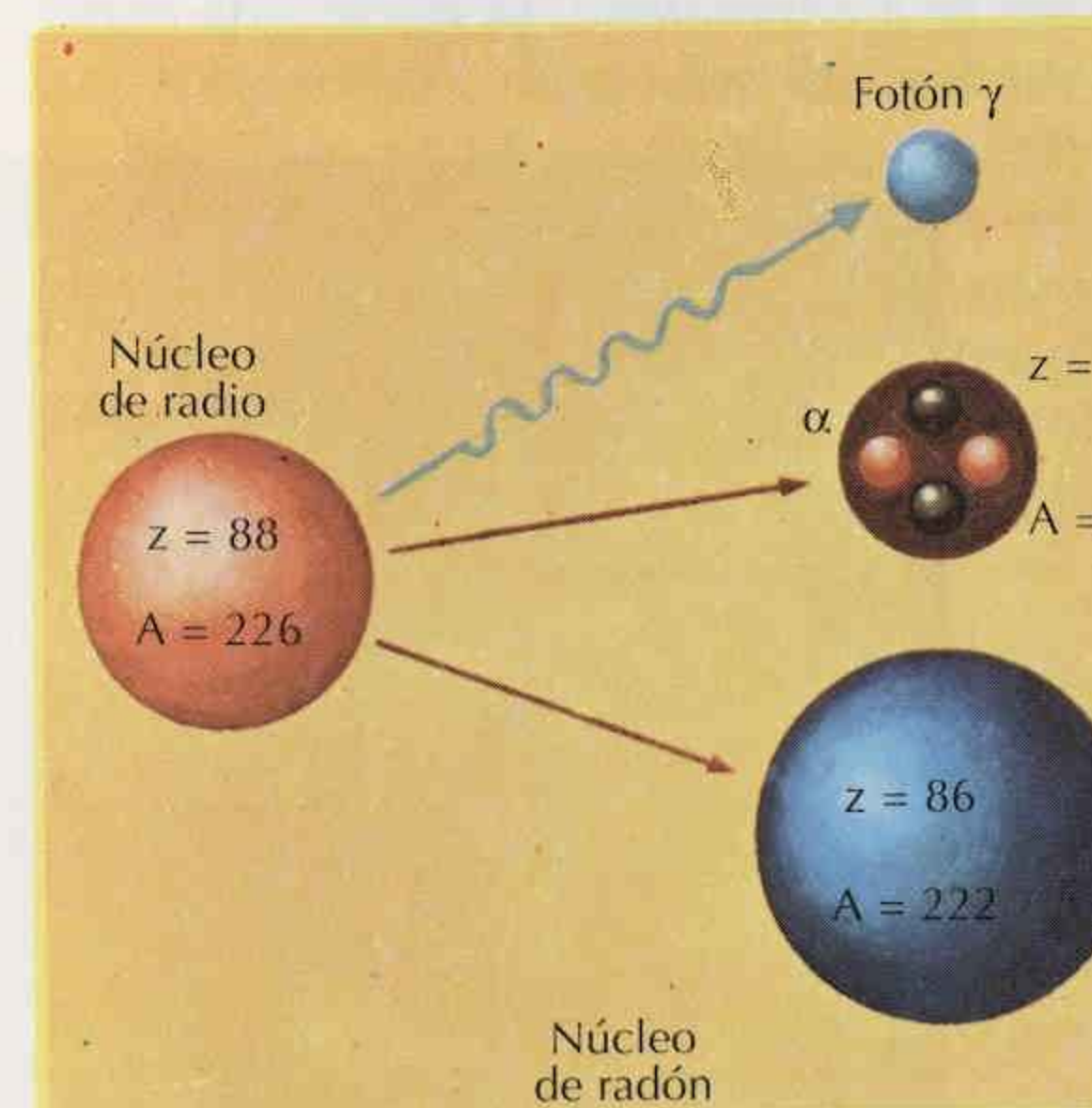
Por ejemplo, el protón se representará por  ${}^1_1\text{H}^1$  y la partícula  $\alpha$  será  ${}^2_2\text{He}^4$ , etc. Los cuerpos radiactivos naturales se transmutan unos en otros en forma natural, aunque, estableciendo artificialmente unas ciertas condiciones, se puede lograr que los dos núcleos estables intercambien parte de sus nucleones, dando lugar a otros núcleos diferentes, alguno de los cuales puede ser un isótopo no estable de algún elemento, el cual se desintegrará. Se habrá provocado una reacción nuclear artificial. En estas reacciones deben conservarse la carga eléctrica total, el número total de nucleones y la energía (relativista). La primera reacción nuclear la realizó Rutherford bombardeando el nitrógeno con partículas  $\alpha$  emitidas por el RaC'. obteniéndose oxígeno y un protón, de acuerdo con la siguiente reacción nuclear:



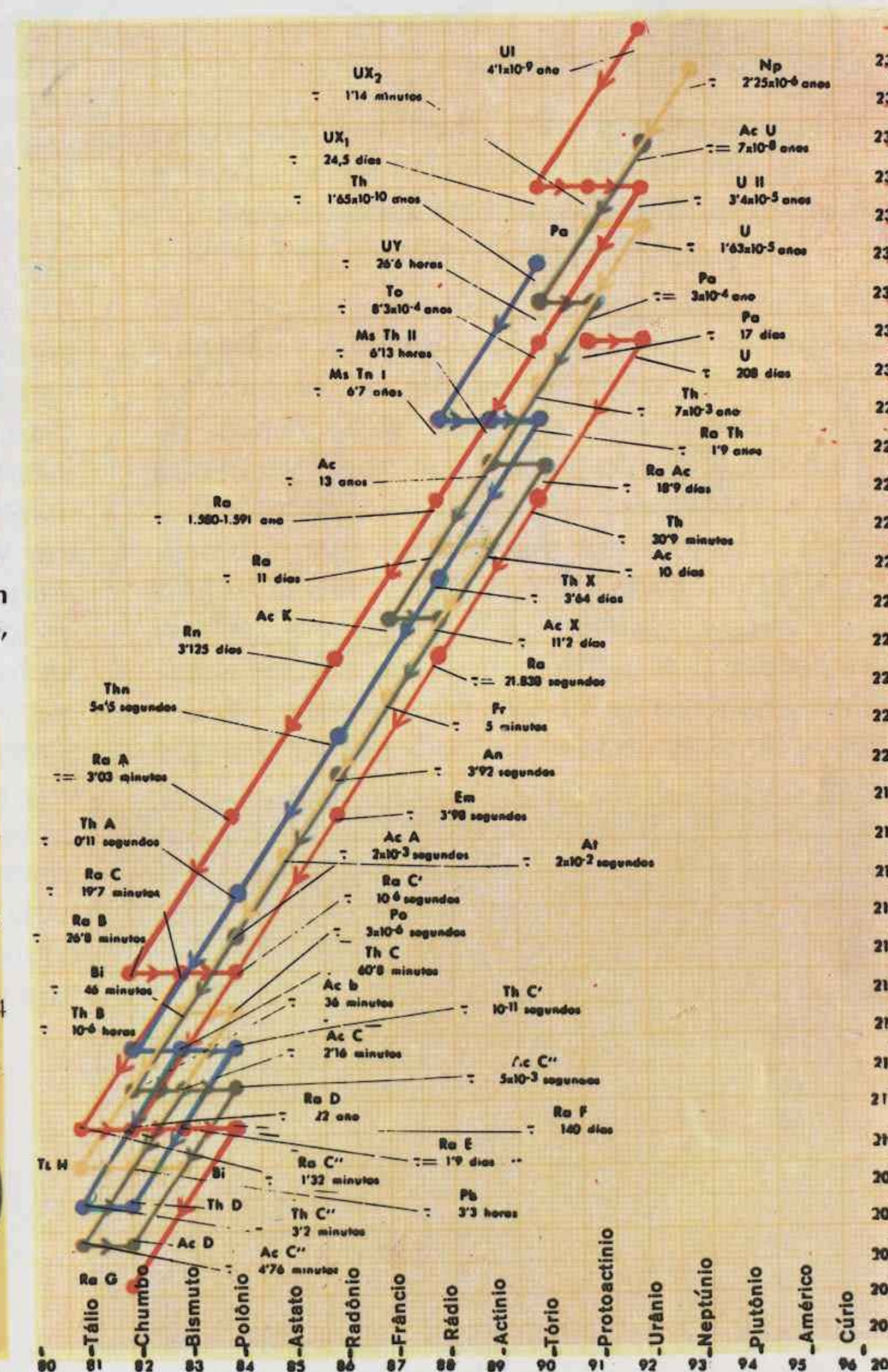
Las radiaciones emitidas por la sustancia radioactiva del interior de la caja de plomo impresionan en tres puntos la placa fotográfica, cuando se aplica un campo magnético. Los rayos  $\gamma$  no se desvían.



Desintegración  $\beta$ . Partículas en que se descompone un neutrón nuclear. El protón permanece en el núcleo, aumentando en 1 el número atómico.



Desintegración  $\alpha$ . El radio se convierte en radón, partícula  $\alpha$  y energía.  $Z$  disminuye en 2;  $A$ , en 4.

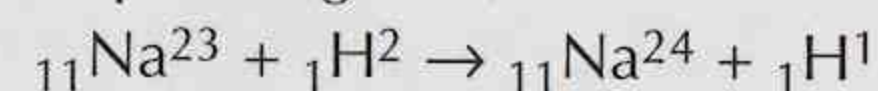


En cualquiera de los miembros de esta doble igualdad, la suma de los subíndices es 9 (conservación de la carga eléctrica) y la de los supraíndices es 18 (conservación del número de nucleones). La suma de las masas del protón y del oxígeno es algo mayor que la de las masas de la partícula  $\alpha$  y del nitrógeno, por lo que este defecto de masa deberá compensarse con energía de las partículas que reaccionan. La partícula  $\alpha$  emitida por el RaC<sup>1</sup> lleva una energía cinética de unos 9 MeV, que equivale a una masa superior al defecto, por lo cual sobra energía, teniendo también energía cinética los productos de reacción  ${}^8\text{O}^{17}$  y  ${}^1\text{H}^1$ .

En esta reacción, la partícula  $\alpha$ , gracias a su energía cinética, ha podido penetrar en el núcleo del nitrógeno aumentando su número atómico en 2 y su número másico en 4. El nuevo elemento tiene 9 de número atómico y, por tanto, es un isótopo del flúor que no se halla en la naturaleza porque es muy inestable y en seguida se desintegra, dando oxígeno y un protón.

**RADIOACTIVIDAD ARTIFICIAL**

Bombardeando el sodio  ${}_{11}\text{Na}^{23}$  con deuterones  ${}^2_1\text{H}$  se obtiene otro isótopo del sodio  ${}_{11}\text{Na}^{24}$  y un protón, pues según la reacción

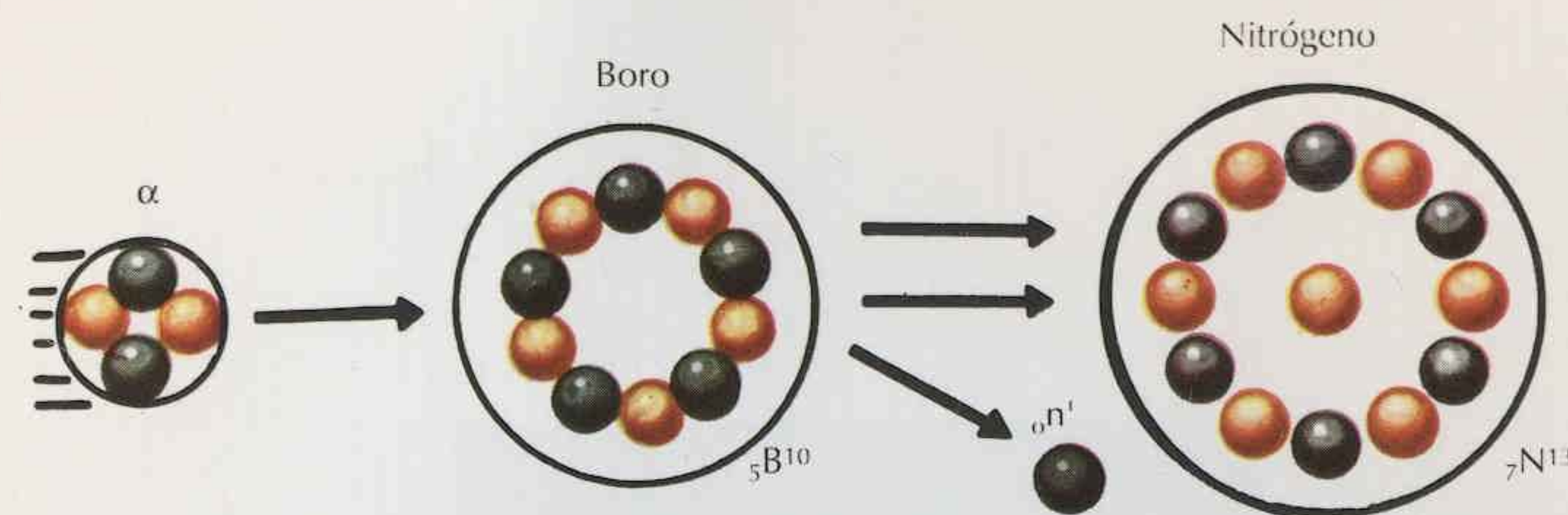


el isótopo del sodio  ${}_{11}\text{Na}^{24}$  no es estable y se desintegra emitiendo una partícula  $\beta$  y transmutándose en magnesio estable. El período de semidesintegración del sodio radiactivo es de 14,8 horas, y ello explica que no se encuentre en la naturaleza en cantidades apreciables, dada la rapidez con que se desintegra. También puede bombardearse con deuterones el fósforo  ${}_{15}\text{P}^{31}$ , y se obtiene  ${}_{15}\text{P}^{32}$  y protones, siendo radiactivo  $\beta$  el  ${}_{15}\text{P}^{32}$ , con un período de semidesintegración de 15 días. Estos isótopos radiactivos, de tanta utilidad en Medicina, se dice que son cuerpos artificialmente radiactivos, si bien es posible que lo único artificial sea su obtención, ya que pudiera ser que, en un tiempo, existieran en la naturaleza, pero dada la corteza de su período, no es factible que se hallen en la actualidad en cantidades apreciables.

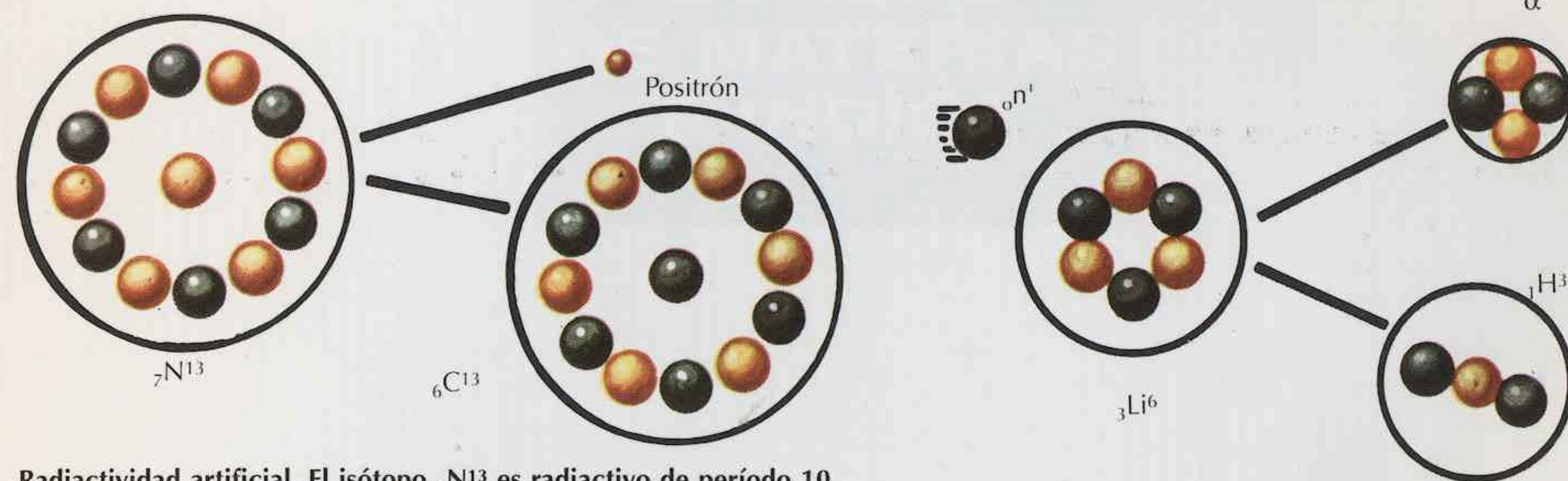
**ANTIMATERIA**

Al tratar de la fusión nuclear mencionamos la existencia de una partícula llamada *positrón*. Tiene la misma masa que el electrón y la misma carga, pero negativa. Es su imagen especular. No podemos disponer de positrones como de electrones, porque éstos son muchísimo más numerosos y el positrón pronto encontrará un electrón que lo atraiga y ambos se aniquilarán. Este aniquilamiento tiene lugar tras dar varias vueltas una partícula en torno a la otra, constituyendo una especie de átomo sin núcleo al que se ha dado el nombre de *positronio* y del cual se ha llegado a obtener el espectro. Las masas de una y otra partícula equivalen a 0,51 MeV, por lo que al aniquilarse se transforman en fotones de dicha energía (1,02 MeV en total). Ahora bien, con un fotón de 1,02 MeV se puede crear un par electrón-positrón en puntos en los que exista un campo eléctrico muy fuerte, cosa que ocurre en la inmediata proximidad de los núcleos atómicos deseados. Mandando rayos X de frecuencia adecuada a una lámina de plomo, en ella se generan pares electrón-positrón, es decir: se ha transformado energía radiante en materia. Con fotones más energéticos (1872 MeV) se ha conseguido hace poco generar un par protón-antiprotón. El *antiprotón* es una partícula de igual masa que el protón y de carga eléctrica igual a la del electrón. En este caso, la materialización de la energía requiere fotones más energéticos, ya que equivale la masa del protón a 936 MeV. También el protón y su imagen especular, el antiprotón, se aniquilan, dando lugar a fotones de 1872 MeV en total.

Se ha especulado acerca de la posibilidad de que exista una *antimateria*, es decir, una materia cuyos átomos estuvieran constituidos por una corteza exterior de positrones rodeando a un núcleo constituido por neutrones y antiprotones, pero hasta la fecha no se ha observado nada de esto. Ni siquiera se ha observado el equivalente al positronio realizado con el protón y el antiprotón.



Reacción nuclear. Bombardeando el boro con partículas  $\alpha$ , se obtiene nitrógeno  ${}^7\text{N}^{13}$  y un neutrón.

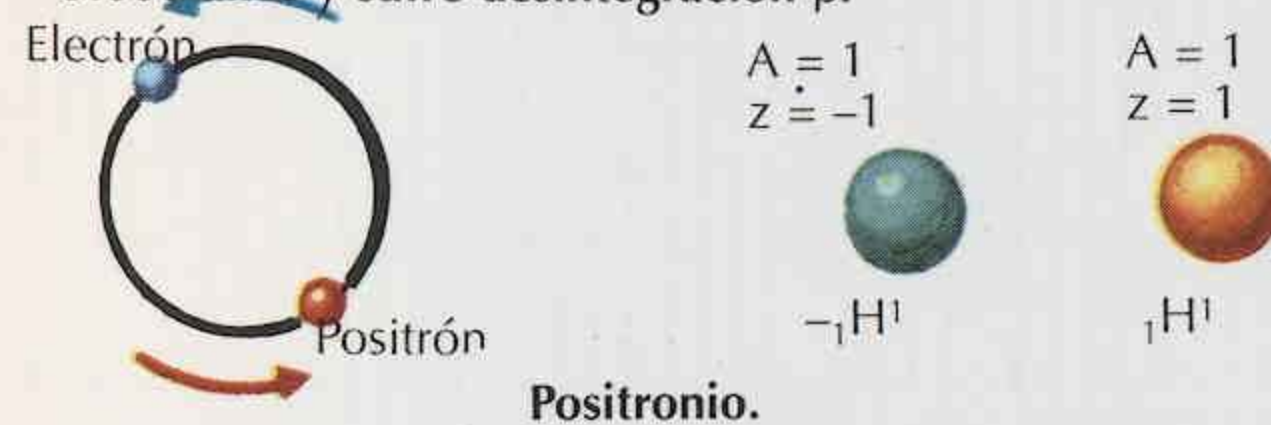


Radiactividad artificial. El isótopo  ${}^7\text{N}^{13}$  es radiactivo de período 10 minutos

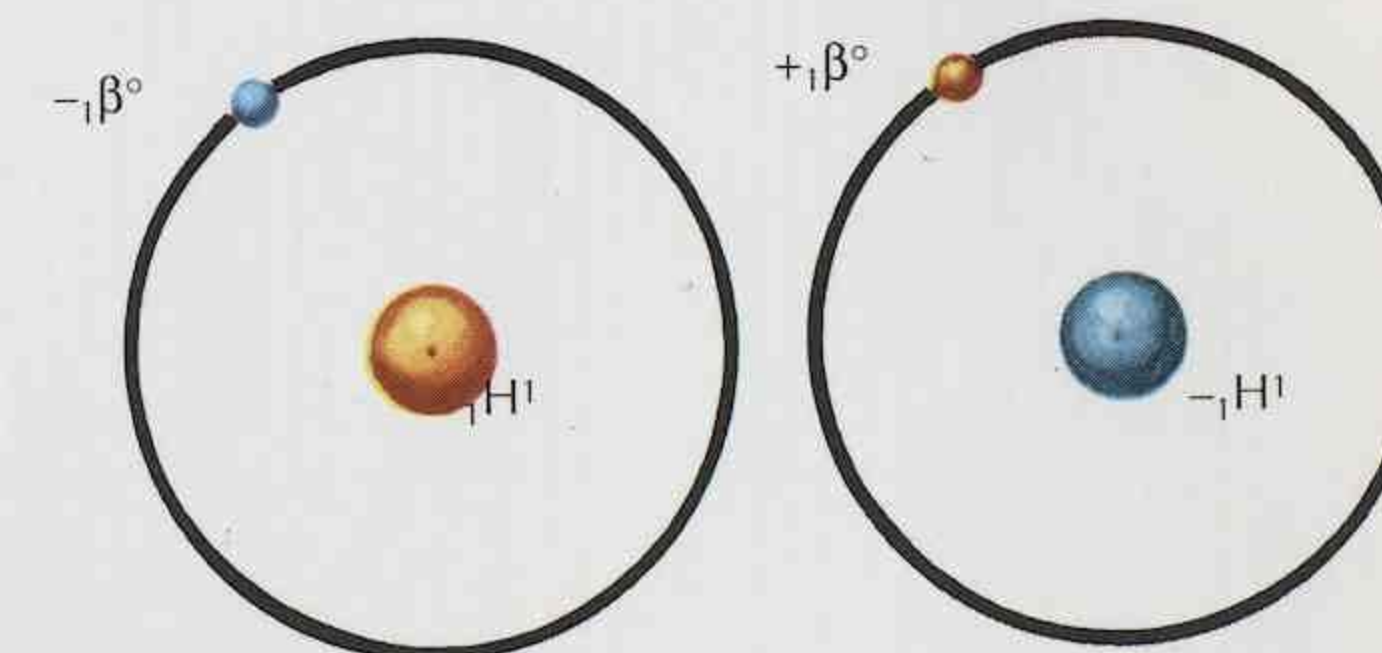
Reacción nuclear. Bombardeando el litio con neutrones, se obtienen partículas  $\alpha$  y tritio.



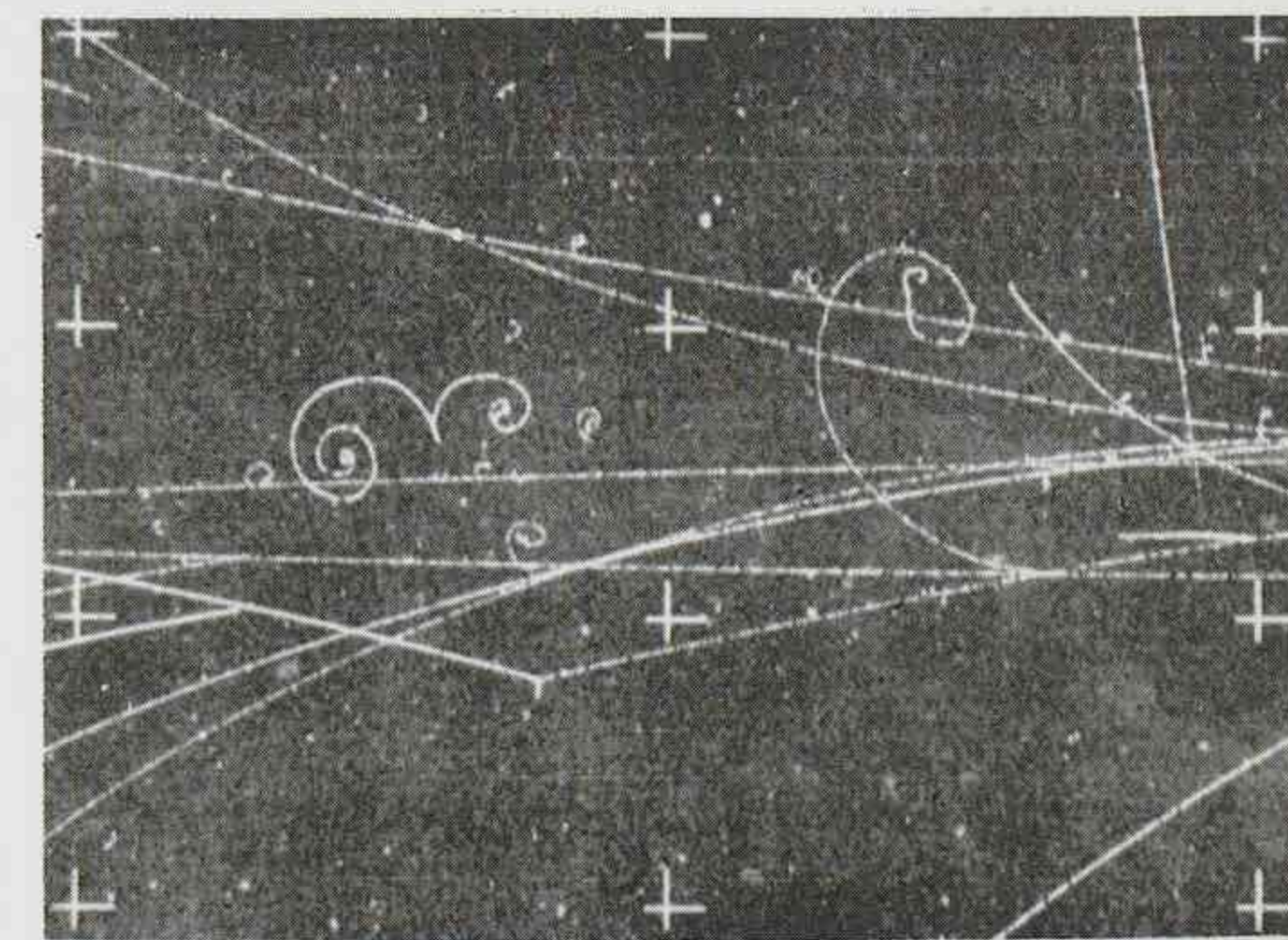
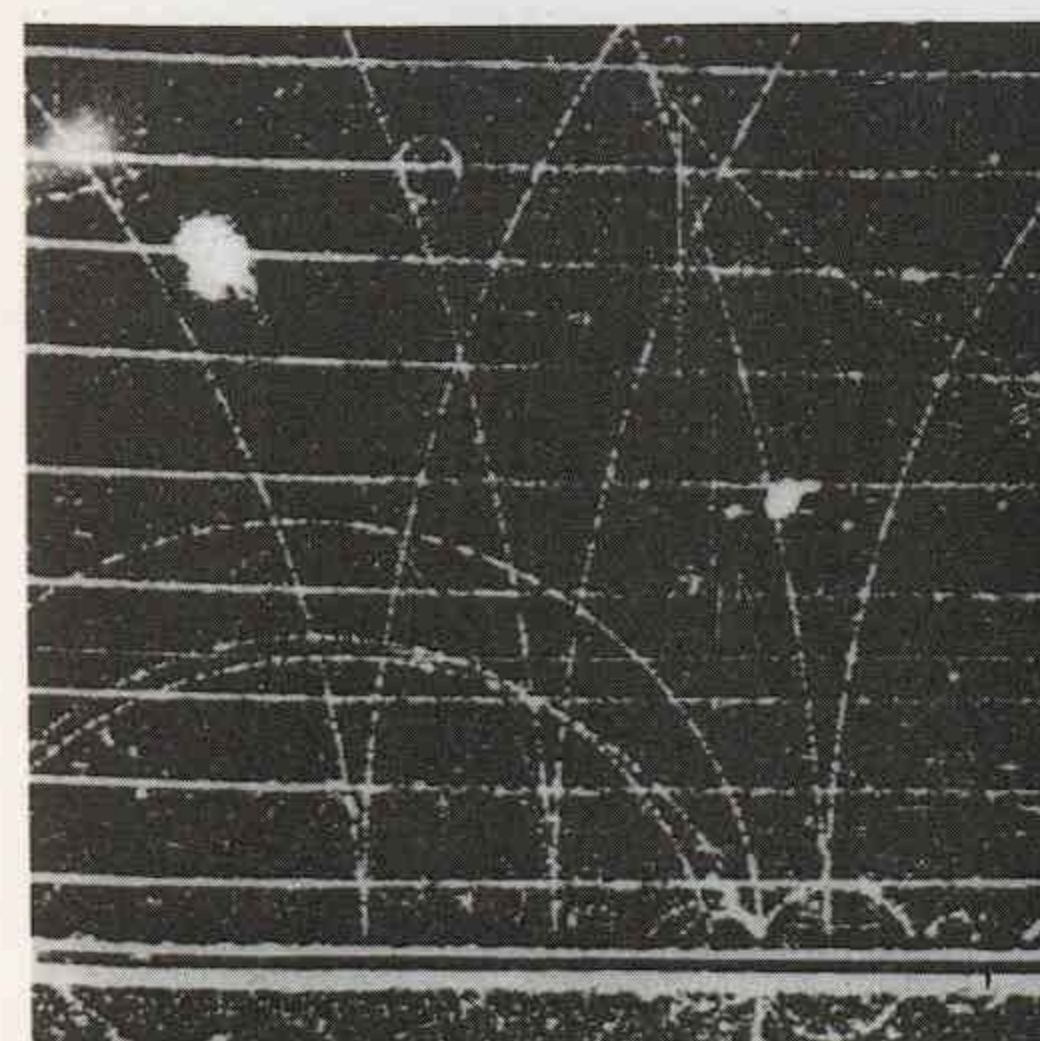
Radiactividad artificial. El tritio tiene un período de 5.600 años y sufre desintegración  $\beta$ .



Positronio.



Hidrógeno (izquierda) y antihidrógeno (derecha).



Izquierda: Los pares de trayectoria en V corresponden a pares electrón-positrón, obtenidos materializando rayos  $\gamma$ . El campo magnético desvía en sentidos opuestos las cargas de signo contrario. Derecha: Si es más intenso, hace que aquel par dé trayectorias en forma de 3.

**CUADRO  
DE MATERIAS  
E ÍNDICE**

## MAGNITUDES FÍSICAS

Magnitudes escalares y vectoriales.  
Vector .....A/1

## CINEMÁTICA

Movimiento rectilíneo uniforme.  
Velocidad media y velocidad instantánea...A/2  
Aceleración .....A/3  
Movimiento rectilíneo uniformemente  
acelerado.  
Movimiento circular uniforme .....A/4

## FUERZA

Momento de una fuerza.  
Par de fuerzas .....A/5

## DINÁMICA

Leyes de Newton .....A/6  
Dinámica del movimiento circular  
uniforme .....A/7

## GRAVITACIÓN

Gravedad terrestre.....A/7

## TRABAJO Y ENERGÍA

Energía.....A/8

## IMPULSO DE UNA FUERZA Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO

.....A/9

## ENERGÍA ORBITAL Y DE ESCAPE

.....A/10

## ELASTICIDAD

.....A/11

## VIBRACIONES Y ONDAS

Movimiento ondulatorio .....A/12

## ACÚSTICA

Ondas sonoras.  
Cualidades del sonido .....A/13

## TEMPERATURA Y CALOR

Escala termométrica.  
Calor .....B/1

## CAMBIOS DE ESTADO

Fusión y vaporización.  
Influencia de la presión en los  
cambios de estado .....B/2  
Ebullición.....B/3

## TERMODINÁMICA

.....B/4

## CARGA ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO

.....C/1

## POTENCIAL ELÉCTRICO

Ley de Coulomb.  
Diferencia de potencial.  
Conductores y aisladores .....C/2

## INDUCCIÓN ELECTROSTÁTICA

Condensadores; energía  
de un campo eléctrico .....C/3

## CORRIENTE Y POTENCIA

Ley de Ohm.  
Potencia: ley de Joule .....C/4

## MAGNETISMO

Campo magnético.....C/5

## FUERZAS MAGNÉTICAS

Fuerza magnética ejercida sobre  
una corriente rectilínea.  
Fuerza magnética ejercida sobre  
una espira y sobre un solenoide .....C/6

## CAMPOS MAGNÉTICOS

Campo magnético creado  
por una carga móvil.  
Campo magnético debido  
a un elemento de corriente.....C/7  
Campo magnético creado  
por una espira en su centro  
Propiedades magnéticas de la materia .....C/8

## INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

.....C/9

## BALÍSTICA ELECTRÓNICA

Movimiento de una carga  
en un campo eléctrico.  
Movimiento de una carga eléctrica  
en un campo magnético uniforme .....C/10

## CICLOTRÓN Y BETATRÓN

.....C/11

## ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Corriente de desplazamiento .....C/12

## ÓPTICA

Propagación de la luz. Rayo luminoso.  
Índice de refracción. Principio  
de Huygens-Fresnel. Reflexión .....D/1  
Refracción, dispersión y difracción.....D/2  
Interferencias.....D/3  
Polarización .....D/4

## IONIZACIÓN Y FOTOELÉCTRICIDAD

Ionización de un gas.  
Efecto fotoeléctrico.....E/1

## FOTONES MUY ENERGÉTICOS

Rayos X.  
Efecto Compton.....E/2  
Dualidad corpúsculo-onda .....E/3

## MOLÉCULAS Y ÁTOMOS

Modelos atómicos .....E/4  
Átomo de Bohr.....E/5

## NÚCLEO ATÓMICO

.....E/6

## ENERGÍA NUCLEAR

Fisión y fusión nucleares.  
Radiactividad .....E/7

## REACCIONES NUCLEARES

Radiactividad artificial.....E/8

## ANTIMATERIA

.....E/9

## SERIE A

- A/1. - Mecánica
- A/2. - »
- A/3. - »
- A/4. - »
- A/5. - »
- A/6. - »
- A/7. - »
- A/8. - »
- A/9. - »
- A/10. - »
- A/11. - »
- A/12. - »
- A/13. - »

## SERIE B

- B/1. - Termología
- B/2. - »
- B/3. - »
- B/4. - »

## SERIE C

- C/1. - Electricidad
- C/2. - »
- C/3. - »

- C/4. - Electricidad
- C/5. - »
- C/6. - »
- C/7. - »
- C/8. - »
- C/9. - »
- C/10. - »
- C/11. - »
- C/12. - »

## SERIE D

- D/1. - Óptica
- D/2. - »
- D/3. - »
- D/4. - »

## SERIE E

- E/1. - Física del mundo submicroscópico
- E/2. - » » » »
- E/3. - » » » »
- E/4. - » » » »
- E/5. - » » » »
- E/6. - » » » »
- E/7. - » » » »
- E/8. - » » » »
- E/9. - » » » »