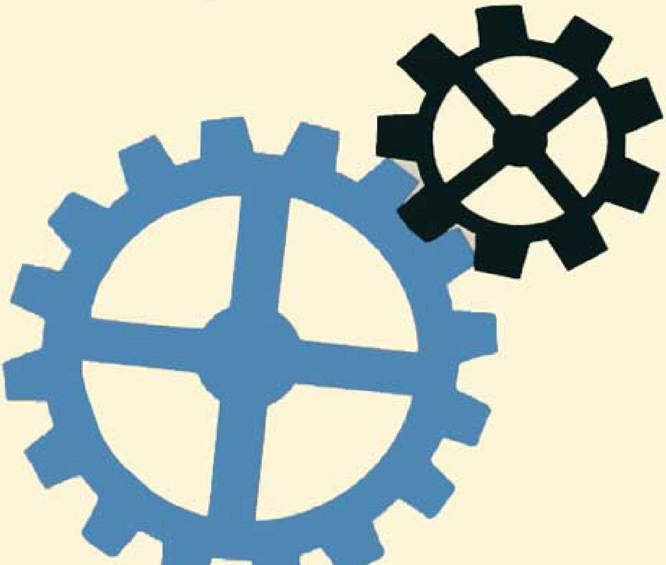
Y. PERELMAN

MECANICA
para todos



Editorial Mir Moscú

MECÁNICA
para
TODOS

Я. И. Перельман

МЕХАНИКА ДЛЯ ВСЕХ

Издательство «Наука»
МОСКВА.

Y. PERELMAN

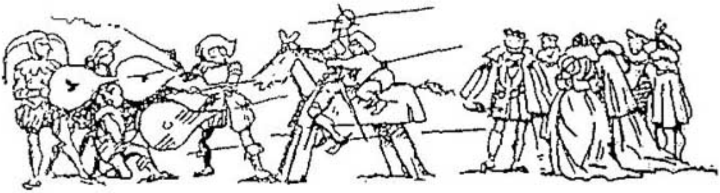
MECÁNICA para TODOS

Editorial MIR
MOSCÚ

Traducido del ruso por
Ruth Kann

Impreso en la URSS

На испанском языке



CAPITULO I

LAS LEYES FUNDAMENTALES DE LA MECANICA

EL EXPERIMENTO DE LOS DOS HUEVOS

En una mano tenemos un huevo, al que golpeamos con otro huevo. Ambos huevos son igualmente fuertes y se encuentran en las mismas condiciones. ¿Cuál de los dos se rompe: el golpeado o el que asesta el golpe?

Esta pregunta fué planteada, hace algunos años, por la revista norteamericana "Ciencia e Invención". La revista contesta que, según la experiencia, resulta más frecuentemente roto el huevo que se *movió;* con otras palabras, el huevo *que asestó el golpe.*

"La cáscara del huevo —explicaba la revista— tiene una forma oblicua, por esto la presión, efectuada por el golpe, sobre el huevo que no se ha movido, llega hacia la cáscara desde fuera; y como es sabido, la cáscara del huevo, semejante a cualquier bóveda, resiste bien a la presión desde fuera; existe también el hecho de que el esfuerzo fué realizado con el huevo que se movió. En este caso el huevo que se encuentra en movimiento empuja, en el momento del golpe, *desde el interior.* La bóveda resiste menos frente a tal presión que a la que viene del exterior y por eso se rompe."

Cuando este problema fué expuesto y propagado en las revistas de Leningrado, la contestación fué extremadamente variada.

Algunas de las soluciones afirmaban que la rotura se debía efectuar inevitablemente en el huevo que asestó el golpe y otras decían que este huevo tenía que ser el que queda intacto. Las pruebas parecían unánimemente verosímiles y no podían en nada cambiar ambas afirmaciones ¡que son fundamentalmente falsas! Fijar una norma, de la cual se pueda deducir cuál de los dos huevos se rompe, es en general imposible, porque entre el huevo golpeado y el que asesta el golpe, no existe ninguna diferencia. No es posible alegar que el huevo que asesta el golpe se mueve y el golpeado está quieto. Quieto, ¿en relación a qué? Si es en relación al globo terrestre, entonces es bien sabido, que incluso nuestro propio planeta se desplaza entre las estrellas, efectuando decenas de diversos movimientos; todos estos movimientos afectan tanto al huevo "golpeado", como al que "asesta el golpe", y nadie puede decir cuál de ellos se mueve más

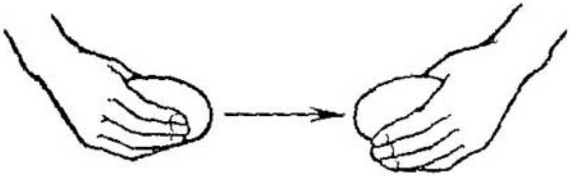


Fig 1.—¿Cuál de los dos huevos se romperá?

rápidamente entre las estrellas. Para pronosticar el destino del huevo por medio del testimonio del movimiento y del reposo, hacía falta remover toda la astronomía y definir el movimiento de cada uno de los dos huevos que asestan golpes en relación con los astros que no se mueven. Esto no es posible hacerlo porque varios de los astros aparentemente en reposo se mueven también ellos y todo su conjunto; la Vía Láctea, se transforma en relación a la aglomeración de sus estrellas.

El experimento de los huevos, como es visible, nos arrastra hacia el abismo de la creación del mundo y nos indica que no estamos cerca de la solución de este problema. Por otra parte, tampoco estamos tan alejados, porque la excursión hacia los astros puede facilitarnos la comprensión de aquella verdad decisiva, de que el movimiento de los cuerpos es imposible imaginárselo sin el impulso de otros cuerpos, con los cuales este movimiento está relacionado. Los cuerpos que están relacionados entre sí no pueden moverse aisladamente, *sólo dos cuerpos juntos* que están relacionados, pueden transformarse, aproximándose o alejándose recíprocamente. Los huevos que chocan se encuentran en el mismo estado de movimiento; ellos se aproximan recíprocamente, esto es todo lo que podemos decir sobre sus movimientos. El resultado de su encuentro no depende de cuál de los dos es considerado por nosotros como inmóvil y cuál es considerado en movimiento.

Hace trescientos años, Galileo fué el primero en proclamar la relación proporcional entre el movimiento y el reposo y su completa equivalencia. Este "principio de la relatividad de la mecánica clásica" no debe ser confundido con el "principio de la relatividad de Einstein", que ha abierto los ojos de la actual generación y que representa un desarrollo ulterior del primer principio. Sobre la teoría de Einstein se hablará en los últimos capítulos de nuestro libro; pero para su comprensión es imprescindible aclarar bien la importancia esencial del principio de Galileo.

El viaje en el caballo de madera

De lo hasta ahora dicho, se deduce, que el estado de movimiento en línea recta no se distingue proporcionalmente del estado de reposo en las condiciones de un movimiento uniforme y rectilíneo del medio que rodea al cuerpo en reposo. Decir "el cuerpo se mueve con una rapidez constante" y "el cuerpo se encuentra en estado de reposo, pero todo lo que le rodea se mueve proporcionalmente hacia el lado opuesto", significa afirmar la misma cosa. Estrictamente dicho, no debíamos emplear ni una ni otra expresión, sino que debíamos decir, que el cuerpo y el medio que le rodea se mueven uno en relación al otro. Esta idea, aun en nuestros días, está lejos de ser asimilada por las personas que tienen que ver con la mecánica. Pero ella no fué extraña al autor de "Don Quijote" que vivió hace trescientos años y que no había leído a Galileo. Esta idea forma una de las escenas más divertidas de la obra de Cervantes, en la cual se describe el viaje accidentado del caballero y de su escudero en un caballo de madera.

Para montar sobre este caballo, "no hay más que torcer esta clavija que sobre el cuello trae puesta, que él los llevará por los aires a donde atiende Malambruno; pero porque la alteza y sublimidad del camino no les cause vaguidos, se han de cubrir los ojos hasta que el caballo relinche, que será señal de haber dado fin a su viaje"

"...y así, sin más altercar, subió sobre Clavileño y le tentó la clavija."

Los que le rodeaban, afirmaron al hidalgo de que él estaba cabalgando con la rapidez de una flecha.

"...y en verdad, que no sé de qué te turbas, ni te espantas, que osaré jurar que en todos los días de mi vida no he subido en cabalgadura de paso más llano: no parece sino que no nos movemos de un lugar. Destierra amigo, el miedo, que en efecto la cosa va como ha de ir, y el viento llevamos en popa."

—"Así es la verdad —respondió Sancho— que por este lado me da un viento tan recio, que parece que con mil fuelles me están soplando. Y así era ello, que unos grandes fuelles le estaban haciendo aire."

El caballo de madera de Cervantes, sigue funcionando en numerosas atracciones, que fueron inventadas para distraer al público en las ferias y parques. Tanto uno como otros están basados en la imposibilidad de diferenciar el estado de reposo de un movimiento uniforme y proporcional.

El sentido común y la mecánica

Muchos acostumbraban oponer el reposo al movimiento, como el cielo a la tierra y el fuego al agua. Esto no les impide, sin embargo, descansar durante la noche en un vagón de coche-cama y no ocuparse de si el tren está parado o en marcha. Pero en la teoría, tales hombres a menudo y de manera persuasiva disputan el derecho de considerar el tren con coche-cama como algo que no está en movimiento, pero los rieles, la tierra a su lado y todos sus alrededores como algo que se mueve en una dirección opuesta a él.

"¿Es posible plantear una tal versión ante el sentido común del maquinista? pregunta Einstein, exponiendo este mismo concepto. El maquinista objetará que él calienta y engrasa, no los alrededores, sino la locomotora, y por lo tanto a la locomotora se debe también el resultado de este trabajo, es decir el movimiento."

La prueba parece ser muy difícil a primera vista, pero esto no es lo decisivo. Sólo en la imaginación parece ser que el camino de los rieles va hacia el ecuador y el tren corre hacia el oeste, contra la rotación del globo terrestre. Cuando los alrededores huyen a los lados del tren, y el combustible es consumido para empujar la máquina hacia delante, entonces la marcha del tren parece ser secundada por el movimiento de los alrededores en dirección opuesta. Si el deseo del maquinista es tener el tren en completa estabilidad (en relación al sol), él debe calentar y engrasar la máquina, como es necesario para una velocidad de dos mil kilómetros por hora.

Para persuadir a los que todavía dudan de las leyes entre el reemplazo recíproco del reposo y del movimiento, sirve la expresión de uno de los pocos adversarios de las teorías de Einstein, del profesor Lenard, el cual, criticando a Einstein, no atenta al mismo tiempo contra la teoría de la relatividad de Galileo. He aquí lo que él escribe:

"Mientras el movimiento del tren es completamente uniforme no existe ninguna posibilidad para diferenciar quién es el que se encuentra en movimiento y quién es el que se encuentra en estado de reposo; el tren o los alrededores. La estructura del mundo material es tal, que siempre y en cualquier momento dado, queda excluída la posibilidad de una determinación absoluta del problema sobre la diferenciación entre el movimiento uniforme y el reposo, y que queda únicamente lugar para la teoría del movimiento uniforme, de los cuerpos en relación mutua, porque los que observan este movimiento no pueden reflejar los fenómenos observados y sus leyes."

Navegando en un buque

Es posible imaginarse tales circunstancias, en las cuales quizás se hace difícil aplicar prácticamente el principio de la relatividad. Imáginese por ejemplo, que en el puente de un barco, que se mueve, hay dos tiradores con sus armas, que están orientados en dirección opuesta. Si están completamente opuestos uno al otro ¿no parece justo que el tirador que se encuentre con la espalda hacia la popa del buque se queje de que la bala tirada por él es más lenta que la bala de su contrario?

Naturalmente, en relación con las aguas del mar, la bala tirada por el tirador opuesto al movimiento del buque, es más lenta que la bala tirada en estado de reposo, y la bala del tirador que se encuentra en la proa del buque parece volar aún con una mayor rapidez. Pero esto no perturba las circunstancias de la marcha: la bala orientada hacia la popa vuela hacia un blanco que se mueve en su encuentro, y así en caso de un movimiento igual del puente la insuficiencia de velocidad de la bala es anulada por el rápido encuentro del blanco; la bala que es tirada en dirección hacia la proa alcanza a su blanco más tarde, porque éste se aleja de su bala con una velocidad completamente contraria a la velocidad de la bala.

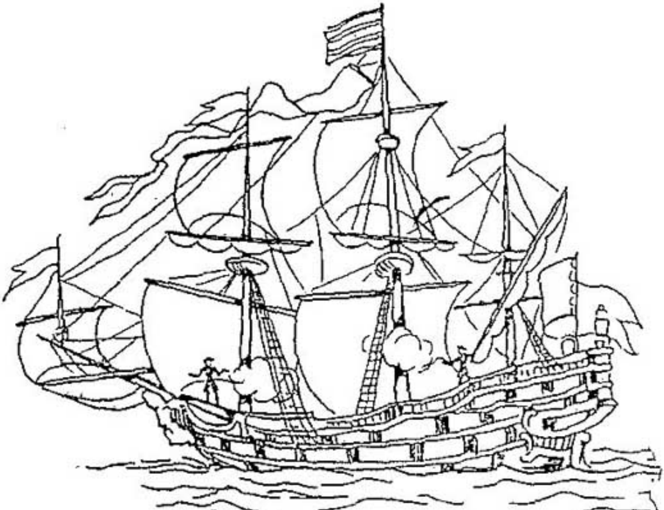


Fig. 2.—¿Cuál de las dos balas alcanzará antes al enemigo?

En resumen, ambas balas, en relación a sus blancos, se mueven en rapidez idéntica, igual como en el caso de un barco que no se mueva.

No hace falta agregar, que todo lo dicho se refiere únicamente a barcos que se mueven en línea recta y además con una rapidez continua.

Aquí nos parece oportuno citar un párrafo de aquel libro de Galileo, en el cual se expresa por primera vez el principio de la relatividad (no hace falta decir que este libro fué uno de los pocos que fueron salvados por su autor de la hoguera de la Inquisición).

"Enciérrese con sus amigos en un amplio salón en la cubierta de un buque. Si el movimiento del buque es uniforme, entonces, sin duda, usted no podrá saber si el buque se mueve o si está fijo en un lugar. Los brincos que son necesarios hacer cuando toda la cubierta está ocupada con bultos son los mismos en el caso de un barco que se mueva, como en un barco que esté quieto. Los golpes que se perciben a consecuencia de un movimiento más rápido del barco no son tan grandes en la popa del barco como en la proa, porque mientras la proa se levanta al aire, el borde donde uno se encuentra se inclina hacia el lado opuesto. Si uno lanza cosas contra sus compañeros no hace falta más fuerzas para lanzarlas desde la popa hacia la proa que al revés. Las moscas vuelan por todos los lados, ellas no se retienen con preferencia en el lado más próximo a la popa", etc.

Ahora es comprensible aquella forma en la cual habitualmente se expresa el principio clásico de la relatividad "todo movimiento, que es ejecutado dentro de cualquier sistema, no depende de que el sistema se encuentre en reposo o que se desplace en línea recta y continua."

El tubo aerodinámico

En la práctica es bastante corriente el confundir el movimiento con el reposo y éste con el movimiento, apoyándose en el principio clásico de la relatividad. Para comprender como obra sobre el avión o sobre el automóvil la resistencia del aire, por medio de la cual ellos se mueven, es necesario observar el fenómeno de la "rotación", el efecto de las corrientes del aire sobre al avión que está en reposo. En el laboratorio se coloca un gran tubo aerodinámico (véase dibujo 3) dotado con una corriente de aire y por medio de él se estudia el efecto de la corriente sobre el modelo inmóvil y suspendido de un aeroplano o un automóvil. Los resultados adquiridos con el experimento se aplican en la práctica, aunque la realidad de los fenómenos sucede en dirección contraria: el aire es inmóvil y el aeroplano o el automóvil lo cortan con gran rapidez.

Para el lector es interesante saber, que uno de los mayores tubos aerodinámicos del mundo, se encuentra en Moscú, en el Instituto Aero-hidrodinámico (abreviación en ruso Z.A.G.I.) Este tubo tiene forma de octógono, su longitud es de 50 m. y su diámetro en la parte que trabaja es de 6 m. Gracias a tales medidas, en el tubo no caben sólo modelos muy pequeños, sino incluso armaduras de aviones auténticos con sus hélices y también automóviles auténticos en tamaños naturales. El tubo aerodinámico mayor fué construído en Francia, su sección elíptica tiene la medida de 18 por 16 metros.

Un tren en plena marcha

Otro ejemplo de una aplicación fecunda de los principios clásicos de la relatividad se puede encontrar en la práctica de

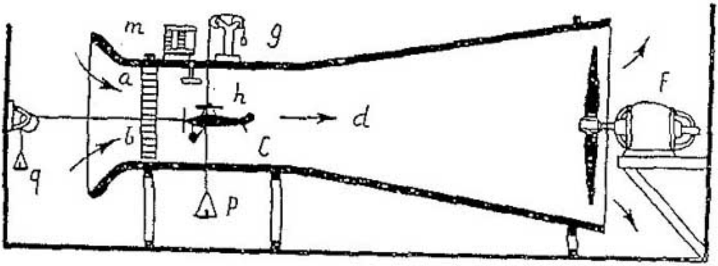


Fig. 3.—Corte del tubo aerodinámico del Instituto de Moscú. El aire es impulsado por la hélice por medio de una reja (*f* es el motor eléctrico). La acción del aire sobre el avión es averiguada por medio de los aparatos *p*, *g*, *m*. El arambel *q* equilibra la presión de las corrientes de aire.

los ferrocarriles. En Inglaterra y América, el ténder de la locomotora frecuentemente es llenado de agua en plena marcha. Esta "rotación" ingeniosa es adquirida debido a un fenómeno mecánico comúnmente conocido: si en una corriente de agua entra un tubo vertical, cuyo final algo más bajo se encorva en dirección contraria a la corriente (dibujo 4) el agua que corre, penetra en el llamado "tubo Pito" y alcanza en él un nivel más alto que el del río, que se determina por la cantidad *H*, que depende siempre de la rapidez de la corriente. Los ingenieros ferrocarrileros "aprovecharon" este fenómeno: ellos hacen entrar tubos curvados con gran movimiento en aguas tranquilas y el agua que entra en el tubo adquiere un nivel más alto que el del agua en reposo. El movimiento se transforma en reposo y éste en movimiento.

Esto se realiza de tal modo que en las estaciones, donde el ténder de la locomotora debe abastecerse de agua, sin parar, a lo largo de los rieles se pone agua en las zanjas (dibujo 4). Desde el ténder se extiende un tubo completamente curvado, que está volteado en dirección al movimiento. El agua entra en

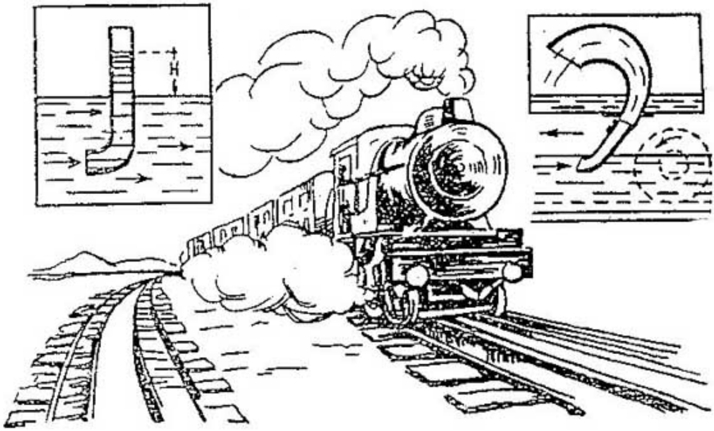


Fig. 4.—Forma en que las locomotoras pueden tomar agua en plena marcha. Arriba, a la izquierda, el tubo pito. Sumergiéndolo en agua corriente, el nivel del agua en el pito es superior al del agua de donde se toma. Arriba, a la derecha, adaptación del tubo pito para la subida del agua al ténder de un tren en movimiento.

el tubo, sube al ténder y acelera la marcha del tren (dibujo 4 parte superior derecha).

¿A qué altura puede subir el agua por medio de este sistema original? Según la ley de esta rama de la mecánica, que se llama "mecánica hidráulica" y que se ocupa de los movimientos de las substancias líquidas, el agua en el "tubo Pito" debe subir a la altura que tengan los cuerpos más altos, dependiendo esto siempre de la rapidez de la corriente de agua. Para esta altura (H) es decisiva la siguiente fórmula:

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

equivalencia en la cual v es igual a la velocidad del agua, y g igual a la aceleración de la fuerza de gravedad, equivalente a 9.8 m. por segundo, elevado al cuadrado. En nuestro caso, la velocidad del agua en relación al tubo, es idéntica a la velocidad del tren; tomando una marcha moderada de 35 km. por hora, tenemos el hecho de que $v = 10$ *m.* por segundo y de allí resulta que el que puede alcanzar el agua es el siguiente:

$$H = \frac{v^2}{2 \times 9{,}8} = \frac{100}{2 \times 9{,}8} = \text{aproximadamente } 5 \text{ m.}$$

Es claro que en caso de no perder altura por el rozamiento, ésta sería más que suficiente para llenar con éxito el ténder.

Copérnico y Ptolomeo

En el lector se forma ya sin duda el dilema ¿cómo según los puntos de vista del principio clásico de la relatividad es posible resolver la disputa entre Copérnico y Ptolomeo? En este caso se trata de un movimiento no en línea recta y como consecuencia de esto el problema cae en el terreno del estudio de la doctrina de Einstein; pero nosotros no lo hemos planteado aquí sin meditación.

¿Quién es el que efectúa la rotación? [1] ¿La tierra alrededor del Sol o el Sol alrededor de la Tierra?

Plantear el problema de tal modo es falso. Si se pregunta cuál de los dos movimientos se efectúa en realidad, entonces se debe afirmar sin duda: que el cuerpo se puede mover únicamente en relación a otro cuerpo; moverse sin estar relacionado es imposible. Por esto al problema planteado hace falta contestar del siguiente modo: La Tierra y el Sol se mueven uno en relación al otro; observando este movimiento desde la Tierra, el Sol parece girar alrededor de la Tierra y observándolo desde el Sol, la Tierra parece girar alrededor del Sol.

Escuchemos a Edison, uno de los más destacados físicos de nuestra época: "La simplicidad de movimientos de los planetas

1 En los movimientos realizados en círculo, es necesario diferenciar entre la "rotación" (el círculo alrededor de un eje, que no traspase a los cuerpos en movimiento) y la circulación (el círculo alrededor de un eje que traspase a los cuerpos en movimiento). La Tierra efectúa una rotación alrededor del Sol y diariamente hace una circulación alrededor de su eje.

fué desconocida para el movimiento de Ptolomeo y claro en el esquema de Copérnico; sin embargo, para los fenómenos terrenales comunes la situación es al revés: el esquema de Ptolomeo se explica por su simplicidad natural. El esquema terrenal o sea el de Ptolomeo es el de la explicación natural de los fenómenos de la Tierra y el esquema solar o sea el de Copérnico es la explicación de los fenómenos del sistema solar; sin embargo, nosotros no podemos dar a uno de ellos la preferencia sobre el otro, ni introducir una complicación superflua."

Conformémonos con aceptar esta concepción, si se recuerda que ninguno de los astrónomos, sin excluir al propio Copérnico, pudo desistir de la dicción de Ptolomeo: "El Sol se levanta". Y ésta nunca fué sustituida por el modo indicado por Copérnico: "La tierra en su movimiento rotativo coloca a los rayos del Sol en el lugar en el cual me encuentro yo." Para la determinación del tiempo y de los días, el concepto de Ptolomeo es más conveniente que el de Copérnico y nosotros nos hemos quedado sin duda en este caso en las posiciones de la antigua Grecia. El que tuviese la intención de describir la salida del Sol en los términos de la teoría de Copérnico, no ha comprendido las más destacadas convicciones de los partidarios de Copérnico.

Los astrónomos de nuestra época, que pronostican cualquier fenómeno del cielo, muchas veces ni piensan sobre el movimiento del globo terrestre; para ellos es favorable hacer sus cálculos de tal modo, como si todo el firmamento girase alrededor de la Tierra inmóvil. [1]

El lector no ha olvidado probablemente lo que concierne a la distraída tarea de los dos huevos, mencionada con anterioridad. Recordando este ejemplo, se comprenderá que cuando por

[1] Uno de los lectores muy atentos podría plantear en relación a esto, la pregunta:

¿Qué aspecto del movimiento recibiría el observador, que mirase hacia nuestro sistema planetario desde fuera, desde cualquier alejada estrella? ¿Giraría, según este observador, la Tierra alrededor del Sol o el Sol alrededor de la Tierra?

Para poder contestar a esta pregunta es necesario ante todo recordar que no puede haber ningún punto observador que no se mueva en absoluto. Las estrellas desde donde miró el observador, están en movimiento en relación a cualquier otro cuerpo. Si el observador está inmóvil en relación a la Tierra, él verá que el Sol gira alrededor de la Tierra. Si está inmóvil en relación a cualquier tercer cuerpo (por ejemplo, otra estrella) entonces le parecerá que se mueven en una u otra dirección tanto el Sol, como la Tierra.

la rotura de la cáscara de un huevo se puede saber cuál de los dos huevos estaba en movimiento "auténtico" y cuál en un estado de "reposo absoluto", se trata en este caso de un descubrimiento de importancia enorme, de un verdadero cambio en la mecánica. La revista norteamericana, creyendo, sin saberlo, en la diferencia expuesta por ella entre los huevos que se golpean, no sospechaba que se encontraba en el camino de la previsión, hacia el atrio de la gloria eterna.

¿Cómo se debe entender la ley de inercia?

Ahora, después de haber hablado tan detalladamente sobre la relatividad del movimiento, hace falta decir algunas palabras sobre aquellas causas que producen el movimiento, sobre las fuerzas que motivan el movimiento. Ante todo es necesario indicar las leyes del siguiente modo: *el efecto de las fuerzas sobre los cuerpos no depende de que el cuerpo se encuentre en estado de reposo o de que se mueva por inercia o por la influencia de otras fuerzas.*

Estos efectos forman la "segunda" de aquellas tres leyes, que son, según Newton, la base de toda la mecánica. La primera es la ley de la inercia y la tercera es la ley de resistencia.

A esta segunda ley de Newton están dedicados los siguientes capítulos; por esto, decimos aquí sobre ella únicamente algunas cuestiones generales. La idea de esta ley consiste en que en el cambio de la velocidad, la medida que indica la aceleración, es proporcional a la fuerza que actúa y tiene la misma orientación que ella. Esta ley puede ser reflejada en la fórmula

$$f = m \times a,$$

en la cual f = fuerza, que actúa sobre los cuerpos; m = a la masa de los cuerpos y a = a la aceleración de los cuerpos. De las tres cantidades, de las cuales se componen esta fórmula, la más difícil de comprender es la de la masa. Frecuentemente es confundida con el peso, pero en realidad la masa no tiene nada de común con el peso. La masa de los cuerpos se puede averiguar, comparando las aceleraciones a las cuales el cuerpo está expuesto bajo la influencia de una u otra fuerza exterior. Como es posible, por medio de la fórmula escrita, cuanto mayor masa tanto menor es la aceleración que adquieren los cuerpos bajo la influencia de fuerzas extrañas.

La ley de la inercia, aunque esto parece contradecir a las concepciones habituales, es la más comprensible de las tres. [1]

Y no obstante algunos lo comprenden al revés. Ella es expresada erróneamente como la calidad de los cuerpos "de conservar sus condiciones, mientras que las causas exteriores no las alteren." Tal versión, muy extendida, confunde la ley de inercia con la ley de la causalidad, que afirma que nada sucede sin causa, (es decir, que ningún cuerpo cambia sus condiciones sin causa). La auténtica ley de inercia no se refiere a cualquier condición física de los cuerpos, sino exclusivamente a las condiciones de reposo y movimiento). Dice:

Todos los cuerpos conservan sus condiciones en estado de reposo o en movimiento recto y uniforme hasta el momento en que las fuerzas que actúan sobre ellos, los sacan de una tal posición.

Esto significa que cada vez en que el cuerpo:

1, entra en movimiento;

2, cambia su movimiento en línea recta en otro no en línea recta o en general cuando se mueve por un camino curvo;

3, interrumpe, retarda o acelera su movimiento,

debemos sacar la conclusión que sobre el cuerpo actúan fuerzas exteriores.

Si no se verifica ninguno de estos cambios en el movimiento, entonces ninguna fuerza obra violentamente desde el exterior sobre el cuerpo y no lo mueven. Hace falta comprender claramente que los cuerpos que se mueven de manera uniforme y en línea recta, no se encuentran absolutamente bajo ninguna influencia de fuerzas exteriores que obran sobre ellos (o que todas las fuerzas que actúan sobre ellos son equilibradas). En esto consiste la diferencia esencial entre los conceptos de los mecánicos contemporáneos y los puntos de vista de los pensadores de la Antigüedad y de la Edad Media (hasta Galileo). Aquí el pensamiento vulgar y el pensamiento científico se diferencian fuertemente.

Hace falta explicar, por cierto, por qué el rozamiento de cuerpos en reposo es considerado en la mecánica como fuerza,

[1] Esta ley está en contradicción con los conceptos corrientes de aquellos que afirman que el cuerpo, que se mueve a manera uniforme y en línea recta, no es incitado por ninguna fuerza; habitualmente existe el concepto de que una vez moviéndose el cuerpo, queda sostenido en estas condiciones de fuerza, y en caso de eliminar esta fuerza el movimiento se terminará.

a pesar de que este rozamiento no puede provocar ningún movimiento. El rozamiento es una fuerza porque puede atrasar el movimiento. Tales fuerzas, que por sí mismas no pueden engendrar movimientos, pero que son capaces de atrasar los movimientos ya surgidos (o equilibrar otras fuerzas), se llaman fuerzas "pasivas", a diferencia de las fuerzas que producen movimientos, y que se llaman "activas."

Ponemos aquí una vez más de manifiesto que el cuerpo no tiende a quedarse en posición de reposo sino que simplemente está en reposo. La diferencia es la misma como entre un hombre terco que está siempre en casa y al cual es difícil arrastrarle fuera de su vivienda y otro hombre, que sólo casualmente se encuentra en casa y que está dispuesto, por la más mínima causa, a dejar su habitación. Los cuerpos físicos, por su naturaleza en general, no son de los que les "gusta quedarse en casa", por el contrario, para ellos, incluso en los grados superiores de su reposo, incluso cuando parece que como cuerpos libres ya están sujetos, basta el impulso de una fuerza insignificante, para lograr que se pongan en movimiento. La expresión "el cuerpo tiende a conservarse en reposo" es completamente inconveniente, porque se ha averiguado que un cuerpo en reposo, una vez lanzado fuera de este estado, no vuelve por su propia fuerza hacia él, sino al contrario, tiende siempre a mantenerse en movimiento. (Siempre que no existan fuerzas que impidan el movimiento).

No se deben menospreciar aquellas equivocaciones, que, en relación a la ley de inercia, dependen de la aplicación inconsiderada de la palabra "tender", como sucede en la mayoría de los manuales de física y mecánica.

No menos dificultades para la justa comprensión contiene la tercera ley de Newton, cuyo estudio comenzamos en el siguiente capítulo.

Acción y reacción

Deseando abrir una puerta, se la atrae, por medio de un picaporte, hacia sí mismo. Los músculos de la mano, que se han encogido, se acercan a las puntas de los dedos: ellos arrastran con la misma fuerza al mismo tiempo la puerta y el tronco de vuestro cuerpo. En este caso es claramente visible que entre cuerpo y la puerta obran dos fuerzas, actuando una sobre la puerta y otra sobre vuestro cuerpo. Lo mismo sucede, bien entendido, en el caso en que la puerta se abre en la misma dirección opuesta a usted: las fuerzas empujan a la puerta y a vuestro cuerpo.

Lo que nosotros observamos aquí en relación a las fuerzas de los músculos, es preciso también para todas las fuerzas en general, independientemente de su naturaleza. Cada tensión obra hacia dos lados contrapuestos; ella tiene, expresándolo de forma pintoresca, dos fines (dos fuerzas): uno, de abrir orientado hacia la puerta, sobre la cual nosotros decimos actúa la fuerza, y el otro orientado hacia el cuerpo, al que nosotros llamamos el que actúa. El efecto mencionado es expresado en la mecánica de un modo muy breve, demasiado breve, para dar una clara comprensión, así: "*La acción es igual a la reacción.*"

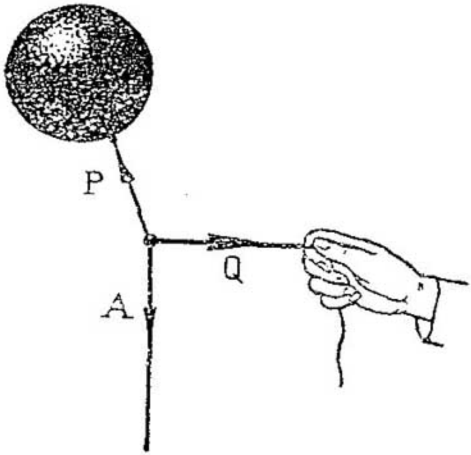


Fig. 5.—Las fuerzas P, Q, A, son las que actúan sobre la cuerda de un globo infantil. ¿Dónde está la fuerza que ofrece resistencia?

El contenido de esta ley consiste en que todas las fuerzas de la naturaleza son fuerzas binarias. En cada caso, la manifestación de una acción de fuerza incluye en sí que, en cualquier otro lugar, hay otra fuerza igual a ésta, pero que actúa hacia el lado opuesto. Estas dos fuerzas actúan infaliblemente entre

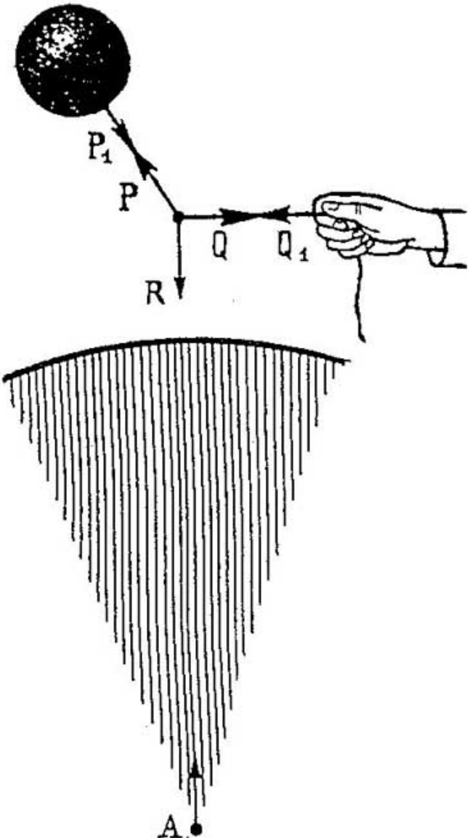


Fig. 6.—Contestación a la pregunta del dibujo anterior. P, Q, y A, son las fuerzas que ofrecen resistencia.

dos puntos que tienen la tendencia a aproximarse o alejarse mutuamente.

Observe usted simplemente (dibujo 5), las fuerzas P, Q y R, que actúan sobre el peso de la cuerda en la cual se encuentra suspendido el globo infantil. El tiro P es el globo, el tiro Q es la cuerda y R, es el peso; tres fuerzas que están aisladas entre sí. Pero esto es únicamente una abstracción de la realidad; de hecho, para cada una de las tres fuerzas hay una fuerza equivalente a ella, pero contrapuesta a su dirección. Por ejemplo, la fuerza contrapuesta a la fuerza P, es la que sostiene el globo en el aire (en el dibujo 6 la fuerza P_1); la fuerza contrapuesta a la fuerza Q es la que obra sobre la mano (Q_1); la fuerza, contrapuesta a la fuerza R es aplicada al centro del globo de aire (fuerza R_1 en el dibujo 6) porque el peso no sólo atrae la Tierra hacia sí, sino que él mismo es atraído también por la Tierra.

Todavía otra observación esencial. Cuando preguntamos por la calidad de una cuerda para tirar, a cuyo extremo está atada una fuerza de un kilo, preguntamos en el fondo por el valor de un sello de correos de 10 cts. La contestación ya está incluída en la misma pregunta: queremos una cuerda capaz de arrastrar la fuerza de un kilogramo. Mejor dicho "la cuerda que es capaz de arrastrar dos veces la fuerza de un kilogramo", o "la cuerda de la cual tiran por dos lados un kilogramo", es decir, en uno u otro sentido. Arrastrar de otro modo 1 kilogramo no es posible, con la excepción de si lo hicieran dos fuerzas contrapuestas en su dirección. Si se olvida esto es fácil caer en errores muy graves, de los cuales daremos ahora algunos ejemplos.

El experimento de los dos caballos

Dos caballos tiran de una romana de resorte con una fuerza de 100 kilogramos cada uno. ¿Qué indica la aguja de la romana?

Muchos contestarán: $100 + 100 = 200$ kilogramos. Esta contestación no es justa. Las fuerzas de 100 kilogramos, con las cuales tiran los dos caballos, indican, como ya hemos visto nosotros, que la tensión no es de 200 kilogramos, sino únicamente de 100 kilogramos.

Por eso, entre otros, no se debe pensar, que los hemisferios de Magdeburgo que son tirados por 8 caballos por un lado y 8 por el lado contrario, son tirados en total por una fuerza de 16 caballos. Con la ausencia de los 8 caballos reactivos, los restantes 8 no efectuarían normalmente ninguna acción sobre el hemisferio. Sin embargo, uno de los tiros de 8 caballos podría ser substituído por una simple pared.

El experimento de las dos lanchas

Al embarcadero de un lago se acercan dos lanchas iguales. Ambas lanchas se acercan, arrastradas por su tripulante, por medio de una soga. El fin contrapuesto de la soga de la primera lancha está atado en un poste en el embarcadero; el fin contrapuesto de la soga de la segunda lancha se encuentra en manos

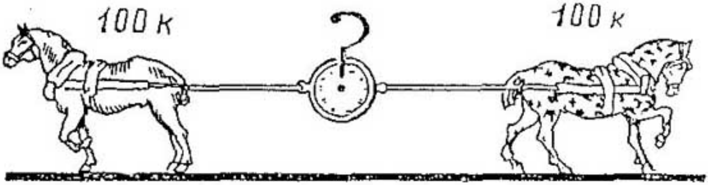


Fig. 7.—¿Cuánto indicará la báscula?

de un marinero en el embarcadero, que también por su parte tira de la soga en dirección hacia él.

Los tres hombres hacen el mismo esfuerzo.

¿Cuál de los dos barcos llega antes?

A primera vista se puede afirmar, que llega antes la lancha arrastrada por dos: las fuerzas duplicadas producen mayor velocidad.

¿Pero es exacto que sobre esta lancha obran fuerzas duplicadas? Si tanto el barquero como el marinero tiran en dirección hacia sí mismos, entonces la fuerza que tira de la soga es únicamente igual a una sola fuerza, y huelga decir, que es exactamente la misma que en el caso del primer barco. Ambos barcos se acercan con la misma fuerza y llegan, por lo tanto, al mismo tiempo.[1]

[1] Con esta solución mía no está de acuerdo uno de nuestros físicos

En la práctica ocurre frecuentemente que tanto las fuerzas activas como las de reacción se encuentren en diferentes lugares del mismo cuerpo. La tensión muscular o la presión del vapor en el cilindro de una locomotora son ejemplos de tales fuerzas, llamadas "fuerzas interiores". Típico de estas fuerzas es que son capaces de cambiar la disposición recíproca de las diversas partes del cuerpo, en la medida en que éste permite la reunión de estas partes, pero no pueden nunca ejecutar con todas las partes del cuerpo un mismo movimiento. Con la detonación de la escopeta los gases de la pólvora que actúan hacia un lado arrojan la bala hacia delante; al mismo tiempo, la presión de los gases de la pólvora, en dirección opuesta, arrojan la escopeta hacia atrás. La presión de los gases de la pólvora, como fuerza interior, no es capaz de mover tanto la bala como la escopeta, hacia adelante.

Pero si las fuerzas interiores no son capaces de desplazar todo el cuerpo ¿cómo se mueve entonces el caminante? ¿cómo se mueve la locomotora? Hace falta decir que al caminante le ayuda el roce del pie sobre la tierra, y a la locomotora el roce de las ruedas sobre los rieles, lo que no quiere decir que con esto quede resuelto el problema. El roce es imprescindible para el movimiento del caminante y de la locomotora; es cierto, que no es posible marchar por terrenos muy resbaladizos

conocidos, que expresa en carta, a mí dirigida, un cálculo, que posiblemente podría surgir también en la mente de otros lectores:

"Para acercar los barcos al embarcadero, escribió él —hace falta que los barqueros tiren de las cuerdas. Pero dos personas naturalmente, en el mismo tiempo, tiran con más fuerza que una y por lo tanto el barco derecho avanza más rápido."

Este argumento simple, que a primera vista parece indiscutible, es de hecho erróneo. Para que el barco alcance una rapidez duplicada (y de lo contrario el barco no corre doblemente rápido) cada una de las dos personas que tiran de la cuerda debían tirar con una fuerza duplicada. Y en tales condiciones, hacía falta que tirasen con dos cuerdas y no con una como el que tira solo. Pero en las condiciones de nuestro experimento está dicho que "las tres personas tiran con el mismo esfuerzo". Por más que se esforzasen los dos, nunca podrían tirar más de la cuerda, que el que está solo, porque la fuerza que tira de la cuerda es la misma.

y que si las ruedas de las locomotoras anduviesen sobre rieles resbaladizos, patinarían y no se moverían de lugar. Pero también es claro que el rozamiento es la fuerza *pasiva* (página 20), que es incapaz por sí misma de crear cualquier movimiento. Asi resulta que las fuerzas que toman parte en el movimiento del caminante y de la locomotora no pueden engendrar por sí solos los movimientos. ¿De qué modo se produce por lo tanto el movimiento?

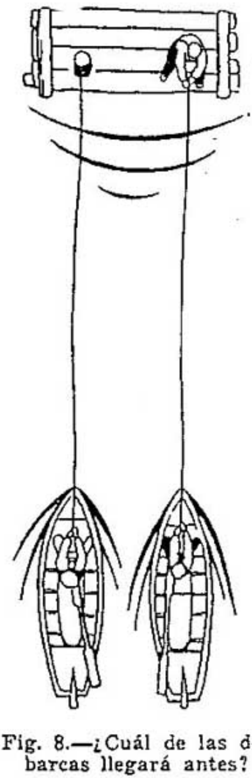


Fig. 8.—¿Cuál de las dos barcas llegará antes?

Este enigma se resuelve bastante sencillamente. Dos fuerzas interiores, que actúan al mismo tiempo, no pueden lograr que el cuerpo se mueva porque la acción de una fuerza equilibra la acción de la otra fuerza. ¿Pero qué sucede, cuando una tercera fuerza equilibra o debilita la acción de una de las dos fuerzas interiores? Entonces nada impediría a la otra fuerza interior mover el cuerpo. El roce es esta tercera fuerza, que debilita la acción de una de las fuerzas interiores y que da así a la otra fuerza la posibilidad de mover el cuerpo.

Para mayor claridad indicamos a ambas fuerzas interiores con las letras F_1 y F_2 y la fuerza del roce con la letra F_3. Si la cantidad y la dirección de la fuerza F_3 es tal que debilita suficientemente a las fuerzas F_2, entonces F_1 puede poner el cuerpo en movimiento. En resumen el caminante y la locomotora se mueven porque de las tres fuerzas que actúan sobre el cuerpo F_1, F_2 y F_3, las F_2 y F_3 se equilibran por completo o en parte y entonces la fuerza F_1 queda como la que entra en acción. Los ingenieros, que inventaron el movimiento de la locomotora, prefirieron decir, de manera no completamente consecuente, las fuerzas F_1 y F_2 se equilibran, y que la fuerza que mueve a la locomotora es el roce F_3. Sin embargo, en la práctica esto no tiene importancia, porque para el movimiento de la locomotora es imprescindible la participación tanto del vapor como del rozamiento.

¿Qué significa vencer la inercia?

Para acabar el capítulo queremos observar todavía un problema, que produce también muchas veces conceptos erróneos. Se lee y se oye, no raras veces, que para lanzar los cuerpos, que se encuentran en estado de reposo hacia el movimiento, es ante todo necesario "vener la inercia" de estos cuerpos. Nosotros sabemos, sin embargo, que los cuerpos libres, en cuanto no se ven impedidos por fuerzas opuestas tienen la tendencia a ponerse en movimiento. ¿Qué es, por lo tanto, lo que hay que "vencer"?

"La idea de tener que vencer la inercia "no es nada más que la degeneración de aquel pensamiento, que indica que cada cuerpo para ponerse en movimiento con una velocidad determinada necesita un intervalo determinado de tiempo. Ninguna fuerza, incluso la mayor, es capaz de poner en movimiento con una velocidad cualquiera a una masa, incluso a una muy insignificante. Esta idea se expresa en la breve fórmula:

$$ft = mv,$$

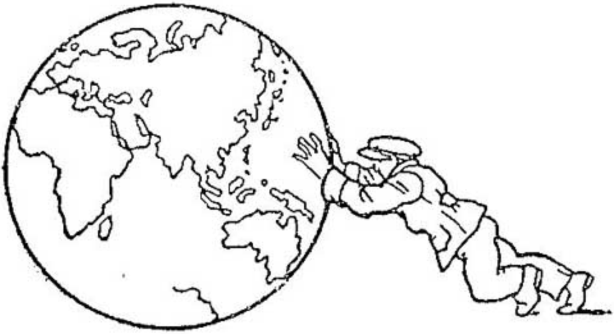
sobre la cual hablaremos en los siguientes capítulos, pero con la cual los lectores deben ponerse al corriente por medio de los manuales sobre física. Es claro que en el caso en que $t = 0$ (el tiempo es igual a cero) el resultado de la multiplicación mv masa multiplicada por velocidad es igual a cero, y por lo tanto la velocidad es igual a cero, porque la masa no puede ser igual a cero. Con otras palabras, si la fuerza f no tiene tiempo para realizar su acción, entonces el cuerpo no recibe ninguna velocidad es decir no entra en movimiento. Si la masa del cuerpo es grande, hace falta un espacio de tiempo relativamente mayor, para que la fuerza pueda poner al cuerpo en movimiento. Debemos decir que el cuerpo comienza a moverse inmediatamente, pero que parece que él se resiste algo a la acción de la fuerza. De allí resulta la falsa concepción de que la fuerza debe "vencer la inercia del cuerpo" antes de poder ponerlo en movimiento.

EL VAGÓN DEL FERROCARRIL

Quizá algún lector me pedirá que aclare una pregunta en relación con lo hasta ahora expuesto que surge seguramente ante muchos. ¿Por qué es más difícil mover de su lugar a un vagón del ferrocarril que retener el movimiento del vagón cuando ya está en marcha?

No sólo es más difícil, agrego yo, sino en general imposible si no se aplica una fuerza bastante grande. Para retener el movimiento de un simple vagón de mercancía en un camino horizontal basta, en el caso de un buen engrasamiento, una fuerza de 15 kilogramos, mientras que un vagón parado no es posible moverlo de su lugar con una fuerza menor de 60 kilogramos.

La causa no consiste sólo en que en los primeros segundos hace falta dedicar más fuerza para poner el vagón a marchar a una velocidad determinada (que significaría un gasto especial en comparación a la distancia), sino la causa consiste en primer lugar, en las condiciones del engrasamiento de los vagones en posición de reposo. En el comienzo, el engrase no está repartido todavía en toda la extensión y de aquí resulta que el vagón se mueve entonces muy difícilmente. Pero apenas las ruedas hacen sus primeras vueltas y las condiciones del engrase se mejoran notablemente, se establece el movimiento uniforme con una velocidad ininterrumpida.



CAPITULO II

FUERZA Y MOVIMIENTO

Una tabla indicadora sobre la mecánica

"Ninguno de los conocimientos humanos puede pretender llamarse verdaderamente ciencia, si no utiliza la argumentación las matemáticas," escribió hace cuatrocientos años Leonardo da Vinci. Esto que fué una verdad ya en los años infantiles de la ciencia, es todavía hoy en nuestros días una afirmación justa. En el presente libro nosotros nunca intentamos transformar las fórmulas de la mecánica. Para el lector, tanto para el que solamente de paso se ocupa de la mecánica, como para el erudito en esta materia, hemos hecho aquí una pequeña tabla indicadora, que ayuda a recordar las más importantes fórmulas. Está elaborada por medio de las tablas pitagóricas de multiplicación: por la intersección de dos columnas se encuentra con ayuda de la multiplicación de las dos cantidades, que están inscritas en ellas, el resultado. (El conocimiento de estas fórmulas puede lograrlo el lector por medio del estudio de la mecánica en cualquier grado de la enseñanza general).

Enseñaremos en algunos ejemplos, como se debe aplicar la tabla:

Multiplicando la velocidad v con el movimiento uniforme en tiempo t, obtenemos el camino S (fórmula $S = vt$)

Multiplicando la fuerza f por el camino S, obtenemos el trabajo A, que al mismo tiempo es también igual a la mitad de la masa producida m más la velocidad v elevado al cuadrado:

$$A = fS = \frac{mv^2}{2}\ ^1$$

	Velocidad v	Tiempo t	Masa m	Aceleración a	Fuerza f
Camino S	—	. —	—	$\frac{v^2}{2}$ movimiento uniforme	Trabajo $A = \frac{mv^2}{2}$
Velocidad v	$2aS$ movimiento uniforme	Camino S movimiento uniforme	Impulso ft	—	Potencia $W = \frac{A}{t}$
Tiempo t	Camino S movimiento uniforme	—	—	Velocidad v movimiento uniforme	Cantidad del movimiento mv
Masa m	Impulso ft	—	—	Fuerza f	—

1 La fórmula $A = f\,S$ es justa sólo en el caso en que la dirección de la fuerza coincide con la dirección del camino. En general es más exacta la fórmula $A = f\,S \cos$ alfa, en la cual la cifra alfa indica el ángulo entre la orientación de la fuerza y el camino.

También la fórmula $A = \frac{mv^2}{2}$ es únicamente exacta en casos en los cuales la velocidad del cuerpo es igual a cero; cuando la velocidad inicial es igual a v_0 y la velocidad final a v, entonces aquel trabajo que se debe gastar para lograr tal cambio de velocidad se refleja en la fórmula $A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$.

Del mismo modo como con ayuda de la tabla de multiplicar es posible calcular las divisiones, con nuestra tabla se puede averiguar, por ejemplo, la siguiente relación:

La velocidad v del movimiento uniforme dividida por el tiempo t es igual a la velocidad a $\left(\text{fórmula} \quad a = \frac{v}{t}\right)$

La fuerza f, dividida por la masa m es igual a la velocidad a; y dividida por la aceleración a es igual a la masa m

$$a = \frac{f}{m} \qquad \text{y} \qquad m = \frac{f}{a}$$

Por lo tanto, para la solución de los problemas, que exige la tarea de calcular exactamente la velocidad, se elaboran con ayuda de la tabla todas las fórmulas, que contienen velocidades, ante todo las fórmulas

$$aS = \frac{v^2}{2},$$

$$v = at \ ,$$
$$f = ma \ ,$$

y después también las fórmulas

$$t^2 = \frac{2\ S}{a}, \qquad \text{es decir} \qquad S = \frac{at^2}{2}$$

Entre estas fórmulas se encontrará también aquella, que contesta al problema planteado.

Si se desea tener todas las ecuaciones con la ayuda de las cuales se puede definir la fuerza, la tabla presenta como selección:

$fS = A$ (trabajo)
$fv = W$ (potencia)
$ft = mv$ (cantidad del movimiento)
$f = ma.$

No se debe hacer caso omiso del hecho que el lugar (P) es también fuerza, por esto al mismo tiempo con la fórmula $f = ta$, hay a nuestra disposición también la fórmula $P = mg$, donde g es la aceleración de la fuerza de gravedad cerca de la superficie de la tierra. Exactamente así de la fórmula $fS = A$ se deduce que $Ph = A$ para el peso del cuerpo P, alzado a la altura h.

Siguiendo el cuadro de la tabla se afirma que la creación de cantidades relacionadas no tienen ningún sentido en la mecánica.

Una importante observación más, todavía. Las fórmulas de la mecánica son útiles únicamente en manos de aquellos lectores que saben exactamente qué medidas deben expresar los resultados de sus cantidades. Si se calcula un trabajo según la fórmula $A = fS$, la fuerza f en kilogramos, y el camino S en centímetros, entonces se recibirá la cantidad de trabajo en una cantidad irreal en kilogramo-centímetros, cantidad que es muy fácil de confundir. Para recibir un resultado conveniente la fuerza debe reflejarse en kilogramos y el camino en metros, entonces el trabajo en kilográmetros. Pero se puede calcular la fuerza en dinas y el camino en centímetros, entonces el resultado del número de horas de trabajo (la dina es la fuerza igual a 1/980 gramos, es decir aproximadamente un miligramo) aparece en dina-centímetros.

Igualmente en la ecuación $f = ma$ se da la fuerza en dinas únicamente cuando la masa es reflejada en gramos y la velocidad en centímetros en un segundo por segundo.

Para lograr en la elaboración de medidas únicas resultados exactos y una definición sin faltas, hace falta un aprendizaje mucho mayor que el de un cuarto de hora. El que no lo ha aprendido todavía, debe, en todos los casos, realizar la medida según el sistema "centímetro - gramo - segundo" (C.G.S.) pero el resultado logrado puede ser transmitido, en caso necesario, a otras medidas.

Esta práctica es muy minuciosa y esencial y faltando su dominio, es posible caer en graves errores.

La utilización de las armas de fuego

En calidad de ejemplo para la aplicación de nuestra tabla, demostramos "el retroceso" de las armas de fuego. Los gases de la pólvora, que arrojan con su presión la bala hacia delante, empujan al mismo tiempo también el arma hacia el lado opuesto, con el conocido "retroceso". ¿Con qué rapidez se mueve en este caso el arma? Recordamos la ley de la equivalencia de la acción y reacción. Según esta ley, la presión de los gases de la pólvora sobre el arma debe ser equivalente a la presión de los gases sobre la bala. Según esta misma ley ambas fuerzas obran al mismo tiempo. Echando una mirada a la tabla, averiguamos que el resultado de la multiplicación fuerza *(f)* por tiempo *(t)*, es igual a la "cantidad del movimiento" mv, es decir el resultado de la multiplicación de la masa m por su velocidad v:

$$ft = mv.$$

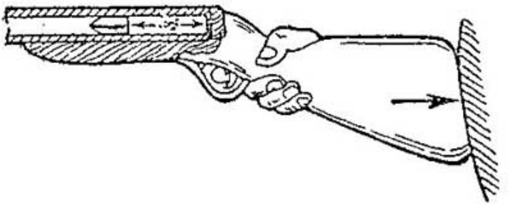


Fig. 9.—Retroceso de las armas de fuego.

Como ft tanto para la bala como para el arma son los mismos, también el movimiento producido por ellos deben ser igual. Si m es la masa de la bala y v su velocidad y M la masa del arma y w su velocidad, entonces de acuerdo con lo hasta ahora relatado $mv = Mw$, de donde resulta que

$$\frac{w}{v} = \frac{m}{M}$$

De esta proporción se puede calcular el valor numérico de sus términos. La masa de la bala de un fusil de guerra pesa 9,6 gramos, su velocidad es, en el momento de salir, de 800 metros por segundo; la masa del fusil es de 4,500 gramos. De aquí resulta:

$$\frac{w}{800} = \frac{9{,}6}{4{,}500}$$

Por lo tanto, la velocidad del arma w = 1,9 metros. No es difícil calcular, que el fusil que asesta el golpe abarca en sí 470 veces menos "fuerzas vivas" $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$ que el que empuje a la bala; esto significa que la energía destructora, el arma que asesta el golpe es 470 veces menos que la bala que vuela, a pesar de que, ¡lo que se debe tener bien en cuenta!, la cantidad del movimiento es para ambos cuerpos la misma. A un tirador sin experiencia el golpe puede derribarlo e incluso herirlo.

Para nuestros cañones rápidos de pólvora, que pesan 2,000 kilogramos y que lanzan municiones de 6 kilogramos a una velocidad de 600 metros por segundo, la velocidad del golpe es sin embargo la misma como la del fusil, es decir es = 1,9 metros. Pero teniendo en cuenta la masa tan considerable de esta arma, la energía de este movimiento es 450 veces mayor, que en el caso del fusil, y casi igual a la energía de la bala de pólvora en el momento de salir. Los viejos cañones ruedan, debido al golpe, algo hacia atrás. En las armas contemporáneas resbalan sólo los tubos algo hacia atrás, y el fuste del cañón queda en el mismo lugar sin moverse deteniendo el disparo con el final de la trompa. Las armas de los barcos (toda esta clase de armas) resbalan en el momento del tiro hacia atrás, pero gracias a una adaptación especial, después del retroceso, vuelven a su antiguo lugar.

El lector habrá observado, sin duda, que en el caso de los cuerpos que nosotros citamos se trata de *movimientos iguales cuantitativos*, que sin embargo están lejos de poseer todos la misma energía cinética. Este hecho, bien entendido, no tiene nada de sorprendente porque de la ecuación.

$$mv = Mv$$

en general, no se deduce que

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{Mv^2}{2}$$

La segunda ecuación es exacta únicamente en el caso que $v = w$ (por ello es fácil persuadirse del hecho por el cual se diferencia la segunda ecuación de la primera). Sin embargo, entre las personas que no conocen a fondo la mecánica, es fácil y ampliamente extendida esta falsa convicción que de la ecuación de la cantidad del movimiento (lo que significa también la ecuación del impulso) dependiese también la ecuación de la energía cinética. Muchos inventores autodidactos, como yo he podido observar, parten del hecho de que a un impulso igual corresponde una igual cantidad de trabajo. Esto conduce, naturalmente, a un fracaso deplorable y significa muchas veces para el inventor la imposibilidad de asimilar bien los fundamentos teóricos de la mecánica.

Los conocimientos usuales y científicos

En el estudio de la mecánica sucede que muchas personas consideran simplemente una ciencia sencilla y casual y esto produce a menudo concepciones erróneas. Aquí daremos un ejemplo demostrativo de esto. ¿Cómo se debe mover un cuerpo sobre el cual obra siempre la misma fuerza? El "sentido común" afirmará que tal cuerpo debe moverse siempre con la misma velocidad, es decir, continuamente y de manera uniforme. Por el contrario, si el cuerpo se mueve siempre igual, esto quiere decir, que sobre él actúa continuamente la misma fuerza. El movimnto del carro, de la locomotora, etc., podrán confirmar esta tesis.

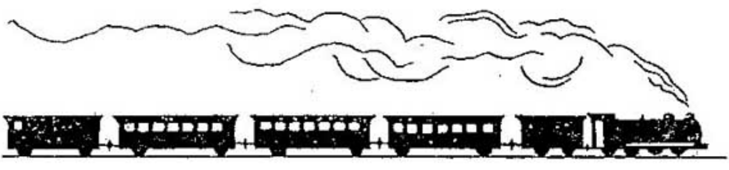


Fig. 10.

La mecánica dice, sin embargo, una cosa completamente diferente. Enseña que las fuerzas constantes no producen movimientos iguales, sino cada vez más acelerados, porque la velocidad prematuramente acumulada de las fuerzas, produce ininterrumpidamente una mayor velocidad. En el caso de un movimiento uniforme el cuerpo en general no se encuentra bajo el efecto de fuerzas extrañas, porque de otro modo no se movería igual y uniforme (véase pág. 20).

¿Es posible que el "sentido común", debido a la observación cotidiana, ha caído en un grave error?

No, esta observación no es completamente errónea, sino únicamente en relación a una serie de fenómenos limitados. La observación cotidiana se realiza en cuerpos, que se transforman bajo las condiciones del roce y de las contradicciones del medio. Pero las leyes de la mecánica se ocupan de cuerpos que se mueven libremente. Por ejemplo: el cuerpo que se mueve bajo condiciones de rozamiento, posee una velocidad determinada, para lo cual hace falta aplicar fuerzas constantes para lograr un eficacia. Pero en este caso, la fuerza no es aplicada para mover el cuerpo, sino exclusivamente para vencer el roce, es decir para crear aquellas condiciones libres que son necesarias para el movimiento. Por lo tanto, es aún más probable que en los casos en los cuales el cuerpo se mueve bajo condiciones de un rozamiento uniforme, para los efectos del movimiento hacen falta fuerzas muy constantes.

Veremos, pues, por qué peca la mecánica cotidiana: sus afirmaciones sufren debido a las insuficiencias del material. La generalización científica tiene una base más amplia. Las leyes de la mecánica científica han surgido no sólo por medio del examen de los movimientos de los carros y máquinas de vapor, sino también por el estudio del movimiento de los planetas y cometas. Para poder hacer una justa generalización, hace falta ampliar el campo de la observación y limpiar los ejemplos de las circunstancias casuales. Sólo un conocimiento logrado así descubre las raíces profundas de los fenómenos y puede ser aplicado en la práctica con verdadera fecundidad.

En los siguientes párrafos, observaremos una serie de fenómenos, en los cuales, de un modo excelente, se demuestra la ligazón entre la cantidad de las fuerzas que mueven los cuerpos libres y la cantidad de la aceleración adquirida por ellos, ligazón que está basada en la ya mencionada segunda ley de Newton. Esta importante correlación, desgraciadamente, ha sido tratada con mucha confusión, en los métodos escolares para el estudio de la mecánica. Nuestros ejemplos han sido tomados de situaciones algo fantásticas, pero en la naturaleza estos fenómenos se comprueban en este sentido, con una mayor exactitud aún.

El bombardeo artillero de la Luna

Las armas de artillería tienen proyectiles que alcanzan en la tierra una velocidad inicial de 900 m. por segundo. Transmitiendo estos tiros mentalmente hacia la luna, donde todos los cuerpos son 6 veces más ligeros ¿con qué velocidad volaría el proyectil de estas armas allá? (Las demás diferencias que existen debido a la ausencia de la atmósfera en la Luna, no han sido tenidas én consideración).

Solución

A esta pregunta frecuentemente se contesta, que, siendo iguales las fuerzas explosivas en la Tierra y en la Luna y actuando estas fuerzas sobre proyectiles que se mueven 6 veces más rápidos en la Luna que en general, la velocidad debe ser en la Luna 6 veces mayor que en la Tierra: 900 por 6 igual a 5,400 por segundo. Por lo tanto, según este cálculo, el proyectil vuela en la Luna con una velocidad de 5,4 kilómetros por segundo.

Semejante contestación, que aparentemente parece justa, es completamente falsa.

Entre las fuerzas, la aceleración y el lugar no existe ninguna ligazón, de la cual pudiese surgir la idea de una tal comparación. Las fórmulas de la mecánica, que representan la expresión matemática de la segunda ley de Newton, unen la fuerza y la aceleración del cuerpo con su *masa* y *no con el lugar*, en el cual este encuentro $f = ma$. Sin embargo la masa del proyectil no ha disminuído en la Luna, sino ella es absolutamente la misma como en la Tierra; es decir para la aceleración de un proyectil semejante, la fuerza de explosión debe ser en la Luna, la misma que en la Tierra; porque siendo lo mismo la aceleración y el tiempo, también la velocidad tiene que ser la misma. (Según la fórmula $v = at$).

Y así, el cañón en la Luna arroja el proyectil con la misma velocidad inicial en la Luna que en la Tierra. Otra cosa es hasta dónde y a qué altura vuela un proyectil, que está lanzado con esta fuerza, en la Luna. En este caso, el debilitamiento de la gravedad tiene una importancia decisiva.

Por ejemplo, la altura del ascenso del proyectil, que es arrojado a la Luna por un cañón, con una velocidad de 900 metros por segundo, se determina por la fórmula:

$$aS = \frac{v^2}{2}$$

fórmula que nosotros encontramos por medio de la tabla indicadora (página 30). Como la aceleración de las fuerzas de gravedad en la Luna es 6 veces menor que la de la Tierra, es decir $a = \frac{g}{6}$ la fórmula tiene el siguiente aspecto:

$$\frac{gS}{6} = \frac{v^2}{2}$$

De aquí resulta que para el proyectil mencionado, el camino vertical es

$$S = 6 \, \frac{v^2}{2g}$$

En la Tierra (en ausencia de la atmósfera) este camino es:

$$S = \frac{v^2}{2\,g}$$

Esto quiere decir que en la Luna el cañón lanza la bala 6 veces más alta, que en la Tierra (la resistencia del aire no ha sido tenida en cuenta) a pesar de que la velocidad inicial del proyectil en ambos casos es la misma.

El revólver en el fondo del Océano

Para esta tarea relatamos también un ejemplo extraordinario: el fondo del océano. El lugar más profundo del océano, que ha sido medido, se encuentra cerca de las islas Antillas y es de 11,000 metros.

Imaginemos que a esta profundidad se encuentra un revólver y que su carga no ha sido humedecida. Por cualquier circunstancia se aprieta el gatillo y la pólvora se inflama. ¿Sale, en este caso la bala o no?

Aquí está la descripción del revólver, imprescindible para la solución de esta tarea: longitud del tubo, 22 cm.; velocidad de la bala en el momento de la salida del tubo, 270 metros por segundo; calibre (diámetro del cañón) igual a 7 mm.; peso de la bala, 7 gramos.

Pues bien, este revólver ¿puede dispararse en el fondo del mar o no?

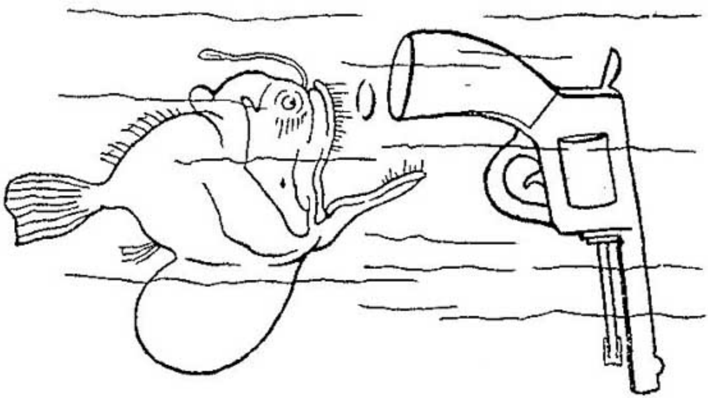


Fig. 11.—¿Puede dispararse una pistola en el fondo del océano?

La cuestión consiste en resolver el problema: ¿cuál de las dos presiones sobre la bala es más fuerte, la de los gases de la pólvora desde dentro o la del agua del océano desde fuera? Esta última es posible calcularla sin posibilidad a equivocaciones, del siguiente modo: cada 10 metros de una columna de agua produce la fuerza de una atmósfera, es decir 1 kilogramo por 1 centímetro cuadrado. De aquí resulta que 11,000 metros de una columna de agua ejercen la presión de 1,100 atmósferas, o sea, más de una tonelada por 1 centímetro cuadrado.

Ahora determinemos la presión de los gases de pólvora. Ante todo la de las fuerzas necesarias para empujar la bala que se tiene que mover. Para esto calculamos la aceleración media del movimiento de la bala en el tubo (tomamos este movimiento como la aceleración media). Así hallamos en la tabla la relación:

$$v^2 = 2\,aS$$

en la cual v es la velocidad de la bala en el borde del cañón, a es la aceleración inquirida y S es la longitud del camino, que corre la bala bajo la presión inmediata de los gases, en una palabra, la longitud del tubo. Si decimos que $v = 270$ ms. $= 27{,}000$ centímetros y que $S = 22$ cm. tenemos

$$27{,}000^2 = 2a \text{ por } 22$$

la aceleración $a = 16{,}500{,}000$ centímetros por segundo $^2 = 165$ kilómetros por segundo elevado al cuadrado.

La enorme cantidad de la aceleración (media) = 165 kilómetros por segundo elevado al cuadrado no debe sorprendernos; pues la bala corre el camino del cañón del revólver en un intervalo mínimo de tiempo, que también es posible lograr calcularlo. El cálculo se efectúa con ayuda de la fórmula $v = at$

$$27{,}000 = 16.500{,}000\ t$$

según la cual el tiempo

$$t = \frac{27}{16{,}500} = \text{aproximadamente } \frac{1}{600} \text{ segundo.}$$

Vemos que en una 600 parte de un segundo la velocidad de una bala debe crecer cerca de 270 metros. Es claro que en un segundo entero el aumento de la velocidad debe ser enorme.

Pero volveremos ahora al cálculo de la presión. Conociendo la cantidad de la aceleración de la bala (una masa de 7 gramos) nos es fácil calcular las fuerzas que actúan sobre ella, tomando la fórmula $f = ma$.

7 por 16.500,000 = 115.500,000 dinas. Por un kilógramo de pólvora se cuenta un millón de dinas (una dina es aproximadamente equivalente a un miligramo); es decir sobre la bala actúa una fuerza de 115 kilogramos. Para calcular la presión en kilo-

gramos sobre 1 centímetro cuadrado falta saber, en qué área se reparte esta fuerza. El área es igual a la sección transversal del cañón del revólver (el diámetro del canal es 7 mm. = 0,7 cm.)

$\frac{1}{4} \times 3{,}14 \times 0{,}7^2 = 0{,}38$ centímetros cuadrados.

Es decir, sobre el centímetro cuadrado obra la presión de 115:0,38 = aproximadamente a 300 kilogramos.

Y así la bala, en el momento del tiro, alcanza una presión de 300 atmósferas contra una presión del agua del océano que pesa miles de atmósferas. De tal modo es completamente comprensible que la bala no se mueve de su lugar. La pólvora se enciende pero la bala no sale disparada. La bala del revólver que en el aire (a 35 pasos de distancia) traspasa una tabla de 4-5 pulgadas fácilmente, en este caso se demuestra "impotente" frente al agua.

Mover al globo terrestre

Incluso entre las personas, que saben algo de mecánica, está muy extendida la opinión, que con pocas fuerzas no es posible mover a un cuerpo libre, si tiene éste el peso de una masa enorme. Esta es una de las opiniones "del sentido común". La mecánica enseña una cosa completamente diferente: cada fuerza, incluso la más insignificante, puede poner en movimiento a cualquier cuerpo, incluso al más pesado y monstruoso, si el cuerpo está *libre*. Nosotros hemos aplicado más de una vez la fórmula que refleja este pensamiento:

$$f = ma, \quad \text{y de aquí resulta} \quad a = \frac{f}{m}$$

Esta última concepción nos dice que la aceleración puede ser igual a cero únicamente en el caso en que la fuerza f es igual a cero. *Por esto hace falta cualquier fuerza para poder poner en movimiento a cualquier cuerpo libre.*

Debido a las condiciones que nos rodean, nosotros no observamos siempre con claridad estas leyes. La causa es el rozamiento que en general se opone al movimiento. Con otras palabras, la causa es que ante nosotros, muy a menudo, un cuerpo aparece como si fuese *libre*, pero el movimiento de casi todos los cuerpos, observados por nosotros, no es libre. Para poder *poner en* movimiento a un cuerpo en condiciones de rozamiento hace falta aplicar mayores esfuerzos que los que representan este rozamiento. Un armario de roble que se encuentra encima de un piso de roble seco, se mueve únicamente en el caso de una presión de nuestros manos si nosotros aplicamos una fuerza no menor a una tercera parte del peso del armario, porque la fuerza del rozamiento, roble sobre roble (enteramente seco) representa un 34% del peso del cuerpo. Pero si no existiese ningún roce, entonces incluso un niño sería capaz de mover un armario pesado, por medio de un toque con el dedo.

En la naturaleza, entre los pocos cuerpos que son auténticamente libres, es decir que se mueven, no estando expuestos ni al roce ni a la reacción del medio, cuentan los cuerpos celestes: el Sol, la Luna, los planetas y entre ellos también nuestra Tierra. ¿Quiere decir esto que el hombre puede mover de su lugar al globo terrestre con la fuerza de sus músculos? Sin duda que sí ¡empujando el globo terrestre usted es capaz de ponerle en movimiento!

Pero queda todavía en pie el problema ¿cuál será la velocidad de este movimiento? Sabemos que la aceleración que adquiere el cuerpo, bajo la acción de fuerzas determinadas, es tanto menos, cuanto mayor es la masa del cuerpo. Si en el caso de una pelota de madera de croquet, nosotros podremos lograr, por la fuerza de nuestras manos, una aceleración de algunas decenas de metros por segundo, entonces el globo terrestre, una masa que es inmensamente mayor, recibe de una tal fuerza una aceleración inmensamente menor. Nosotros decimos "inmensamente menor", claro que no lo debemos comprender en sentido literario. Es posible medir la masa del globo mundial y por consiguiente es también posible calcular su aceleración en condiciones determinadas.

Hacemos pues esto:

Suponemos que las fuerzas con las cuales el hombre empuja al globo terrestre, son igual a 10 kilogramos, es decir aproximadamente 10.000,000 dinas. Nosotros arriesgamos el enredarnos en los cálculos más vanos, si no determinamos aquí una indicación abreviada de los números grandes: $10.000,000 = 10^7$. La masa del globo terrestre es igual a 6 por 10^{27} gramos. Por esto, la cantidad de una tal aceleración:

$$a = \frac{f}{m} = \frac{10^7}{6 \text{ por } 10^{27}} = \frac{1}{6 \text{ por } 20^{20}}$$

centímetros por segundo.

Tal es la cantidad de la aceleración adquirida en este caso por el globo terrestre. ¿Cuál será el movimiento del planeta con una aceleración del movimiento tan lenta? Esto depende de la continuidad del movimiento. Y sin calcular ya es claro que en cualquier hora o día el cambio es casi nulo. Sin embargo, si tomamos los grandes intervalos, como los años que son centenares de cantidades de 32 millones de segundo (32 por 10^6), entonces el camino *S*, es transitable en *t* segundos con una aceleración *a*, que es igual a (véase la tabla indicadora sobre la mecánica)

$$S = \frac{a\ t^2}{2}$$

En el caso dado

$$S = \frac{1}{6 \text{ por } 10^{20}} \times \frac{(32 \text{ por } 10^6)^2}{2} = \frac{1}{12 \text{ por } 10^5} \text{ centímetros.}$$

El desplazamiento es igual, por ejemplo, a una fracción de una millonésima de centímetro. Tal desplazamiento no es posible observarlo ni con el microscopio más fuerte. Si tomamos un intervalo de tiempo mayor: por ejemplo si nos suponemos que el hombre durante toda su vida, aproximadamente 70 años, no hace otra cosa que empujar el globo terrestre, entonces la cantidad del desplazamiento se aumentaría en 70^2 veces, es decir en cálculos redondos 5,000 veces y sería igual a

$$\frac{5 \times 10^3}{12 \times 10^5} \text{ centímetros} = 0{,}04 \text{ milímetros}$$

Esto es, aproximadamente el grosor del pelo de un hombre.

El resultado es sorprendente: con la fuerza de sus músculos el hombre puede en el curso de su vida mover al globo terrestre por el grosor de un pelo. ¡Pero qué quiere usted, esto es incluso una hazaña muy considerable para un pigmeo como el hombre!

Lo más sorprendente es que nuestra cuenta no tiene nada de fantástica. ¡Nosotros efectivamente, movemos con la fuerza de nuestros músculos al globo terrestre! Igual, como por ejemplo, saltando en la Tierra por medio de la presión de nuestros pies nosotros forzamos a la Tierra a ser aplastada —en una cantidad mínima— bajo la acción de esta fuerza. Nosotros ejecutamos una auténtica proeza con cada uno de nuestros pasos, literalmente con cada paso, porque a cada paso empujamos inevitablemente con nuestros pies a nuestro planeta. Cada segundo nosotros forzamos al globo terrestre a hacer continuas transformaciones altamente microscópicas y así aumentamos los movimientos astronómicos, propios a nuestro planeta. [1]

El falso camino para un invento

En busca de nuevas posibilidades técnicas los inventores deben invariablemente poner sus ideas bajo el control de las leyes severas de la mecánica, si no quieren emprender el camino hacia fantasías irrealizables. No conviene pensar que el único principio general, que no debe violar el inventor de un proyecto, es la ley de la conservación de la energía. Existen también otras importantes tesis, cuyo menosprecio muchas veces lleva a los inventores a la confusión y les impide desarrollar sus fuerzas de un modo completo. Esta es la ley del movimiento del centro de gravedad. Estudiando las proporciones elaboradas de los proyectos para los nuevos aparatos de la aviación, muchas veces me he tenido que convencer de que esta ley es muy poco conocida para círculos muy amplios.

La mencionada ley afirma que el movimiento del centro de gravedad de los cuerpos (o de un sistema de cuerpos) no debe ser confundido con las fuerzas interiores que actúan sobre él. Si la bomba de aviación hace explosión, sus cascos, mientras que no llegan hasta la tierra, conservan su centro general de gravedad de toda la bomba. Es muy frecuente que en casos en los cuales el centro de gravedad del cuerpo fué primitivamente en posición de reposo (en los casos en los cuales el cuerpo

1 Por lo tanto hace falta tener en cuenta, que nuestros esfuerzos no están relacionados enteramente con el movimiento de la Tierra; una parte de las fuerzas es dedicada al cambio de su forma.

estuvo inmóvil) es imposible que cualquier fuerza interna sea capaz de cambiar el centro de gravedad.

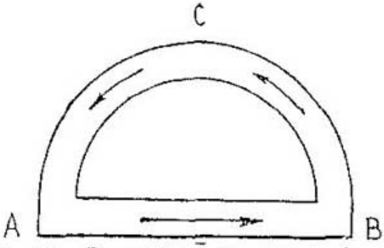


Fig. 12.—Proyecto de un aparato de volar de nuevo tipo.

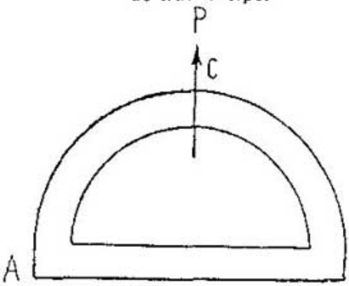


Fig. 13.—La fuerza P debe arrastrar el aparato hacia arriba.

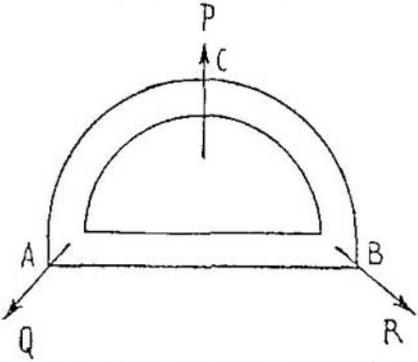


Fig. 14.—¿Por qué el aparato no se eleva?

Qué grado puede alcanzar el error, producido por la falta de atención de estas leyes por parte del inventor, se puede observar del siguiente ejemplo muy instructivo, del ejemplo de un proyecto para una máquina de aviación de un tipo completamente nuevo y original.

Imaginemos —dice el inventor— un tubo cerrado (dibujo 12), que está compuesto de dos partes: una parte recta horizontal *A B* y otra arqueada *A C B* encima de la primera. En el interior del tubo hay una substancia líquida, que ininterrumpidamente corre en una dirección (la corriente se sostiene por medio de un tornillo giratorio que está situado dentro del tubo). La corriente del líquido en la parte arqueada *A B C* del tubo es acompañada por la presión centrífuga sobre la pared externa. Recibiendo algún refuerzo P (dibujo 13), que es orientado hacia arriba, refuerzo al cual no se opone ninguna otra fuerza más, y así el movimiento del líquido en el camino recto A B no está acompañado por presiones centrífugas. El inventor saca de allí su conclusión, que en caso de una velocidad suficiente de la corriente, la fuerza P, debe arrastrar todo el aparato hacia arriba.

¿Es exacto este pensamiento del inventor? Incluso sin estar al tanto de los pormenores de la mecánica, es posible afirmar anticipadamente que el aparato no se mueve de su lugar. En realidad, como aquí, las fuerzas que actúan son fuerzas interiores, ellas no pueden desplazar el centro de gravedad de todo el sistema (es decir al tubo, junto con el agua que le llena y al mecanismo que produce la corriente). La máquina, por lo tanto, no puede lograr un movimiento ascendente general. En el cálculo del inventor existen errores debidos a un descuido esencial.

No es difícil demostrar en qué consiste este error. El autor del proyecto no ha tenido en cuenta que la presión centrífuga surge no sólo en la parte oblicua, A, B, C, del camino líquido, sino también entre los puntos A B de las vueltas de la corriente (dibujo 14). Aunque el camino oblicuo allí no es largo, y la vuelta es muy curvada (el radio de la curva es muy pequeño). Pero es sabido que cuanto más violenta es la vuelta (cuando menor es la curva), tanto más fuerte es el efecto centrífugo. Como consecuencia de esto, sobre las vueltas deben actuar dos fuerzas más Q y R, que están orientadas hacia afuera, estas fuerzas actúan equivalentemente con dirección hacia abajo y son iguales a la fuerza P a la cual anulan. El inventor no ha observado estas fuerzas. Pero incluso no asociándolas, debía comprender el fracaso de su proyecto, si conociera la ley del movimiento del centro de gravedad.

Hace cuatro siglos, el gran Leonardo da Vinci, escribió justamente que las leyes de la mecánica "deben retener las riendas de los ingenieros e inventores para que ellos no prometan a sí mismos y a los demás realizar cosas imposibles de lograr".

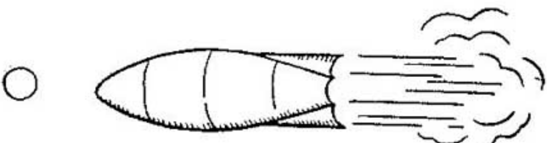
¿Donde está el centro de gravedad del cohete?

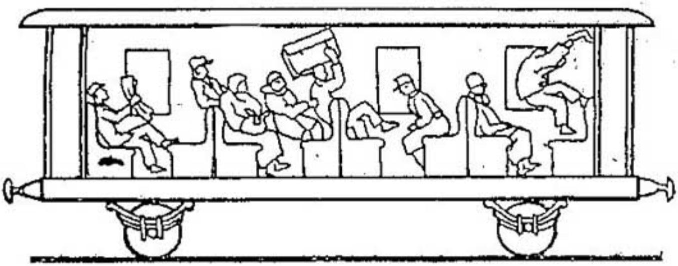
Se puede afirmar que el niño más joven y más prometedor de la técnica moderna, el cohete, altera la ley del movimiento del centro de gravedad. Los navegantes de las estrellas quisieran encontrar un cohete que pudiera volar hasta la Luna, debido únicamente a la acción de fuerzas interiores. Però es claro que el cohete lleva consigo a la Luna su centro de gravedad. ¿Qué sucede en este caso con nuestra ley? El centro de gravedad del cohete hasta el momento de su disparo fué la Tierra, y ahora se encuentra en la Luna. ¡Una alteración más clara de esta ley, no puede haber!

¿Qué se puede objetar contra este cambio? Que él está basado en una equivocación. Porque si hay gases que se escapan del cohete –al despedirse éste de la superficie de Tierra, entonces es claro que el cohete en su totalidad no traslada consigo a la Luna su centro de gravedad. A la Luna vuela únicamente una parte del cohete: la parte que queda atrás –los productos inflamables– se mueven en dirección opuesta, por esto el centro de gravedad de todo el sistema está allí donde ha estado antes del arranque del cohete.

Ahora dediquemos nuestra atención a las circunstancias que los gases expedidos se mueven no sin obstáculos, sino que ellos se golpean sobre la tierra. Este mismo sistema del cohete se puede aplicar sobre el globo terrestre y a la conservación del enorme sistema del cohete-Tierra. Debido al golpe de las corrientes de los gases sobre la Tierra (o sobre su atmósfera) a veces nuestro planeta se desplaza y su centro de gravedad cae hacia el lado opuesto del movimiento. Pero la masa del globo terrestre es tan grande, en comparación con la masa del cohete, que el más insignificante, incluso el prácticamente imperceptible de sus cambios es bastante para restablecer el equilibrio de aquella aligación del centro de gravedad del sistema del cohete-Tierra, que es la condición previa para el alejamiento del cohete hacia la Luna. El desplazamiento del cohete hacia la Luna es tanto más rápido, cuanto mayor es la masa de la Tierra en comparación con la masa del cohete (es decir centenares de miles de veces).

Nosotros vemos así que incluso en una cuestión que parece extraordinaria, la ley del centro de gravedad conserva siempre su completo valor.





CAPITULO III

LA GRAVEDAD

El ejemplo de la plomada y el péndulo

La plomada y el péndulo son sin duda los aparatos más simples de todos los que utiliza la ciencia. Es asombroso que instrumento tan primitivo haya adquirido una fama casi de leyenda. Gracias a ellos el hombre logró penetrar con el pensamiento en el seno de la tierra y ha podido saber lo que acontece a decenas de kilómetros bajo nuestros pies.

Apreciaremos plenamente esta proeza de la ciencia si recordamos que los pozos profundos de las minas no alcanzan más de 3½ kilómetros; es decir, están lejos de alcanzar aquellas profundidades en la Tierra de las que obtenemos conocimientos utilizando la plomada y el péndulo.

El principio mecánico, en el cual está basado la aplicación, determinaría el cálculo en cualquier punto. La desigualdad de la distribución de la masa terrestre cerca de la superficie de la Tierra o en las profundidades de ésta, cambia la suposición teórica. La proximidad de las montañas, por ejemplo, obliga a la plomada a desviarse hacia ellas y tanto más notable es la desviación cuanto más cerca está la montaña o cuanto mayor es su masa. En las proximidades del observatorio de Simferopol (Crimea), la plomada experimenta una notable inclinación por la proximidad de las montañas de Crimea; el ángulo de la declinación alcanza medio minuto. Más fuertemente aún se desvía la plomada en las montañas del Cáucaso; en Trascaucasia la desviación es de 37 segundos de arco y en Batúm de 39 segundos. Por el contrario, el vacío en las llanuras de la Tierra provoca el rechazo de la plomada: ésta se extiende hacia el lado opuesto a las masas que la rodean. (En estas planicies parece que el empuje es igual a aquella atracción que la masa de la materia efectúa sobre la plomada, si ésta cae dentro de una cavidad). La plomada es empujada no sólo por el vacío, sino también debido a la falta de aglomeración de las cosas menos sólidas que predominan en general, en la espesura de los bosques. Por ésto

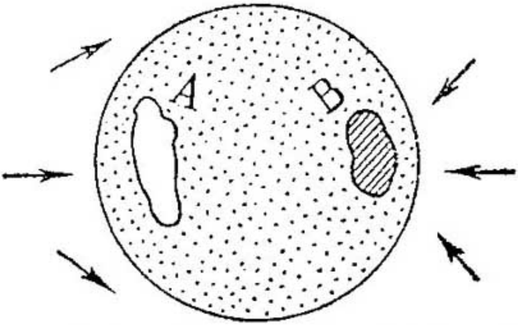


Fig. 15.—El vacío A y el macizo B son, según Klossovsky, los que desvían las plomadas.

en Moscú, alejados de toda montaña, la plomada se desvía incluso en 10 segundos de arco hacia el norte. Como veremos, la plomada puede servir como instrumento de percepción con cuya ayuda se puede medir la estructura y composición del interior de la Tierra.

Todavía más sensible, como instrumento de percepción, es el péndulo. Este instrumento posee la siguiente cualidad: si la oscilación de su balance no sube algunos grados, entonces la prolongación de los balances no depende del grado de la oscilación, y el balance grande y pequeño son equivalentes. La prolongación de la oscilación depende, en general, de otras circunstancias: de la *longitud* del péndulo y de la *aceleración de la fuerza de gravedad* en este lugar del globo terrestre. La fórmula que une la duración t, de una oscilación completa, (ida y vuelta), con la longitud l, del péndulo y con la aceleración g, de las fuerzas de gravedad, es la siguiente:

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

En el caso en que la longitud l del péndulo está determinada en metros, conviene medir también la aceleración g de la fuerza de gravedad en metros en segundos por segundos.

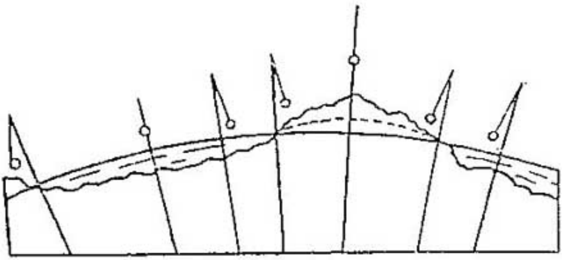


Fig. 16.—Ferfil de la superfície de la tierra y orientación de la plomada según A. B. Klossovsky.

Cuando para el cálculo del grosor de la Tierra se utiliza un péndulo "de segundos", es decir, un péndulo que hace una oscilación (hacia un lado) por segundo, la fórmula debe ser:

$$\pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 1; \text{ y } l = \frac{g}{\pi^2}$$

Es claro que cualquier cambio de la gravedad debe reflejarse en la longitud de tal péndulo; por esto hace falta o prolongarlo o acortarlo para que indique con exactitud los segundos. Por tal procedimiento, se logra la medida de un cambio de las fuerzas de gravedad en un 0,0001 de su cantidad.

No voy a describir la técnica de la aplicación de un uso semejante con la plomada y el péndulo (es demasiado complicada, más de lo que uno se puede imaginar). Quiero indicar sólo algunos de los más interesantes resultados.

Parece que cerca de las costas del océano, la plomada debe desviarse siempre hacia los macizos montañosos. La experiencia no confirma esta idea. El péndulo incluso comprueba que en el océano y sus islas la dirección de las fuerzas de gravedad es más fuerte que cerca de las costas, pero al lado de las costas es mayor que lejos de ellas, en el interior del continente. ¿Qué indica esto? Indica sin duda, que el espesor de la Tierra en los continentes está compuesto de material más ligero que en el fondo de los océanos. De tales hechos físicos, la geología saca valerosas indicaciones para los juicios sobre las capas de las cuales se compone la corteza de nuestro planeta.

Un servicio de gran valor prestó este medio potente a la investigación para aclarar las causas de la llamada "anomalía magnética de Kursk". Dedicamos algunas líneas al resumen que hizo sobre ella uno de sus investigadores. [1]

"Con completa precisión se puede afirmar la existencia de masas atrayentes importantes bajo la superficie de la tierra, porque el límite de estas masas hacia el lado occidental . . . se puede establecer con completa exactitud. Junto con esto se puede suponer también hasta donde se extienden estas masas principalmente en dirección oriental; porque la pendiente oriental es más moderada que la occidental".

Es sabida la gran importancia industrial que han tenido aquellos yacimientos de hierro, que fueron descubiertos en la

1 La investigación en la región de Kursk sobre la anomalía no fué hecha con la plomada sino con una balanza especialmente construída (el llamado "variómetro"). La hebra del aparato se encuentra bajo el efecto de la atracción de las masas subterráneas; ¡la exactitud con la cual este extraordinario aparato verifica sus medidas es igual a la billonésima parte de un gramo (10^{-12})! La atracción de grandes montañas las "siente" este variómetro a una distancia de 300 kilómetros. He aquí una breve descripción del aparato (de un artículo del profesor P. M. Nikiforov, sobre la anomalía de Kursk):

"La parte principal del aparato consiste en una balanza rígida que está descrita esquemáticamente en la figura 17. El balancín M_1E de un tubo delgado de aluminio, tiene aproximadamente una longitud de 70 centímetros; en uno de los extremos del balancín está sujeto un paso de oro en forma cilíndrica (30 gramos) y en el otro está suspendido de un alambre, EM_2, un arambel de oro M_2 (de 30 gramos). El balancín está suspendido de la balanza por un delgado hilo de platino iridio OA, de una longitud de 60-70 centímetros. Para proteger la balanza de las corrientes de aire, está envuelta en una cubierta de una triple red de alambre. En el aparato hay dos pares de balanzas arqueadas, que giran en 180° una en relación a la otra: S es un espejo liso.

Fig. 17.—Arriba, a la derecha, un barómetro; a la izquierda, el aparato construído.

región de las anomalías de Kursk. Las reservas de las minas de hierro cuentan aquí por decenas de miles de toneladas que forman casi la mitad de todas las reservas mundiales. Fueron hallados también algunos resultados de las anomalías (fuera de cualquier norma de la fuerza de gravedad en los declives orientales de los Urales, (según investigaciones, en 1930, por los astrónomos de Leningrado).

"Cerca de Salatusta tenemos un mayor máximo de la fuerza de gravedad, que corresponde al ascenso del macizo cristalino de las cordilleras de los Urales".

"Un segundo máximo que existe en el este de Kosirev, caracteriza la aproximación de cordilleras antiguas, hoy sumergidas, a la superficie de la tierra".

"Un tercer máximo, al este de Mischkino, da una nueva indicación sobre la aproximación de capas antiguas hacia la superficie de la tierra".

Y al final, un cuarto máximo, al oeste de Petropavlovsk, fué causado por la aproximación de capas más pesadas" (P. V. Numerov).

Ante nosotros se presentan dos de los numerosos ejemplos que demuestran que la física crea la base para la elaboración científica y la aplicación práctica de otros terrenos muy alejados a ella misma.

El péndulo en el agua

Imaginemos que el péndulo de un reloj de pared se balancease en el agua. Su peso extremo tiene una forma "corriente" que hace descender casi a cero la resistencia del agua frente a su movimiento. La oscilación de tal péndulo

¿será mayor o menor que fuera del agua? Sencillamente expresado: ¿el péndulo oscila en el agua con mayor velocidad que en el aire o de un modo más lento?

Como el péndulo oscila en un medio sin resistencia, hace falta decir que no existen causas que puedan cambiar la velocidad de sus oscilaciones. Sin embargo, la experiencia afirma,

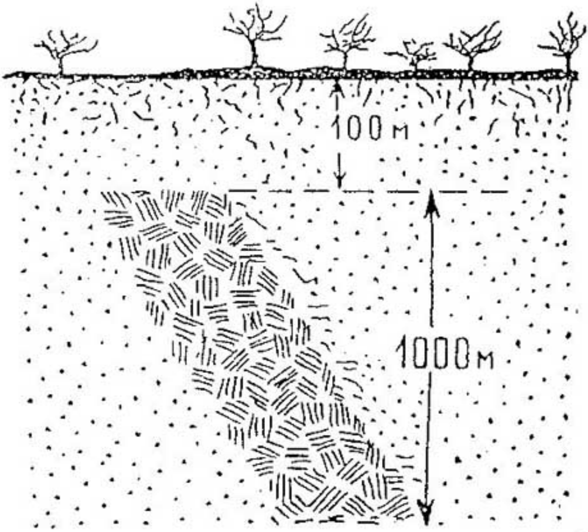


Fig. 18.—Las causas de las anomalías de Kursk: una veta de metales de hierro de una potencia de aproximadamente 1,000 metros a una profundidad de 100 metros.

que tal péndulo en dichas condiciones parece oscilar más lentamente.

Este fenómeno, enigmático a primera vista, se explica por la acción del agua, que tiene la tendencia a impulsar hacia fuera a todos los cuerpos sumergidos en ella. El agua también disminuye el peso del péndulo, sin cambiar su masa. Esto quiere decir que el péndulo se encuentra en el agua, en tales condiciones, como si hubiese sido trasladado a otro planeta, donde la aceleración de las fuerzas de gravedad es más débil. De la fórmula, explicada en capítulos anteriores,

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

se deduce, que en caso de una disminución de la fuerza de gravedad *(g)* el tiempo de la rotación *(t)* debe aumentar; por lo tanto, el péndulo tendrá una oscilación más lenta.

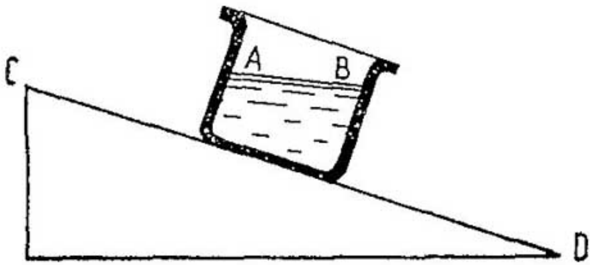


Fig. 19.—Una vasija con agua se deslisa por un plano inclinado. ¿Cómo queda la superficie del agua?

Sobre un plano inclinado

Un vaso con agua se encuentra encima de un plano inclinado (dibujo (19). Mientras que esté en reposo el nivel AB del agua dentro del vaso permanecerá horizontal. Pero después que el vaso comienza a deslizarse por el plano inclinado bien engrasado CD ¿el nivel del agua en el caso quedará horizontal mientras que el vaso se desliza por el plano?

La experiencia indica que en el vaso que se mueve sin frotamiento en el plano inclinado, el nivel del agua queda paralelo a la inclinación del plano: Explicaremos el por qué:

El peso *P* de cada partícula (dibujo 20) puede inclinarse en dirección de dos fuerzas existentes: *Q* y *R*. La fuerza *P* arrastra las partículas del agua y del vaso que se mueven a lo largo del plano inclinado *CD;* estas partículas de agua efectúan sobre las paredes del vaso la misma presión que en caso de reposo (debido a la uniformidad de la aceleración del movimiento). Incluso la fuerza *Q*, comprime las partículas del agua hasta el fondo del vaso. La acción de todas las diversas fuerzas *Q* sobre el agua es la misma que la acción de las fuerzas de gravedad sobre las partículas de cualquier líquido en estado de reposo: el nivel del agua toma una posición perpendicular en

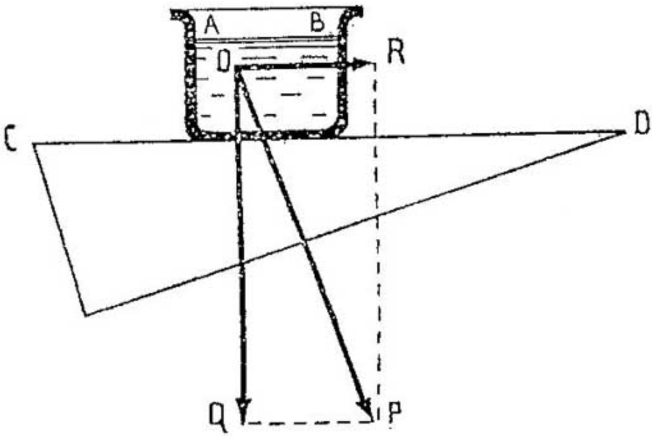


Fig. 20.—Solución al problema de la figura 19.

dirección a la fuerza *Q*, es decir, paralelo a la línea del plano inclinado.

Pero ¿cuál es la posición del nivel del agua en una vasija redonda que se desliza (por ejemplo, debido al roce) hacia abajo por el declive del plano, con un movimiento proporcional?

Es fácil observar que en tal vasija el nivel del agua debe estar no inclinado sino horizontal. Esto se deduce ya del hecho que el movimiento proporcional no puede provocar ningún cambio de las leyes mecánicas en relación al reposo en que se encuentran los cuerpos (principio clásico de la relatividad).

¿Resulta esto también válido para todo lo anteriormente expuesto? Seguro, incluso en el caso de un movimiento proporcional del vaso encima de un plano inclinado, las partículas de la pared del vaso no reciben ninguna aceleración; las partículas del líquido que se encuentran dentro del vaso, están bajo la acción de la fuerza *R*, y, por lo tanto, son forzadas por la fuerza *R*, contra la pared del vaso. De ahí resulta el que cada partícula de agua se encuentra bajo la acción de dos fuerzas de presión: las fuerzas *R* y *Q*, que son equivalentes también al peso *P*, que tiene una orientación vertical. Estas son las causas por las que el nivel del agua debe estar en este caso, horizontal. Solamente en el comienzo del movimiento, cuando el vaso, hasta lograr la rapidez establecida, se mueve todavía con demasiada velocidad[1] el nivel del agua tiene por un pequeño instante una posición inclinada.

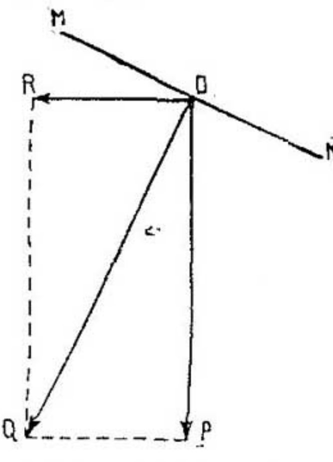


Fig. 21.—¿Qué fuerzas obran sobre los objetos en un vapor que se pone en movimiento? (Dirección del movimiento.)

¿Cuándo una línea horizontal no es horizontal?

Si en el vaso o en la vasija que se desliza hacia abajo sin roce se encontrase en lugar del agua un hombre con un nivel sólido, se podría observar una cosa muy extraña. El cuerpo del hombre sería lanzado contra la pared inclinada del vaso absolutamente del mismo modo que en caso de reposo contra una pared horizontal (sólo que con menos fuerza). Es decir, para tal hombre el pleno inclinado de la pared del vaso parecería completamente horizontal. Con arreglo a esto, aquella dirección que se consideró hasta el comienzo del movimiento como una dirección horizon-

1 Hace falta recordar que el cuerpo no puede entrar en movimiento uniforme de un modo instantáneo; durante el paso del reposo al movimiento uniforme, el cuerpo tiene que pasar por un estado de movimiento acelerado; este estado puede ser de corta duración.

tal, toma para el hombre la dirección de un plano inclinado. Ante él se presenta un aspecto muy extraño: las casas, todo lo que hay en el pueblo parece estar inclinado, la superficie del estanque se desintegra en un declive, todo el paisaje parece estar vuelto "al revés". Si este "pasajero" asombrado no diera fe a sus ojos y aplicara la balanza de nivel, el instrumento indicaría que el nivel es horizontal. En una palabra: para tal hombre la dirección horizontal no parecería horizontal en el sentido habitual de la palabra.

Hace falta señalar que, en general, cada vez que nosotros no conocemos la inclinación de nuestro propio cuerpo en relación a la posición perpendicular, lo atribuimos a la pendiente de la naturaleza que nos rodea. Los borrachos consideran, generalmente, que todo se mueve en un círculo alrededor de ellos. Recuérdense que en la obra de Necrasov se dice:

> Al campesino le parecía
> como si él hubiese subido a una colina
> y que todo el pueblo se balanceaba
> y que incluso la iglesia vieja
> con sus altos campanarios
> temblaba, y los dos campanarios se acercaban mutuamente.

El campo horizontal puede perder para el hombre su posición horizontal también en el caso en que se mueva no por una pendiente sino por un camino rígidamente horizontal. Así sucede, por ejemplo, a la entrada del tren en las estaciones o a la salida de ellas y generalmente en aquellas partes del camino en las cuales los vagones corren más lenta o más rápidamente. He aquí descrita la sensación experimentada por un pasajero, observada por el físico francés, Ch. Guibaume:

"Cuando el tren comienza a disminuir su marcha, podemos percibir una extraña observación: nos parece que el campo se inclina en dirección al movimiento del tren; pensamos que marchamos hacia abajo cuando marchamos a lo largo del vagón en dirección del movimiento y que marchamos hacia arriba, cuando nos movemos en dirección opuesta al movimiento del tren. Pero en el caso de que el tren se marche de la estación, el campo siempre parece inclinarse hacia el lado que esté opuesto al movimiento".

"Podemos reconstruir el experimento —sigue escribiendo el mismo autor— de manera que explique la aparente declinación que de hecho no es sino una posición horizontal. Para esto basta tener dentro del vagón un frasco con cualquier clase de líquido, por ejemplo, glicerina; en el momento de la aceleración, la superficie del líquido adopta una posición inclinada. Se habrá oído más de una vez el que no es agradable estar sentado cerca de los depósitos de agua de los vagones; cuando en tiempo de lluvia el tren marcha, el agua de los depósitos parece caer hacia adelante y cuando el tren sale de las estaciones, el agua parece caer hacia atrás. Esto resulta así porque la superficie del agua sube hasta el borde opuesto a la dirección del movimiento".

Si queremos examinar las causas de estos extraños fenómenos, no debemos observarlos desde el punto de vista de un observador pasivo, en estado de reposo, que no se encuentra dentro del tren en marcha, sino desde el punto de vista de aquel obser-

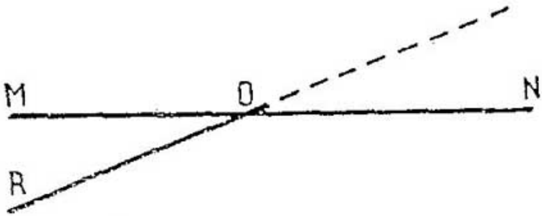


Fig. 22.—¿Por qué parece inclinado el piso de un tren que se pone en movimiento?

vador que encontrándose en el interior del vagón, participa por sí mismo en la aceleración del movimiento y por consiguiente, como alguien que está en relación con todos los fenómenos observados a pesar de que él se considera inmóvil. Cuando el vagón se mueve aceleradamente y nosotros nos sentimos en estado de reposo, la presión de la pared trasera del vagón empuja nuestro cuerpo (o nos presiona a levantarnos), o nos empuja hacia atrás, tirándonos contra la pared (o presionándonos a sentarnos) siempre con la misma fuerza. Nos encontramos entonces bajo la influencia de dos fuerzas: la fuerza *R*, en dirección contraria al movimiento del tren y la fuerza *P* que nos presiona contra el suelo. La fuerza *Q* que tiene una orientación igual a nosotros, representa aquí la dirección que hubiésemos considerado como perpendicular en estado de reposo. La dirección *MN* que es perpendicular, según la nueva medida, es para nosotros horizontal. De ahí resulta que de la anterior dirección horizontal OR se puede decir que en relación al movimiento del tren, ella se transforma en la dirección opuesta (dibujo 22).

¿Qué sucede en tales condiciones con los líquidos en los platos? Para esto hace falta tener en cuenta que la nueva dirección "horizontal" no coincide con el nivel del líquido, sino que se efectúa por la línea MN (dibujo 23). Esto es claramente visible en el caso de la figura donde la flecha indica la orientación

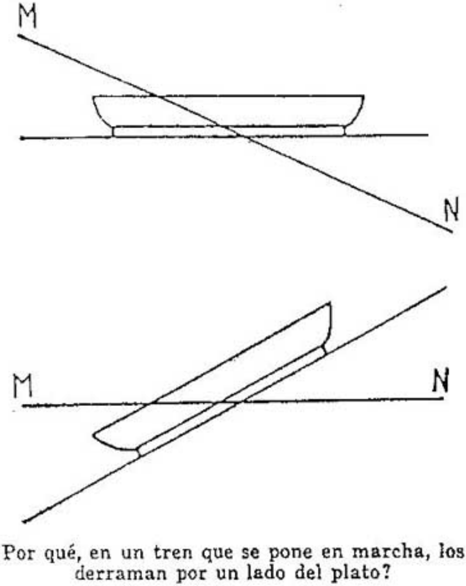


Fig. 23.—¿Por qué, en un tren que se pone en marcha, los líquidos se derraman por un lado del plato?

del movimiento del vagón. Ahora es comprensible por qué el agua debe salirse por el borde del plato (o por el borde de la vasija del agua del tren).

Un cuadro general sobre todos los fenómenos que se realizan en el vagón en el momento del arranque es fácil imaginárselo, si se tiene en cuenta que el vagón se inclina para tomar una posición completamente nueva respecto a su línea "horizontal" (véase la viñeta de este capítulo). Se comprenderá así el por qué las gentes que se encuentran de pie en el vagón, deben caerse hacia atrás. Este hecho conocido por todos, se debe a la realidad de que las piernas puestas en el suelo del vagón se encuentran ya en movimiento, mientras que el tronco y la cabeza están todavía en estado de reposo.

Una observación semejante fué hecha ya por Galileo, como se ve del siguiente fragmento suyo:

"El vaso con agua se encuentra en movimiento pero no uniforme, su velocidad cambia, tanto acelerándose como disminuyendo. ¿Cuáles serán las consecuencias de esta desigualdad? El agua no se ve privada de hacer movimientos dentro del vaso. En caso de una disminución de la velocidad del vaso, el agua conserva la tendencia adquirida y afluye hacia adelante, donde se acumula como es comprensible. Si, por el contrario, la velocidad del vaso aumenta, el agua conserva un movimiento más lento y afluye y se concentra, por lo tanto, en la parte de atrás."

Esta observación no es opuesta, en general, a los hechos que hemos mencionado antes. Para la ciencia tiene el mismo valor como aquellas observaciones que no sólo están de acuerdo con los hechos sino que ofrecen también la posibilidad de aplicarlos cuantitativamente. En el vaso dado, debemos preferir por esto la explicación anteriormente expuesta, es decir, la explicación de que el piso bajo los pies deja de ser horizontal. Ella da la posibilidad de apreciar el fenómeno de un modo cuantitativo para agregarla a un concepto vulgar lo que no debe hacerse. Si, por ejemplo, la aceleración del tren, en su salida de la estación, es igual a 1 metro en el segundo por segundo, entonces el ángulo QOP (dibujo 21), entre la nueva y la vieja dirección conocida, es fácil de calcular, con ayuda del triángulo QOP, en el cual $QP : OP = 1 : 9{,}8 = 0{,}1$ aproximadamente:

$$tg\ QOP = 0{,}1; < QOP = 6°.$$

Esto quiere decir que la plomada que se encuentre pendiendo en el vagón, debe inclinarse en el momento de la salida, 6 grados. El piso bajo los pies se inclina precipitadamente 6 grados, y marchando a lo largo del vagón, nosotros sentimos también una sensación tal como en el caso de una marcha sobre un camino con una inclinación de 6 grados. El método corriente para observar estos fenómenos no puede facilitarnos tales detalles.

Es posible que el lector pueda hacer la observación de que la diferencia entre las dos explicaciones depende sólo de dos diferentes conceptos: uno, toma como punto de partida para el fenómeno, el hecho de que el observador que no se mueve, se encuentra fuera del vagón, y el otro observador parte del hecho de que él mismo participa en el proceso de la aceleración del movimiento.

La montaña magnética

En California, cerca de la ciudad de Hollywood, conocido centro de la industria cinematográfica, hay una montaña de la cual los automovilistas locales (es decir, casi tres cuartas partes

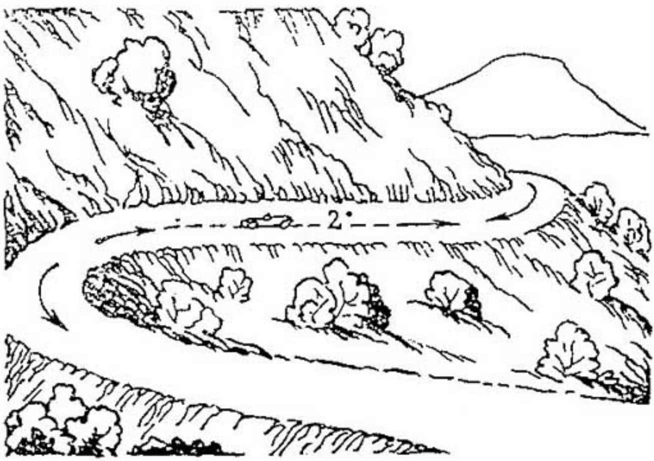


Fig. 24.—La supuesta montaña mágica de California.

de toda la población) afirman, que tiene cualidades magnéticas. Se trata de que en un trozo, no largo, del camino, durante un espacio de 60 metros, se pueden observar en la base de esta montaña fenómenos muy extraños. Cuando un automóvil, baja por la pendiente, si para el motor, entonces la máquina rueda hacia atrás es decir, por la pediente arriba, atraída por la atracción magnética de la montaña.

Esta característica sorprendente de la montaña es considerada como auténticamente fundamentada, porque es cierto que en el lugar mencionado del camino, incluso las tablas indicadoras mencionan este fenómeno. Para su comprobación se realizó una investigación detallada, de este trozo de la montaña. El resultado recibido fué inesperado: lo que todos habían considerado por un ascenso, no era más que un descenso con una pendiente de dos grados. Una pendiente tal puede retener a un automóvil que se desliza sin motor por una carretera muy buena.

En lugares montañosos, engaños semejantes son muy frecuentes y ellos son, no raras veces, las causas de cuentos y leyendas fabulosos.

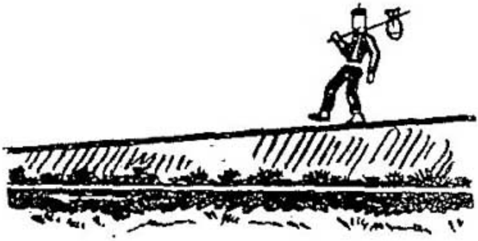


Fig. 25.—Insensible inclinación de un camino a lo largo de un río.

RÍOS QUE CORREN MONTE ARRIBA

Semejante ilusión visual explican también las narraciones sobre ríos, cuyas aguas corren por pendientes hacia arriba. Sobre esto hemos elegido una cita del libro "El sentido exterior" del físico alemán Prof. Berstein:

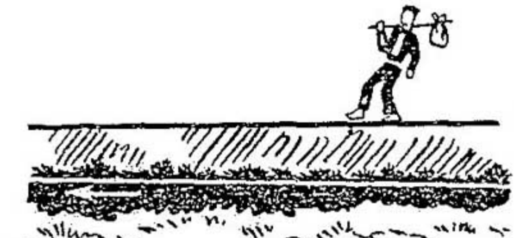


Fig. 26.—Al peatón le parece que el río corre hacia arriba.

"En muchos casos nosotros nos equivocamos fuertemente en el juicio sobre si la continuidad de una dirección horizontal, indica una inclinación hacia arriba o hacia abajo. Marchando, por ejemplo, sobre una débil declinación de un camino y viendo a cualquier distancia otro camino, que va al encuentro del primero, nosotros nos imaginamos que el ascenso del segundo camino es mucho más empinado, de lo que es en realidad. Con asombro nos convencemos después que el segundo camino no es tan empinado, como nosotros nos lo habíamos imaginado."

Esta ilusión se explica, porque el camino por el cual marchamos, es tomado por nosotros como una base principal, desde la cual fijamos la orientación de las demás pendientes. Nosotros, inconscientemente, lo identificamos con una base horizontal, y por esto, es natural, que nos imaginemos las pendientes de los demás caminos de un modo exagerado.

De esto se deduce, que nuestro sentido muscular en general no reacciona en caso de marchas sobre pendientes de 2-3 grados. En las calles de Moscú, Kiev y otras ciudades con colinas, muchas veces tenemos ilusiones de éstas, que habla el erudito alemán. Todavía más curiosas que esta ilusión visual que hemos mencionado, es aquella en que, en muchos lugares, afirman "que los ríos corren monte arriba."

"En caso de un descenso por un camino, poco inclinado, que pasa por el borde de un arroyo (dibujo 25) y éste tiene todavía menos caída, es decir que corre casi horizontalmente, nos parece muchas veces, que el arroyo, corre hacia arriba (dibujo 26). En este caso, también consideramos que nuestro camino tiene una orientación horizontal, porque nosotros tomamos la base encima de la cual nos encontramos, como la base para el juicio sobre la inclinación de las demás superficies" (Berstein).

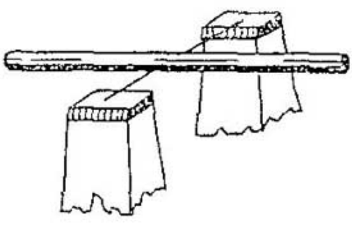


Fig. 27.—¿Conserva su equilibrio?

El experimento con la pértiga de hierro

Una pértiga de hierro taladrada en medio se encuentra sujeta a una delgada y sólida aguja, echada encima de dos pilares. La pértiga puede girar alrededor de esta aguja igual como alrededor de un eje horizontal (dibujo 27). ¿En qué posición se encuentra la pértiga cuando da vueltas?

Muchas veces se contesta que la pértiga siempre queda en posición horizontal "única posición en la cual conserva su equilibrio". Es difícil creer que la pértiga, apoyándola en el centro de su gravedad, conserva su equilibrio en *cualquier* posición.

¿Por qué la justa solución de este simple problema representa muchas inexactitudes? Porque generalmente tenemos ante nuestros ojos la experiencia de que un palo suspendido, y sostenido por el punto de en medio, se encuentra en posición horizontal. De ahí resulta la deducción rápida de que la pértiga apoyada sobre el eje, también puede conservar su equilibrio en posición horizontal.

Sin embargo, una cosa es el palo, en posición suspendida, y otra el de la pértiga apoyada que no se encuentra en las mismas condiciones. La pértiga taladrada obra encima de un eje; apuntalada exactamente en el centro de gravedad, y por

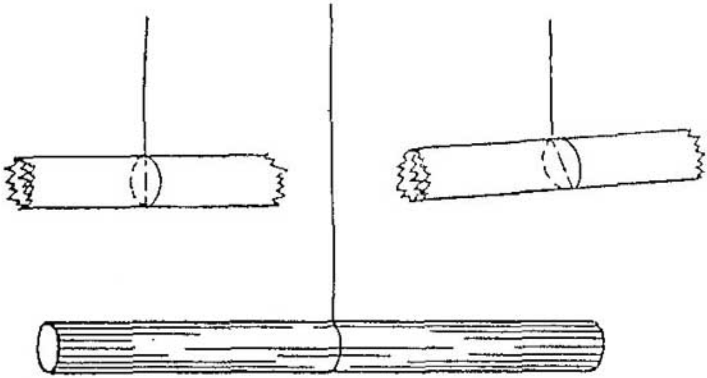
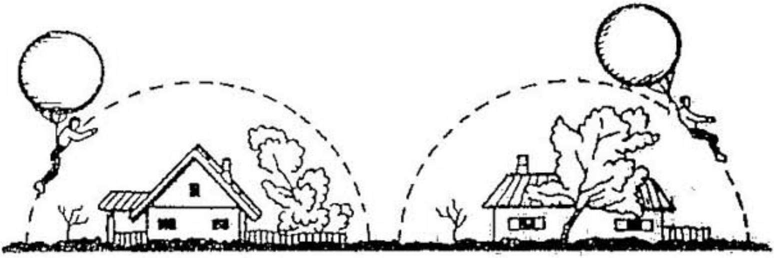


Fig. 28.

esto posee lo que nosotros llamamos un equilibrio uniforme. El palo suspendido en un hilo, está colgado no en el centro de la gravedad mismo, sino en un punto más *alto* que éste (dibujo 28). Un cuerpo suspendido de tal modo, se encuentra en estado de reposo únicamente cuando su centro de gravedad se encuentra en una misma línea con el punto de suspensión, es decir en posición horizontal del palo; en el caso de una inclinación, el centro de gravedad sale fuera de esta línea (dibujo 28). Este es el aspecto corriente que impide a muchos conformarse con el hecho de que la pértiga encima de un eje horizontal puede conservar su equilibrio también en una posición inclinada.



CAPITULO IV

LA CAIDA Y EL SALTO

Las botas de siete leguas

Las botas de los cuentos legendarios existen en la realidad en una forma original: dentro de una maleta de viaje de tamaño mediano, se encuentra la cubierta de un pequeño aerostato (balón de gas) y un aparato para la adquisición de hidrógeno y se hace un globo de aire de un diámetro de 5 metros. Atándose a este globo, el hombre puede dar un gran salto hacia lo alto y lo largo. El peligro en general de ser arrastrado hacia arriba no es grande en tal aeronave, porque la fuerza de ascensión del globo es siempre algo menor que el peso del hombre.

En el caso del arranque del globo estratosférico soviético URSS, que ganó el record mundial de altura, un tal balón ("Saltarín") prestó un gran servicio al Mando: ayudó a desenredar las cuerdas del globo estratosférico.

Es interesante calcular qué alturas puede alcanzar un deportista provisto con un buen globo "saltarín."

El peso del hombre debe exceder únicamente un kilogramo la fuerza de ascensión del globo. De otro modo expresado, si el hombre provisto con el globo, pesa un kilogramo, lo que es 60 veces menos que lo normal ¿entonces será posible realizar un brinco 60 veces mayor?

Veamos:

El hombre que está atado al balón arrastraría consigo hacia abajo, junto con el balón, una fuerza de 1,000 gramos y aproximadamente 1.000,000 de dinas. El peso del globo lleno, como es fácil de calcular, es aproximadamente igual a 20 kilogramos. Es decir, la fuerza de 1.000,000 de dinas obra sobre una masa de 20 + 60 = 80 kilogramos. La aceleración a, adquirida por la masa de 80 kilogramos debido a la fuerza de 1.000,000 de dinas es igual a:

$$a = \frac{f}{m} = \frac{1.000,000}{80,000} = \text{aproxima-}$$

damente 12 cm. por segundo.^{2}

El hombre en condiciones normales puede elevarse a una altura no mayor que 1 metro. Conforme a la rapidez inicial v nosotros recibimos de la fórmula $v^2 = 2\ gh$; $v^2 = 2 \times 980 \times 100$ centímetros por segundo^2 y de allí resulta $v =$ aproximadamente 440 centímetros por segundo.

Estando sujeto al globo, el cuerpo del hombre, durante el salto, alcanza tantas veces menos velocidad cuantas veces mayor es la masa del hombre junto con el globo en comparación a la simple masa del hombre. (Este es el resultado de la fórmula $ft = mv$; la fuerza f y la continuidad t, y sus efectos en ambos casos son los mismos; eso quiere decir que son también igual

Figura 29.—El balón saltarín y modo de transportarlo.

a la cantidad del movimiento mv; de allí resulta claramente, que la aceleración se disminuye al revés en proporción a la masa). Y así la aceleración principal en el caso del salto con el globo es igual a:

$$440 \times \frac{60}{80} = 300 \text{ centímetros por segundo.}$$

Ahora ya es fácil calcular la altura h del salto, con ayuda de la fórmula $v^2 = 2\,ah$:

$$330^2 = 2 \times 12 \times \mathrm{h}$$

de ahí resulta que

$$h = 4.500 \text{ centímetros} = 45 \text{ metros.}$$

Y así siendo el rendimiento máximo, que en condiciones ordinarias alcanza durante un salto el cuerpo humano, un metro, el hombre provisto de un globo logra un salto de una altura de 45 metros.

Es interesante calcular la duración de tal salto. El salto de altura de 45 metros con una aceleración de 12 centímetros por segundo en el segundo debe durar $\left(\text{fórmula } h = \frac{at^2}{2} \right)$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}} = \sqrt{\frac{9000}{12}} = 27 \text{ segundos.}$$

Para saltar hacia arriba y bajar después hacen falta por lo tanto 52 segundos.

Tales saltos lentos y por el aire están condicionados naturalmente por la insignificancia de su aceleración. Una sensación igual, en caso de saltos, podríamos lograr también sin balón saltando en cualquier astro, donde la aceleración de la gravedad sea relativamente más débil (60 veces menos) que en nuestro planeta.

Sería interesante hacer todavía otro cálculo para determinar la longitud de saltos más grandes. Para poder hacer un salto largo, el deportista debe dar una sacudida durante el salto, de varios ángulos en dirección horizontal. Así su cuerpo recibe una velocidad v (dibujo 30). Orientando esta velocidad en dos direcciones, la vertical v_1 y la horizontal v_2. Ellas son aproximadamente iguales

$$v_1 = v \sin alfa$$
$$v_2 = v \cos alfa$$

La velocidad v_1 es consumida por el tiempo t en segundos, por lo tanto

$$v_1 = at$$

y de allí resulta

$$t = \frac{a}{v_1}$$

Fig. 30.—¿Cómo vuela un cuerpo cuando se tuerce por un ángulo hacia el horizonte?

Esto quiere decir, que la duración del ascenso del cuerpo junto con el descenso es igual a:

$$2t = \frac{2v \sin alfa}{a}$$

La velocidad v_2 lleva al cuerpo a una posición igual a la horizontal durante todo el tiempo del intervalo, mientras que se mueve hacia arriba o hacia abajo. En este intervalo, el cuerpo es transportado por el espacio

$$S = 2v_2t = av \cos \text{alfa}. \frac{v \sin alfa}{a} = \frac{2v^2}{a} \sin alfa \cos alfa$$

$$= \frac{v^2 \sin 2\, alfa}{a}$$

Esto es también la longitud del salto.

Esta longitud es aun más grande, en caso de que el sin 2 $\alpha = 1$, ya que el *sino* no puede ser mayor a una unidad. De allí resulta que $2\ \alpha = 90$ grados, y que $\alpha = 45$ grados. Lo que quiere decir que, en caso de ausencia de contrariedades atmosféricas, el deportista hace un salto más largo cuando salta de la tierra en un ángulo igual al ángulo semirecto. El tamaño del salto mayor nosotros lo podemos averiguar, cuando en la fórmula

$$S = \frac{v^2 \sin 2\ \alpha}{2}$$

nosotros ponemos en lugar de $v = 330$ centímetros por segundo, sin 2 alfa $= 1$; $a = 12$ centímetros por segundo ².

$$S = \frac{330^2}{12} = 90 \text{ metros.}$$

El salto vertical es aproximadamente 45 metros y con un ángulo de 45 grados sobre la extensión de 90 metros, da la posibilidad de saltar por encima de una casa de varios pisos. [1]

Se puede adquirir una buena experiencia, en pequeña escala, si a un balón de aire para niños, se sujeta un deportista de papel, cuyo peso sea un poco mayor que la fuerza de ascensión del balón. Con un ligero impulso de la figura, ésta se eleva y baja después. Sin embargo, en este caso las dificultades del aire, juegan un papel más decisivo que en el caso del salto de un deportista auténtico.

El hombre bomba

"El hombre-bomba", un número muy atractivo de todos los programas de los circos, que se ejecuta en los últimos tiempos en muchas ciudades de Europa y América, fué estrenado en el circo de Moscú, en 1934 y después también en el circo de Leningrado. Consiste en que el artista se coloca dentro del tubo

[1] Conviene recordar que, en general, con una mayor extensión de la ascensión del cuerpo, agudizando el ángulo (45 grados) de la línea vertical, se logra casi una altura doble de ascenso, con la misma rapidez inicial.

de un cañón y es lanzado desde allí por medio de un tiro al aire, describiendo un arco alto y cayendo en una red a una distancia de 30 metros del cañón (dibujo 31). Un número análogo hemos visto también en la conocida película "El Circo", donde el artista parece volar desde el cañón hasta la cúpula del circo.

La palabra "el cañón tira", hace falta ponerla entre comillas, porque no se trata ni de un cañón auténtico, ni de un tiro verdadero. A pesar de que la boca del arma despide humo, el artista no es arrojado por las fuerzas de la explosión de la pólvora. El humo es producido únicamente para el efecto, para el engaño visual. De hecho, las fuerzas motrices son unos muelles que actúan al mismo tiempo que las fuerzas que despiden el

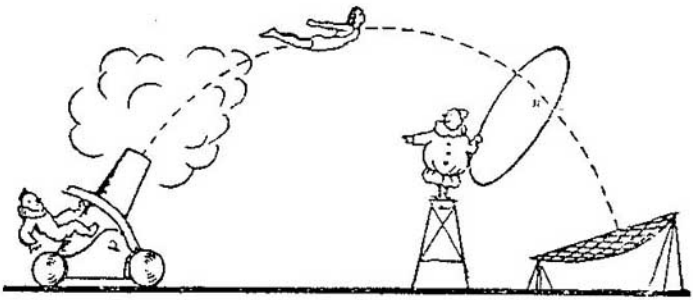


Fig. 31.—El hombre proyectil en el circo.

humo y el ruido, creando así la ilusión de que el hombre-bomba es tirado al aire por medio de una carga de pólvora.

En el dibujo 32 está expuesto el esquema del número de circo mencionado. Aquí se dice claramente con números, la ejecución del arte del "hombre-bomba" realizada por el artista Leinerton, que trabajó en los diversos circos de la URSS:

Pendiente del cañón	70 grados
Altura máxima del vuelo	19 metros
Longitud del tubo del cañón	6 metros

Para la Mecánica, son de gran interés las condiciones verdaderamente extraordinarias en que trabaja el artista durante la ejecución de este número. En el momento del tiro, su cuerpo se somete a una presión que es experimentada con una fuerza de gravedad aumentada. Después, durante el tiempo del vuelo libre, el artista, igual como cualquier cuerpo libre encogido, no pesa nada.

Al final, en el momento del descenso a la red, el artista se encuentra de nuevo bajo el efecto de una fuerza de gravedad aumentada. Los artistas extraordinariamente altos, son los que mejor han podido resistir estos cambios sin daño para su salud. Es interesante fijar con exactitud estas condiciones como muy valiosas para los futuros tripulantes de los vuelos que se emprenderán en las aeronaves cohetes hacia el espacio interplanetario y que tienen que sobrellevar bien todas estas sensaciones.

En la primera fase del movimiento del artista, que se encuentra todavía dentro del tubo del cañón, nos interesa la cantidad de gravedad artificial. Nosotros la podemos conocer, cuando calculamos la velocidad del cuerpo dentro del tubo del cañón. Para esto es siempre imprescindible conocer la marcha del cuerpo dentro del cañón, y también la velocidad adquirida al final de este camino. La longitud es conocida: 6 metros. La velocidad también puede ser calculada, sabiendo que es la misma que es necesaria para lanzar hacia arriba un cuerpo libre, que debe llegar a una altura máxima de 19 metros.

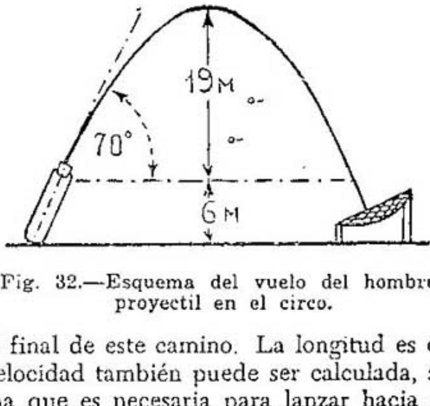


Fig. 32.—Esquema del vuelo del hombre-proyectil en el circo.

En el capítulo anterior hemos encontrado la fórmula:

$$t = \frac{v \sin \alpha}{a},$$

donde t es la duración de la ascensión hacia arriba, v es la velocidad inicial, *alfa* es ángulo en el cual se lanza el cuerpo y a es la aceleración. Además de esto conocemos la altura h de la ascensión hacia arriba.

Así por ejemplo:

$$h = \frac{gt^2}{2} = \frac{g}{2} \quad \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{g^2} = \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g}$$

de donde se puede calcular la velocidad v:

$$v = \frac{\sqrt{2gh}}{\sin \alpha}$$

El significado textual que tiene esta fórmula, lo debemos comprender del siguiente modo:
$g = 9{,}8$ metros por segundo ^{2}, *alfa* $= 70$ grados. Referente a la altura de la ascensión, que es visible en el dibujo 32, la debemos calcular igual a $25 - 6 = 19$ metros. Y por lo tanto la velocidad inquirida es

$$v = \frac{\sqrt{19{,}6 \times 19}}{0{,}94} = 20{,}6 \text{ metros.}$$

Con una tal velocidad el cuerpo del artista se aleja del cañón, y de ella se puede deducir la velocidad que tiene dentro del tubo del cañón. Aplicando la fórmula $v^2 = 2aS$, logramos el resultado

$$a = \frac{v^2}{2S} = \frac{20{,}6^2}{12} = 35 \text{ metros por segundo}^2$$

Nosotros hemos averiguado la velocidad con la cual se mueve el cuerpo del artista en el tubo del cañón, que es igual a 35 metros por segundo ^{2}, es decir 3½ mayor que la aceleración ordinaria de la fuerza de gravedad. Por esto, el artista se siente en el momento de ser tirado hacia fuera 4½ veces más pesado que normalmente: a su paso normal se debe agregar un peso artificial de 3½ veces. [1]

1 Esto no es completamente exacto porque la gravedad artificial actúa en un ángulo de 20 grados sobre la perpendicular, siendo la orientación normal completamente perpendicular. No obstante, esta diferencia no es grande.

¿Durante cuánto tiempo él siente la sensación de un peso reforzado?

$$\text{De la fórmula } S = \frac{at^2}{2} = \frac{at \times t}{2} = \frac{vt}{2} \text{ resulta que:}$$

$$6 = \frac{20{,}6 \times t}{2} \quad \text{de ahí se calcula que}$$

$$t = \frac{12}{20{,}6} = 0{,}6 \text{ segundos.}$$

Lo que quiere decir que el artista siente durante ½ segundo que su peso no es de 70 kilogramos sino de 300 kilogramos aproximadamente.

Pasaremos ahora a la segunda fase del número del circo, al vuelo libre del artista en el aire. Aquí nos interesa la duración del vuelo ¿durante cuánto tiempo el artista no siente peso ninguno?

En el capítulo anterior, hemos afirmado, que la duración de un vuelo semejante es igual a

$$\frac{2v \sin \alpha}{a}$$

Poniendo los números correspondientes a las letras, averiguamos que la duración inquirida es igual a

$$\frac{2 \times 20{,}6 \sin 70 \text{ grados}}{9{,}8} = 3{,}9 \text{ segundos.}$$

Estado que es completamente imposible prolongar, incluso hasta llegar a una duración de 4 segundos.

En la tercera fase del vuelo, encontramos, igual que en la primera fase, un aumento artificial de la gravedad y la continuación de este estado. Si la red se encuentra a la altura de la boca del cañón, entonces el artista desciende con la misma velocidad con la que comenzó su vuelo. Pero la red es extendida un poco más baja y por lo tanto la velocidad del artista será más grande; pero como la diferencia del peso es pequeña y no puede complicar nuestros cálculos, la podemos menospreciar. Supongamos por ejemplo, que el artista baja a la red con una velocidad de 20,6 metros por segundo, y según nuestras medidas la bajada a la red, emprendida por el artista es de 1,5 metros, entonces quiere indicar esto que la velocidad de 20,6 metros por segundo en un camino de 1,5 metros se transforma en un espacio de tiempo casi igual a cero. Pero según la fórmula

$v^2 = 2aS$, tenemos el cálculo de

$20{,}6^2 = 2a \times 1{,}5$, del que resulta la siguiente aceleración:

$$a = \frac{20{,}6^2}{2 \times 1{,}5} = 141 \text{ metros por segundo}^2$$

Nosotros sabemos que bajando a la red, el artista alcanza una velocidad de 141 metros en el segundo ^{2}, ésta es 14 veces mayor a la velocidad normal de la gravedad. Durante todo este tiempo el artista se siente 15 veces más pesado que su peso normal. Este estado extraordinario dura, sin embargo, en total

$$\frac{2 \times 1{,}5}{20{,}6} = \text{ es decir aproximadamente } 1/7 \text{ de segundo.}$$

Incluso el organismo más habituado de los cirqueros no sería capaz, sin grave daño de poder aguantar un refuerzo de la gravedad de 15 veces, si éste no se efectuara en un espacio de tiempo casi igual a cero. ¡Pues el hombre de un peso de 70 kilogramos alcanzaría en este caso un peso de toda una tonelada! Una sección prolongada de una tal sobrecarga debería aplastar al hombre, y en todo caso privarlo de la posibilidad de respirar, es decir los músculos no podrían "aguantar" el estado de gravedad de las células torácicas.

Record del lanzamiento de bala

Durante la espartaquiada coljosiana-sovjosiana en Jarkov, en el año 1934, la deportista Sinizkaya sentó un nuevo récord para la URSS en el lanzamiento de bala con dos manos: record de 73 metros 83 centímetros.

¿Hasta dónde deben lanzar la bala los deportistas de Leningrado, si quieren vencer este record?

Solución:

Podría decirse que la respuesta es sencilla: hace falta lanzar la bala nada más que un centímetro más lejos. A pesar de que a cualquier deportista le parecerá extraño, esta contestación no es justa. Si cualquier persona lanzase en Leningrado la bala incluso a una distancia de 5 centímetros más corta, esta persona —en caso de una apreciación exacta— debía ser considerada como que venció el récord de Sinizkaya.

Nuestro lector seguramente sospecha de qué se trata. La longitud del lanzamiento de bala depende de la aceleración de la fuerza de gravedad, y la gravedad es mayor en Leningrado que en Jarkov. Comparando los resultados en ambos puntos sin tener en cuenta la diferencia entre la tensión de la gravedad, se puede caer en un grave error: en Jarkov, la naturaleza ofrece a los deportistas condiciones más favorables que en Leningrado.

Entretengámonos algo en esta teoría. En caso de ausencia de resistencia de aire, los cuerpos, con ángulo *alfa* frente al horizonte y con una velocidad v, caen al espacio según la siguiente fórmula:

$$S = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{g}$$

La cantidad g de la aceleración de las fuerzas de gravedad es diferente en los diversos puntos y particularmente, por ejemplo, en latitudes iguales

Arcángel	(64°30')	....	982	centímetros	por	seg.^{2}
Leningrado	(60°)	....	981,9	,,	,,	,,
Jarkov	(50°)	....	981,1	,,	,,	,,
Cairo	(30°)	....	979,3	,,	,,	,,

De la fórmula indicada para la longitud del lanzamiento, es visible de que en condiciones casi iguales la distancia es contraria a la cantidad proporcional de g. Este cálculo extraño indica que el esfuerzo de la mano, que lanza la bala en Jarkov a 73 metros 92 centímetros, lleva esta misma bala en otros lugares, a las distancias siguientes:

En Arcángel	73,85 metros
En Leningrado	73,86 „
En El Cairo	74,05 „

Así para alcanzar en Leningrado el record de la deportista de Jarkov, de lanzar la bala a 73,92 metros, basta exceder la distancia de 73,86 metros.

Los deportistas de El Cairo, que repitieron el record de Jarkov quedaron en realidad por 12 centímetros atrás del record,

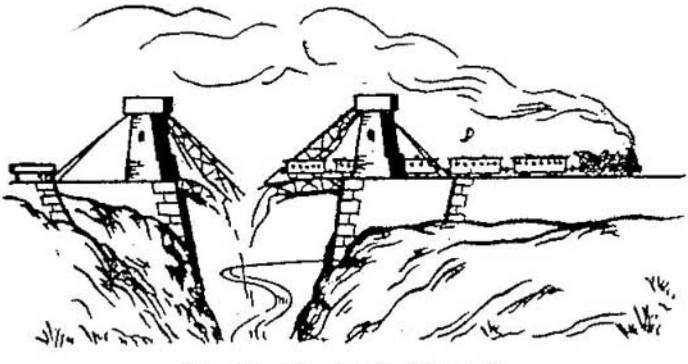


Fig. 33.—El episodio del puente.

mientras que los deportistas de Arcángel, que lanzaron la bala a una distancia 7 centímetros menos que la de Sinizkaya fueron los que verdaderamente batieron el record establecido.

El puente quebradizo

Un caso desconcertante es el que describe Julio Verne en su novela, *La vuelta al mundo en 80 días.* El puente colgante del ferrocarril en las Montaños Rocosas (América) estaba a punto de desplomarse por haberse averiado una viga. A pesar de ello, el maquinista valiente "un verdadero yanqui", decidió pasarlo con un tren de pasajeros.

"—¡Pero el puente puede hundirse!

"—Eso no tiene importancia. Si ponemos el tren a todo vapor, tenemos posibilidades de pasarlo.

"El tren avanzó con una velocidad increíble. Los émbolos hicieron 20 vueltas por segundo. Los ejes humeaban. El tren no tocaba los rieles literalmente. El peso fué abolido y transformado en velocidad... El puente fué pasado. El tren voló por encima de él de una orilla a la otra. Pero una vez que el tren pasó el río, el puente, con gran estrépito, se desplomó al agua."

¿Es inverosímil esta historia? ¿Es posible "sustituir" el peso por la velocidad? Nosotros sabemos que los terraplenes de los ferrocarriles sufren más con la marcha rápida de los trenes que con la marcha lenta; en trozos débiles del camino se recomienda, por lo tanto, marchar más lentamente. En el caso dado, la salvación fué sin embargo la velocidad de la marcha ¿es posible tal cosa?

Es probable que en el caso descrito pueda ser verosímil. En las condiciones conocidas el tren pudo haber traspasado la rotura, a pesar de que el puente se desmoronó después. Todo consiste en que el tren corre por el puente en un intervalo de tiempo pequeño. En un instante tan breve que el puente ni tiene tiempo para desmoronarse... Aquí hay el ejemplo de un cálculo. Las ruedas de un tren de pasajeros tienen un diámetro de 1,3 metros. "Veinte vueltas de émbolo en el segundo" dan 10 vueltas completas de una rueda en marcha, es decir 10 veces por $3{,}14 \times 1{,}3$. Esto significa una velocidad de 41 metros por segundo. El río seguramente no era muy ancho y la longitud del puente podría ser aproximadamente de 10 metros. Esto quiere decir, que con su velocidad acelarada el tren pasó el puente en ¼ de segundo. Si además el puente comenzaba solamente a destruirse con los primeros movimientos, entonces el paso de este trozo quebradizo en ¼ de segundo no fué mayor que

$$\frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 9{,}8 \times \frac{1}{16} = \text{aproximadamente } 0{,}3 \text{ metros}$$

es decir, 30 centímetros. El puente no se desplomó en ambos finales a la vez, sino que comenzó por aquel punto por el cual ya había pasado el tren. Cuando esta parte del puente comenzó a desmoronarse soltándose los primeros centímetros, el final opuesto guardó todavía contacto con la orilla y así el tren (en un tiempo muy breve) pudo quizás lograr alcanzar la orilla opuesta, en el espacio anterior al desmoronamiento de este final. En este sentido se debe comprender la observación del novelista "el peso fué vencido por la velocidad."

La cosa no verosímil del episodio consiste en algo diferente: "20 vueltas de émbolo por segundo" dan una velocidad de 150 kilómetros por hora. Una tal velocidad el tren no puede desarrollar en este tiempo.

Hace falta observar que jamás con ninguna fuerza fué ejecutado algo semejante a la hazaña de este maquinista americano; él se arriesgó a pasar velozmente por la parte quebradiza, la cual seguramente se habría desmoronado bajo el tren en caso de haberla atravesado con un movimiento lento.

Tres caminos

En una pared perpendicular está trazado un círculo (dibujo 34) cuyo diámetro es igual a 1 metro. De su punto más alto a lo largo de las cuerdas *AB* y *AC* va un pequeño canal. Desde el punto *A* se tiran simultáneamente tres bolitas de plomo: una de ellas corre libremente hacia abajo, las otras dos se deslizan (sin rodar) por el pulido canal. ¿Cuál de las tres bolitas de plomo es la que antes llega a la circunferencia?

Como el camino del canal *AC* es el más corto, se podía pensar que pasando por él, la bolita de plomo alcanzaría antes que las demás la circunferencia. El segundo lugar en esta disputa, aparentemente, debería ocupar la bolita que pasa por el canal *A B;* y al fin, como última, alcanzaría la circunferencia aquella bolita que cayera verticalmente.

La experiencia descubre la inexactitud de estas conclusiones: todas las bolitas alcanzan la circunferencia al mismo tiempo.

La causa consiste en que todas las bolitas se mueven con una velocidad diferente: la que se mueve con más rapidez, es la que cae libremente, y de las otras dos que se deslizan por los canales, la que más rápidamente corre, es la que va por un camino más inclinado. La bolita que va por el camino más largo, es, como hemos visto, la que se mueve con más rapidez y se puede afirmar, que la ventaja de la mayor velocidad es justamente equivalente a la pérdida evidente que significa el camino más largo.

En este caso la duración t de la caída por la línea vertical AD (sin tener en cuenta las contradicciones del aire) es definida por la fórmula

$$AD = \frac{gt^2}{2},$$

de allí resulta

$$t = \sqrt{\frac{2AD}{g}}$$

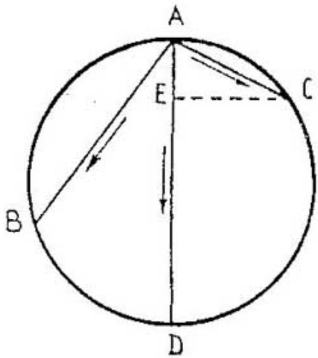


Fig. 34.—El problema de los tres caminos.

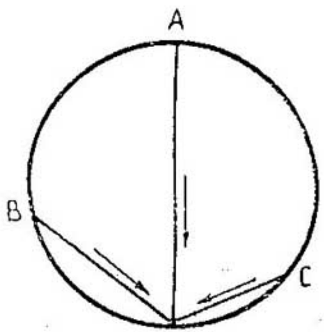


Fig. 35.—El problema de Galileo.

La duración t_1 del movimiento por el canal, por ejemplo en caso de AC es igual a

$$t_1 = \sqrt{\frac{2AC}{a}}$$

donde a es la aceleración del movimiento por la línea inclinada AC, pero es fácil de fijar que:

$$\frac{a}{g} = \frac{AE}{AC}; \text{ y } a = \frac{AE \cdot g}{AC}$$

El dibujo 34 indica que

$$\frac{AE}{AC} = \frac{AC}{AD}$$

y por consiguiente

$$a = \frac{AC}{AD} \cdot g$$

Esto quiere decir

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot AC}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot AC \cdot AD}{AC \cdot g}} = \sqrt{\frac{2AD}{g}} = t$$

Y, así $t = t_1$, es decir la duración del movimiento por el canal y por el diámetro es la misma. Esto se refiere naturalmente, no sólo a AC, sino también a cualquier canal en general, que salga del punto a.

Todo el problema es posible plantearlo también en otra forma. Tres cuerpos se mueven debido a sus fuerzas de gravedad por las líneas AD, BD y CD, que se encuentran dentro de un círculo vertical (dibujo 35). El movimiento comienza simultáneamente desde los puntos A, B, y C. ¿Qué cuerpo es él que alcanza el punto D?

E lector sin dificultad, ahora afirmará independientemente, que los cuerpos deben alcanzar el punto D al mismo tiempo.

Este problema que hemos visto, fué expuesto y resuelto por Galileo en su libro *Conversaciones sobre dos nuevas ramas de la ciencia*, donde se expone por vez primera la ley de la caída de los cuerpos.

En esta obra encontramos la teoría indicada, formulada por Galileo, del siguiente modo: "Si desde el punto más alto del círculo, en dirección horizontal, se trazan diferentes planos inclinados, que llegan hasta la circunferencia, el tiempo de la caída de los cuerpos que se deslizan sobre los planos es siempre el mismo."

El ensayo sobre las cuatro piedras

Desde la cumbre de una torre muy alta se tiran con la misma velocidad 4 piedras, una perpendicularmente hacia arriba; la segunda, perpendicularmente hacia abajo; la tercera, horizontalmente a la derecha y la cuarta, horizontalmente a la izquierda.

¿Qué forma tiene el rectángulo, alrededor de la torre, que forman las piedras durante su caída? La resistencia del aire no ha sido incluída en este cálculo.

La mayoría comienza la solución de esta tarea con el pensamiento, de que las piedras, que caen, deben repartirse por la torre en forma de cuadrilátero, forma que recuerda la figura de un cometa de papel. Se piensa así: la piedra que se tira hacia arriba, se aleja más lenta del punto de partida, que la piedra que es tirada hacia abajo; las piedras tiradas hacia los lados caen por líneas curvas con una velocidad media. En este caso se descuida el pensar con qué velocidad bajaría el punto central de la figura geométrica que se forma.

Es fácil lograr una solución exacta, haciendo el siguiente cálculo: Teniendo en cuenta lo que hemos afirmado en el comienzo del capítulo, que la gravedad no es absoluta. En este caso, es cierto, que las piedras tiradas fueron colocadas siempre en la punta de un cuadrado. Pero ¿qué se cambia si nosotros introducimos la acción de la gravedad? En un medio, sin contracciones, todos los cuerpos caen con la misma velocidad. Por esto nuestras cuatro piedras caen bajo la acción de la fuerza de gravedad en la misma distancia, es decir: el cuadrado se transfiere paralelo a sí mismo y conserva la figura de un cuadrado.

Así las piedras que caen, se colocan en forma de un cuadrado.

Al problema ahora observado, agregamos:

El ensayo de las dos piedras

De la cumbre de una torre, como en el caso anterior, nosotros lanzamos 2 piedras con una velocidad de tres metros por segundo: una piedra en dirección perpendicular hacia arriba y la otra perpendicularmente hacia abajo. ¿A qué velocidad se aleja una de la otra? La resistencia del aire queda excluída.

Calculando, como en los casos anteriores, fácilmente encontramos la salida exacta: las piedras se alejan una de la otra a una velocidad de 3 + 3, es decir 6 metros por segundo. La velocidad de la caída no tiene en este caso, como no es extraño, ninguna importancia: la respuesta es la misma para cualquier cuerpo celeste –para la Tierra, la Luna, Júpiter, etc.

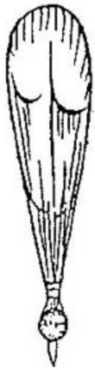
El jugador lanza la pelota a su compañero de juego, que se encuentra a una distancia de 28 metros de él. La pelota vuela cuatro segundos. ¿Cuál es la mayor altura que alcanza esta pelota?

La pelota se mueve durante 4 segundos, ejecutando al mismo tiempo un desplazamiento en dirección horizontal y vertical. Es decir, para el ascenso y otra vez para el descenso, la pelota empleó 4 segundos, de ellos, 2 segundos para el ascenso y otros 2 para el descenso (en los manuales sobre mecánica se demuestra que la duración del ascenso es igual a la duración del descenso). Por lo tanto, la pelota está lanzada a una altura de:

$$S = \frac{g\,t^2}{2} = \frac{9{,}8 \times 2^2}{2} = 19{,}6 \text{ metros.}$$

Así, la máxima altura de la pelota fué aproximadamente 20 metros. La distancia indicada entre los jugadores (28 metros) no hacía falta emplearla para lograr este cálculo.

En caso de una velocidad tan reducida se puede menospreciar la resistencia del aire.



CAPITULO V

EL MOVIMIENTO ROTATIVO

Medio sencillo para moverse en torno a sí mismo

Muchas veces sentimos el fuerte deseo de "movernos alrededor nuestro". Si se tratase únicamente de este deseo, que es fácil de satisfacer, bastaría sentarse en una montaña rusa o en un aparato con caballitos, que da vueltas, engañándose uno mismo debido a las vueltas del lugar en que nos encontramos.

Girando encima de los caballitos y dentro de una montaña rusa, de un modo muy natural y sin sospechar que está uno sentado encima de un aparato, las personas literalmente se mueven alrededor de sí mismas. Un cálculo no muy complicado nos indica además la cantidad de las vueltas.

MN (dibujo 36) es aquel eje, alrededor del cual giran las carretillas de estos aparatos. Cuando toda la maquinaria de este aparato gira, las carretillas que están suspendidas a ella, tienden, junto con sus ocupantes, a moverse por inercia en dirección tangente y, por lo tanto, a alejarse del eje, y ocupar una posición inclinada, indicada en el dibujo 36. El peso P del ocupante se reparte debido a esto sobre dos fuerzas: una fuerza, la fuerza R con una orientación horizontal frente al eje, que se llama por lo tanto fuerza centrífuga, es la que sostiene el movimiento circular; la otra fuerza K es orientada a lo largo de la cuerda y comprime el viajero contra la carretilla; ella es apreciada por el viajero como un peso que obra sobre él. Este peso nuevo,

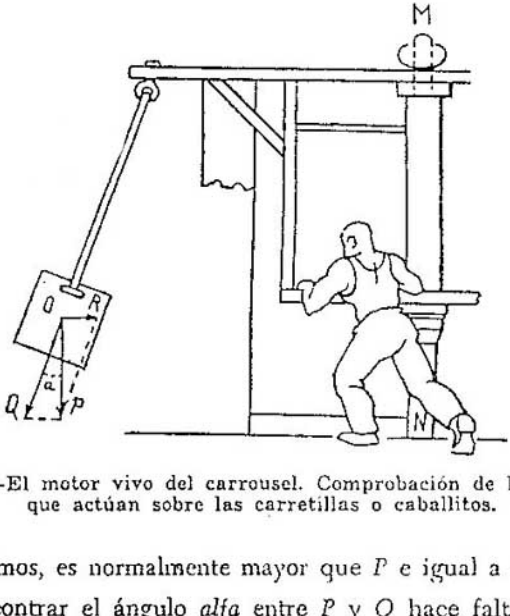


Fig. 36.—El motor vivo del carrousel. Comprobación de las fuerzas que actúan sobre las carretillas o caballitos.

como vemos, es normalmente mayor que P e igual a $\dfrac{P}{cos\ alfa}$ Para encontrar el ángulo *alfa* entre P y Q hace falta saber la cantidad de la fuerza R. Esta fuerza es centrífuga; por lo tanto, ella engendra su propia aceleración:

$$a = \frac{v^2}{r}$$

donde v, es la velocidad circular de la carretilla por segundo y r es el radio del movimiento rotativo; esto quiere decir que el auténtico centro de gravedad de la carretilla depende del eje MN. Como la extensión es igual a 6 metros y el número de giros del aparato es igual a 4 vueltas por minuto, la carretilla realiza en un segundo 1/15 de media vuelta. De allí podemos calcular la velocidad circular

$$v = \frac{1}{15} \times 2 \times 3{,}14 \times 6 = 2{,}5 \text{ metros por segundo.}$$

Ahora buscaremos la cantidad de la aceleración, engendrada en la fuerza R:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{250^2}{600} = 104 \text{ centímetros por segundo}^2.$$

Y la fuerza proporcional de la aceleración es igual a

$$tg\ \alpha = \frac{104}{980} = 0{,}1;\ \alpha = 7^\circ.$$

Anteriormente hemos expuesto que el peso nuevo

$$Q = \frac{P}{\cos \alpha}$$

Esto significa que

$$Q = \frac{P}{\cos 7^\circ} = \frac{P}{0{,}994} = 1{,}006\ \mathrm{P}.$$

Si un enfermo en condiciones normales pesaba 60 kilos, entonces ahora debe añadir a su peso 360 gramos. Pero es al mismo tiempo comprensible que este aumento no mejora en nada su estado de salud, dando vueltas en un aparato de caballitos o en una montaña rusa, nadie se siente más sano, que estando encima de la tierra que no se mueve.

Si en el caso de un aparato giratorio ordinario, comparativamente lento, el aumento del peso es poco sensible, en el caso de aparatos rápidos centrífugos de un radio pequeño, esta agravación del peso puede conducir en algunos casos a un aumento enorme. En algunos laboratorios americanos se usan aparatos de esta clase, los llamados "ultracentrífugos", cuya parte giratoria da 80,000 vueltas por minuto. ¡Con ayuda de estos aparatos se alcanza un aumento de peso de ¼ de millón de veces! Cada gotita minúscula de un líquido, que se encuentra en este aparato, y cuyo peso normal es de 1 miligramo, se transforma en un cuerpo con un peso de ¼ de kilogramo.

Ahora, es cierto, que estos líquidos pueden ser fijados y colocados para encontrar sus cualidades, aumentando no sólo su peso, sino también su masa.

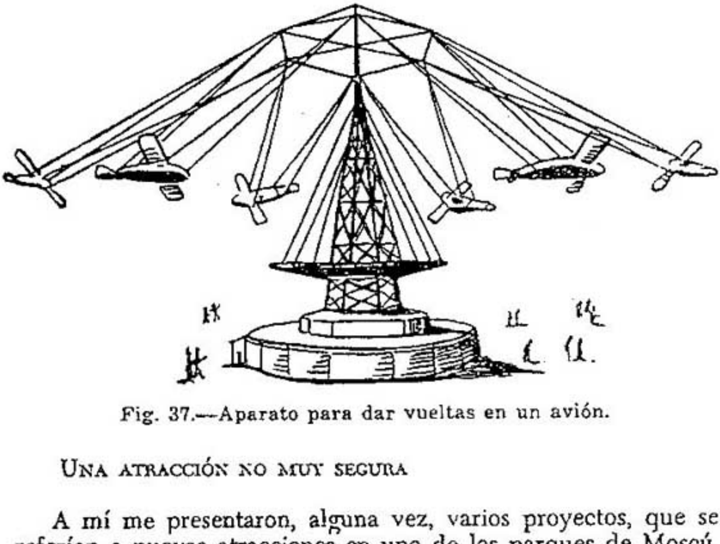


Fig. 37.—Aparato para dar vueltas en un avión.

Una atracción no muy segura

A mí me presentaron, alguna vez, varios proyectos, que se referían a nuevas atracciones en uno de los parques de Moscú, para dar mi consejo sobre ellas. El proyecto representaba una especie de "poste gigante" en cuyo extremo estaban colocadas unas cuerdas (o varas) con el propósito de atar en ellas una especie de aeroplanos de juguete. A una veloz rotación de las cuerdas, los aeroplanos con los viajeros sentados en ellos, deberían quedar suspendidos en el aire y llevados hacia arriba. Los constructores habían hecho este aparato de tal modo, que las cuerdas o varas se extendían completamente horizontales.

Tuve que desilusionarlos porque su fe sobre que el viajero sano no pudiera pasar ningún peligro, debido a que la cuerda era bastante larga para cubrir una gran pendiente, era falsa. El aumento ilimitado de la subida de las cuerdas desde la posición vertical es fácil de calcular, partiendo de que el organismo del hombre puede sufrir, sin daño, un triple aumento de la gravedad.

Aquí nos sirve el dibujo 36, de que nosotros hemos utilizado en el artículo anterior. Nosotros deseamos que la gravedad artificial Q aumente el peso natural P no más que tres veces, lo que quiere decir en el caso dado

$$\frac{Q}{P} = 3$$

pero si

$$\frac{Q}{P} = \frac{1}{\cos \alpha};$$

se deduce que

$$\frac{1}{\cos \alpha} = 3, \text{ y que } \cos \alpha = {}^1/_3 = 0{,}33,$$

y de ahí resulta que

$$\alpha = \text{aproximadamente } 71^\circ.$$

Y por lo tanto, la cuerda no debe inclinarse de la posición normal por más de 71 grados, y de ahí resulta que ella no puede acercarse a la posición horizontal más cerca que en 19 grados.

La figura 37 indica tales tipos de atracciones que existen en algunas ciudades de América. Se observará que la pendiente de la cuerda no alcanza en estos casos sus límites.

En la curva de la vía del ferrocarril

"Sentado en un vagón de un tren que corre por una curva –cuenta el físico E. Mach–, yo observaré repentinamente, que los pueblos, las casas, las chimeneas de las fábricas cerca de la vía adoptaron una posición inclinada."

Un fenómeno parecido sienten muchas veces los viajeros de los trenes rápidos, que marchan hacia el Occidente, porque en estos trechos una velocidad de 100 kilómetros por hora no es una cosa extraña.

No es posible considerar como causa de esto el que los rieles exteriores en las curvas, suben más hacia arriba que los interiores y que, por consiguiente, el vagón marcha, mientras dura la curva, en una posición algo inclinada. Si nosotros nos inclinamos fuera de la ventanilla y observamos los alrededores, no dentro de un marco cerrado, esta ilusión desaparece.

Después de lo dicho en los artículos anteriores, apenas es necesario indicar las verdaderas causas de este fenómeno. El lector ya adivina, seguramente, que la perpendicular que esté colgada en el vagón, debe indicar la posición inclinada justamente en aquel momento en el cual el tren se encuentra en la curva. Esta nueva línea vertical substituye para el viajero la antigua, y la que anteriormente era perpendicular, es ahora curva para el viajero.

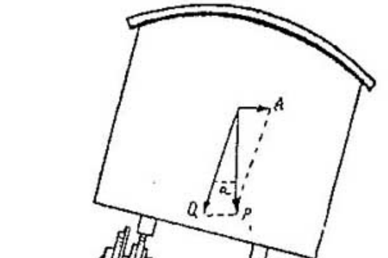


Fig. 38.—¿Qué fuerzas actúan sobre el vagón que avanza por una curva? Inclinación de los peraltes del ferrocarril.

La nueva orientación de la línea perpedicular es fácil de definir por el dibujo 38. En él, la letra P indica la fuerza de gravedad, y la letra R la fuerza centrífuga. Formándose la orientación Q, que cambia la fuerza de gravedad para el viajero, todos los cuerpos dentro del vagón caerán en esta dirección. El tamaño del ángulo a de la inclinación de la dirección perpendicular, depende de la ecuación:

$$tg\, a = \frac{R}{P}$$

[1] Así debido a la rotación de la tierra y al hecho que la superficie terrestre se mueve como un arco, la perpendicular en la "tierra firme" no está orientada extrictamente hacia el centro de nuestro planeta, sino se desvía de éste, con un ángulo no muy grande (en la latitud de Leningrado este ángulo es de 4'; en el paralelo 45 este ángulo tiene un tamaño mucho mayor; en los polos y en el ecuador no existe inclinación).

Y como la fuerza R es proporcional a $\frac{v^2}{r}$, donde v es la velocidad del tren, y r el radio de la vuelta de la curva; y la fuerza P es proporcional a la aceleración de la gravedad g, entonces

$$tg\,\alpha = \frac{v^2}{r} : g = \frac{v^2}{rg}$$

Siendo la velocidad del tren 18 minutos por segundo (65 kilómetros por hora) y el radio de la vuelta = 600 metros, entonces

$$tg\,\alpha = \frac{18^2}{600 \times 9{,}8} = 0{,}055$$

y de ahí resulta que

$$\alpha = \text{aproximadamente a } 3^\circ.$$

Esta orientación imaginariamente[1] perpendicular, nosotros la consideramos inevitablemente como auténticamente perpendicular y así los fenómenos que en realidad son perpendiculares nos parecen inclinados a 3 grados. En la línea del ferrocarril, cerca de la montaña de San Gotard, el camino está lleno de innumerables trozos curvos, y el pasajero ve toda la naturaleza y los alrededores que son perpendiculares, inclinados con una pendiente de 10 grados.

Para que el vagón en la curva pueda quedarse en equilibrio, hace falta que los rieles exteriores del camino curvo sean más altos que los interiores, elevándose por encima de éstos a una altura que corresponda a las nuevas condiciones de la línea horizontal. Por ejemplo, para el caso de la curva, ahora observado, los rieles exteriores A (dibujo 38) deben ser levantados, a una tal altura h para que

$$\frac{h}{AB} = \sin \alpha.$$

AB, la anchura del carro, es aproximadamente igual a 1,5 metros; sin α = sin 3 grados = a 0,052. Lo que quiere decir:

$$h = AB \sin \alpha = 1{,}500 \times 0{,}052 \approx 80 \text{ milímetros.}$$

1 Exactamente expresado, "temporalmente perpendicular" para el observador actual.

Los rieles exteriores deben ser puestos 80 milímetros más altos que los interiores. Es fácil de comprender que esta elevación corresponde únicamente a una velocidad relativa, pero no es posible cambiar esta velocidad relativa del tren; en los casos de la construcción de curvas hace falta tener en cuenta algunas transformaciones de la velocidad del movimiento.

Caminos no aptos para los peatones

Encontrándome en la parte curva de la línea de los ferrocarriles, he podido apenas observar que los rieles exteriores se encuentran aquí algo más altos que los interiores. Otra cosa es el camino para las bicicletas en el velódromo: la curva tiene en estos casos casi siempre un radio mucho menor, la velocidad sin embargo es bastante alta, y así el ángulo de la inclinación tiene una importancia mucho mayor. En caso de una velocidad, por ejemplo de 72 kilómetros por hora (20 metros por segundo) y de un radio de 100 metros, el ángulo de la inclinación se define de la ecuación:

$$tg\,\alpha = \frac{v^2}{rg} = \frac{400}{100 \times 9{,}8} = 0{,}4,$$

de allí que resulta que

$$\alpha = 22 \textit{ grados}.$$

En un camino semejante el peatón, al parecer, no puede sostenerse. Mientras que el ciclista sólo en un tal camino puede sentirse completamente seguro. ¡Paradoja interesante de la gravedad! Así fueron construidos también caminos especiales para carreras de automóviles.

En los circos se suele ver no raras veces trucos todavía más paradójicos a primera vista, y que, sin embargo, están en completo acuerdo con las leyes de la mecánica. El ciclista en el circo se mueve dentro de un embudo (dentro de una cesta) cuyo radio es a veces de 5 o menos metros, con una velocidad de 10 metros por segundo, en este caso la inclinación de las paredes del embudo deben ser muy curvas:

$$tg\,\alpha = \frac{10^2}{5 \times 9{,}8} = 2$$

de allí resulta que

$$\alpha = 63 \text{ grados}$$

A los expectadores les parece que únicamente la extraordinaria habilidad y el gran arte ayudan al artista a realizar tales azañas en condiciones no naturales, mientras que en realidad para la velocidad dada se trata no de condiciones extraordinarias, sino de las más apropiadas.

Tierra que se levanta

Ante el que ha tenido la ocasión de ver qué curva tiene que realizar el avión, que quiere describir un lazo horizontal (haciendo "virutas") surge naturalmente la idea sobre las precauciones serias, que ha de tomar el aviador para no caer disparado de su aparato. En realidad, sin embargo, el aviador incluso ni siente que la máquina hace los lazos, para él la máquina se mueve en el aire horizontalmente. Pero, sin embargo, él siente algunas otras cosas: primero, percibe el reforzamiento de la gravedad; segundo, ve cómo se levantan hacia él todos los lugares que observa.

Hacemos por ejemplo un cálculo, a qué ángulo se puede elevar la superficie horizontal de la tierra para el aviador que

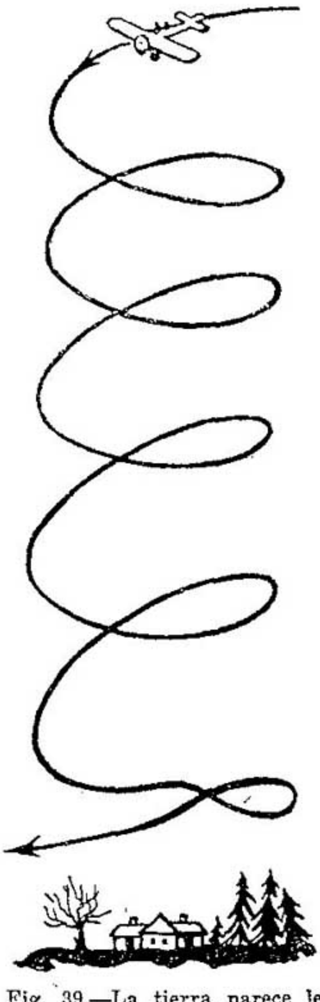


Fig. 39.—La tierra parece levantarse cuando el aviador "riza el rizo".

da estas vueltas, y qué altura debe alcanzar para corresponder a su gravedad aumentada.

En general, podemos deducir de los datos que existen, que el aviador para una velocidad de 216 kilómetros por hora (60 metros por segundo) describe una línea con lazos de un diámetro de 140 metros (dibujo 39). El ángulo *alfa* de la ·clinación puede ser encontrado en la ecuación:

$$tg\ a = \frac{v^2}{rg} = \frac{60^2}{70 \times 9{,}8} = 5{,}2,$$

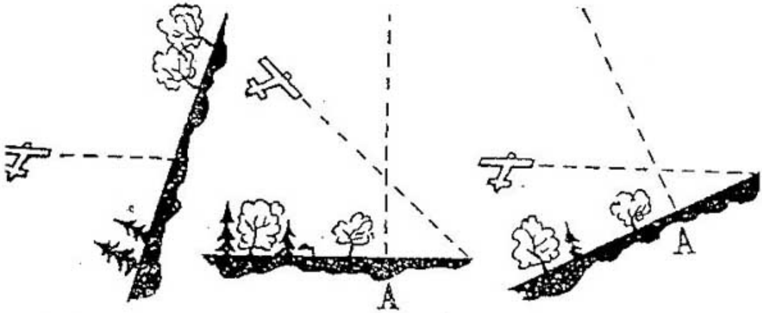


Fig. 40.—Lo que ve el aviador de la Fig. 39 durante el descenso.
Fig. 41.—El aviador vuela con una inclinación de un radio de 520 metros y una velocidad de 190 Kms.
Fig. 42.—Lo que sucede al aviador de la Fig. 41.

de allí resulta que $a = 79$ grados. Teóricamente la tierra para un tal aviador no sólo se ha "levantado" sino parece casi "vertical", porque ella se eleva de la perpendicular en un total de 11 grados.

En la práctica, debido, probablemente, a causas fisiológicas, la tierra parece en condición semejante volteada no en 70 grados sino en 69 grados (véase dibujo 40).

En cuanto a la gravedad reforzada en relación a su equilibrio natural (dibujo 38), ésta es igual al coseno del ángulo entre sus direcciones. La tangente de un tal ángulo es igual a

$$\frac{v^2}{r} : g = 5{,}2.$$

Por medio de la tabla encontramos el coseno correspondiente (0,19) y su tamaño inverso = 5,3.

Esto quiere decir, que el aviador que ejecuta tales virajes, está prensado 6 veces más fuerte contra el asiento que en caso de un camino recto, es decir, él se siente con una gravedad simulada de 6 veces mayor.

El aumento artificial del peso puede ser fatal para el aviador. Son conocidos casos en los cuales el aviador, que efectúa con su aparato los llamados "tirabuzones" (caídas en espirales muy redondas y de un radio muy pequeño) no sólo ya no es capaz de levantarse de su lugar, sino incluso es incapaz de hacer un simple movimiento con la mano. ¡El cálculo indica, que el cuerpo ha adquirido una gravedad 8 veces mayor! Sólo con una concentración de todas las fuerzas es posible que el aviador se salve de la perdición.

¿Por qué se tuercen los ríos?

Desde hace mucho es conocida la inclinación natural de los ríos de torcerse de manera semejante a una serpiente que se arrastra por el suelo. No se debe pensar que las desviaciones de los ríos siempre están condicionadas por los relieves del te-

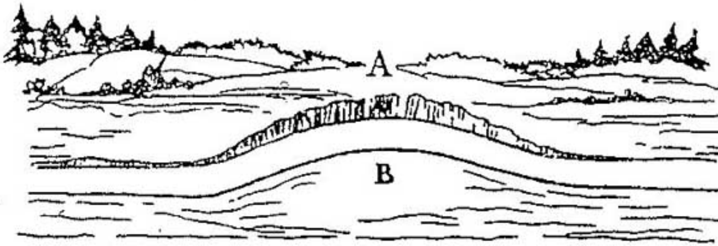


Fig. 43.—La pequeña desviación del río tiende a crecer constantemente.

rreno. El paisaje puede ser completamente llano y de todos los modos los ríos se desvían. Esto es bastante enigmático: hace falta decir, que en tales lugares sería natural que los ríos tomasen una dirección recta.

Una observación más detallada revelaría, sin embargo, cosas sorprendentes: la dirección recta incluso para los ríos que corren por paisajes llanos, es la llamada estable y por esto también la más probable. Sin embargo, la conservación de la línea recta del curso de un río es posible sólo en condiciones ideales, que en la realidad no existen nunca.

Son concebibles ríos que corren sobre un suelo aproximadamente homogéneo rigurosamente rectilíneo. Pero podemos demostrar que una tal corriente no puede durar mucho. Por causas eventuales –por ejemplo, falta de homogeneidad del suelo– la corriente del río, en cualquier lugar, se tuerce. ¿Y qué

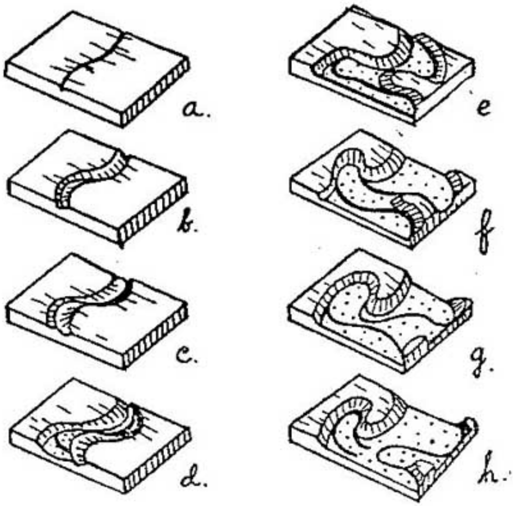


Fig. 44.—Cómo aumenta constantemente por sí misma la sinuosidad del lecho de los ríos.

sucede después? ¿Corrige el río mismo su corriente? No, la desviación crece. En el lugar de la desviación del agua (dibujo 43), que se mueve de forma curvilínea, y que, debido al afecto centrífugo, es prensada contra la orilla cóncava *A*, la socava y al mismo tiempo retrocede de la orilla convexa *B*. Para la rectificación del curso del río es necesario lo contrario: la presión contra la orilla convexa y el retroceso de la orilla cóncava. La concavidad se forma por la socavación y crece, y junto con esto se aumenta también la fuerza centrífuga, que, por su parte, refuerza la socavación de la orilla cóncava. Como se ve, esta fuerza es suficiente para formar una curva, incluso en los pliegues más insignificantes, y esta curva crecerá irresistiblemente.

Poco a poco, el nivel del río en la orilla cóncava, contra la cual se prensa el agua, es más alto que en el lado convexo, (después de lo expuesto en los artículos anteriores el lector comprende, naturalmente, el por qué) por esto en el fondo de los ríos surge una corriente de agua en dirección transversal —de la orilla cóncava hacia la orilla convexa— pero arriba parece lo contrario: de la convexa hacia la cóncava. La corriente transversal transfiere los productos de la destrucción de la orilla cóncava a la convexa, y allí ellos se asientan. Por esto la orilla convexa queda inclinada (aun más convexa) y la cóncava queda abrupta.

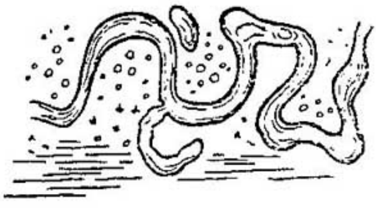
Y como las circunstancias accidentales, que conducen fácilmente a los ríos a sus primeras desviaciones, son casi inevitables, es también irremediable la formación de las curvaturas, que crece continuamente y que produce en los ríos, después de grandes intervalos de tiempo, su tortuosidad característica. Estas plegaduras llevan la denominación de "meandros", del río Meandro (de la parte occidental de la Asia Menor), cuya corriente tortuosa consternó a los pobladores de la Antigüedad, transformando el nombre del río en un nombre apelativo.

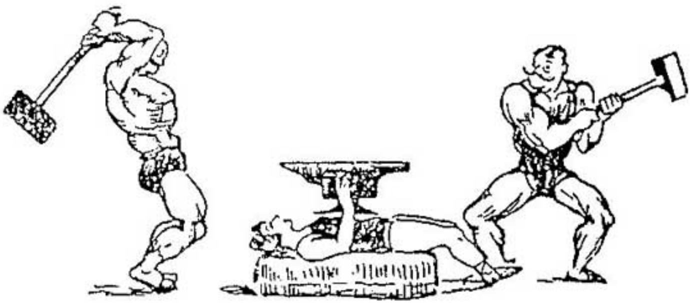
Es interesante seguir la continuación del destino de las desviaciones de los ríos. El cambio sucesivo de la apariencia del lecho de los ríos es expresado de un modo sencillo en el dibujo 44 *a* – *h*. En el dibujo 44 *a* vemos ante nosotros únicamente un río encorvado, en el siguiente dibujo 44 *b* la corriente logra ya socavar la orilla cóncava y ya hay algunos índices de la inclinación de la orilla convexa. En el dibujo 44 *c* el fondo del río tiene ya mayor anchura, y en el dibujo 44 *d* el lecho del río se convierte en un ancho valle, en el cual las aguas del río ocupan únicamente una parte muy pequeña. En el dibujo 44 *e*, *f* y *g* el desarrollo del valle del río es tan amplio, que aparece casi un nudo. Por fin en el dibujo 44 *h* ustedes ven cómo el río taladra su camino en el lugar de la aproximación de las partes tortuosas de la corriente y cava allí su lecho, dejando la parte cóncava del valle corroído como un lecho viejo, llamado "brazo muerto" con agua estancada en las partes más apartadas del lecho.

El lector mismo habrá adivinado por qué el río en su valle ampliamente elaborado no corre igual, o a lo largo de un solo borde, sino se lanza todo el tiempo de un borde hacia el otro, del cóncavo hacia el convexo y viceversa.[1]

Así rige la mecánica los destinos geológicos de los ríos. El aspecto esbozado ante nosotros, se efectúa naturalmente, en dimensiones de grandes espacios de tiempo, que se extienden sobre miles de años. Sin embargo, un fenómeno, en muchos detalles, semejante a lo anterior mencionado, se puede observar en pequeño, en cada primavera, si se vigila en este sentido los pequeños riachuelos por los cuales corre el agua deshelada en la nieve endurecida.

1 Nosotros no hemos dicho aquí absolutamente nada sobre la acción del movimiento giratorio de la Tierra, que provoca el hecho, que los ríos del hemisferio norte corren más fuertemente sus riberas derechas, y los hemisferios sur sus riberas izquierdas. Sobre esto véase mi libro "Astronomía animada".





CAPITULO VI

EL CHOQUE

En busca de lo más sencillo

Aquella parte de la Mecánica que trata sobre las leyes del choque de los cuerpos, no goza de la simpatía general de los alumnos. Ella es asimilada lentamente y olvidada rápidamente quedando de ella un mal recuerdo, como queda el montón de las fórmulas difíciles. A pesar de esto, el choque merece una gran atención. Pues hace cincuenta años la colisión de los cuerpos fue considerada como el único fenómeno comprensible de todos los fenómenos físicos que se efectúan en el mundo; y es cierto que ha sido reconocido como el único fenómeno que no necesitaba una aclaración, así como del choque de dos cuerpos se intentó explicar todos los demás fenómenos de la naturaleza.

Todavía Cuvier, uno de los más destacados naturalistas del siglo XIX, escribió: "Exceptuaando el choque, no podemos formarnos una idea clara sobre las relaciones entre causa y efecto". Los fenómenos fueron considerados explicables solamente cuando sus causas podían ser deducidas de la colisión de las moléculas.

Ciertamente que la tendencia de explicar el mundo, partiendo de su comienzo no ha sido coronada por el éxito; una gran serie de fenómenos —eléctricos, ópticos, de gravitación— no resisten tal explicación. Sin duda, todavía hoy, el choque de los cuerpos juega un papel importante para la explicación de los fenómenos de la naturaleza. Recordamos la teoría cinética de los gases, la cual observa al extenso círculo de los fenómenos como un movimiento desordenado de múltiples moléculas que chocan continuamente. A más de esto nos encontramos, en la vida cotidiana, a cada paso, con cuerpos que chocan. No es posible avanzar sin un conocimiento de esta sección de la Mecánica.

La mecánica del choque

Entender la mecánica del choque de los cuerpos, significa poder prever cuál será la velocidad de los cuerpos que chocan, después de su encuentro. Esta velocidad definida depende de que los cuerpos se precipiten uno sobre otro de modo no elástico (sin rebote) o de modo elástico.

En caso de cuerpos sin elasticidad, los cuerpos que chocan adquieren, después del choque, una velocidad uniforme, la cual se puede calcular de la masa de los cuerpos y de su velocidad primitiva, según la mezcla adecuada.

Si se mezcla 3 kilogramos de café a 8 rublos kilo, con dos kilos de café a 10 rublos kilo, entonces el precio de la mezcla es igual a:

$$\frac{3 \times 8 + 2 \times 10}{3 + 2} = 8{,}8 \text{ rublos.}$$

Lo mismo sucede cuando un cuerpo no elástico, que posee una masa de 3 kilogramos y una velocidad de 8 centímetros por segundo choca con otro cuerpo no elástico cuya masa es de 2 kilogramos y cuya velocidad es de 10 centímetros por segundo, de ahí resulta, que la velocidad definitiva x de cada cuerpo es:

$$x = \frac{3 \times 8 + 2 \times 10}{3 + 2} = 8{,}8 \text{ centímetros por segundo.}$$

En general, en el caso de un encuentro de cuerpos sin elasticidad, cuya masa es m_1 y m_2, y cuya velocidad es v_1 y v_2, la velocidad definitiva x, después del choque es igual a

$$x = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Si la orientación de la velocidad v_1 es considerada por nosotros como positiva, entonces el signo *más* delante de la velocidad x, indica que el cuerpo, después del choque, se mueve en dirección de la velocidad v_1; el signo *ménos* indica la orientación opuesta.

Esto es todo lo que hace falta comprender sobre la cuestión de los cuerpos no elásticos. El choque de los cuerpos elásticos se efectúa de modo más complicado: tales cuerpos en caso de choques no sólo se comprimen en el momento del choque (igual que los cuerpos no elásticos), sino que se ensanchan después del choque volviendo otra vez a su forma primitiva. En esta segunda fase, los cuerpos pierden en su velocidad tanto como perdieron en la primera fase; los cuerpos que ganaron velocidad en la primera fase, la ganarán del mismo modo en esta segunda. La doble pérdida de velocidad para los cuerpos más veloces y la doble recuperación de ella para los menos veloces, es lo más característico del choque entre cuerpos elásticos, que hace falta tener siempre en cuenta. Las demás características surgen de simples transformaciones matemáticas. Suponemos que la velocidad de los cuerpos más rápidos es v_1 y la de los demás v_2, y su masa es m_1 y m_2, entonces, si los cuerpos no fuesen elásticos, cada uno de ellos se movería después del choque, con una velocidad

$$x = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

La velocidad perdida del primer cuerpo sería igual a $v_1 - x$; la velocidad recuperada para el segundo, sería igual a $x - v_2$. En caso de cuerpos elásticos, la velocidad perdida y recuperada, como sabemos es duplicada, es decir igual a $2\ (v_1 - x)$ y $2\ (x - v_2)$. Lo que quiere decir que las velocidades definitivas y y z, después del choque de cuerpos elásticos son las siguientes:

$$y = v_1 - 2\ (v_1 - x) = 2x - v_1$$
$$z = v_2 + 2\ (x - v_2) = 2x - v_2.$$

Solamente hace falta sustituir en estas fórmulas el lugar de x por su valor auténtico (véase más arriba).

Hemos observado dos casos de choques extremos: de cuerpos completamente no elásticos y de cuerpos completamente elásticos. No obstante, también son posibles los casos intermedios: cuando se precipitan cuerpos no completamente elásticos, es decir, cuerpos que después de la primera fase del choque no restablecen su forma de un modo completo. Estos casos los volveremos a tratar más tarde; por lo pronto basta con lo ahora expuesto.

Del aspecto de un choque elástico podemos dar la siguiente breve máxima: los cuerpos se separan después del choque con la misma velocidad con la que se acercaron hasta el choque. Esto se deriva de un cálculo bastante sencillo. La velocidad del acercamiento de los cuerpos es igual a

$$v_1 - v_2$$

la velocidad de su separación después del choque es igual a

$$z - y.$$

Poniendo en lugar de $z - y$, sus valores, recibimos

$$z - y = 2x - v_2 - (2x - v_1) = v - v_2$$

Esta característica no sólo es importante porque da un aspecto claro del choque de cuerpos elásticos, sino también en relación a otros problemas. Elaborando la fórmula hemos hablado sobre los cuerpos que "chocan" y "que aguantan el choque", "que alcanzan" o "son alcanzados" en relación a su movimiento; esto se refiere naturalmente sólo al movimiento de terceros cuerpos que no participan en los movimientos. Sin embargo, en el primer capítulo de nuestro libro (recuerden experimento de los dos huevos), fué ya expuesto el que entre los cuerpos que asestan el golpe y que son golpeados no existe ninguna diferencia: su papel puede cambiar por completo, sin que cambie en nada el aspecto general del fenómeno. ¿Es esto exacto en los casos observados? ¿No se obtendrá de la fórmula antes dada otros resultados, si cambia el papel de los cuerpos?

Es fácil ver que un cambio tal no transforma en nada el resultado recibido de la fórmula anterior. Tanto en un caso como en otro, la velocidad hasta el choque es constante. Por lo tanto, no cambia tampoco la velocidad de los cuerpos que se separan después del choque ($z - y = v_1 - v_2$). En una palabra, el aspecto definitivo del movimiento de los cuerpos queda el mismo.

Siguen ahora algunos datos numéricos interesantes, referentes al choque de los cuerpos completamente elásticos. Dos globos de acero, cada uno con un diámetro de aproximadamente 7,5 centímetros (es decir, del tamaño de una bola de billar), chocan con una velocidad de 1 metro por segundo y son comprimidos uno contra el otro con una fuerza de 1,500 kilogramos, pero si chocan con una velocidad de 2 metros por segundo, la fuerza de la presión es de 3,500 kilogramos. El radio del círculo que forman los globos al acercarse para el choque, es en el primer caso, 1,2 milímetros y en el segundo 1,6 milímetros. La duración del choque es en ambos casos aproximadamente $\frac{1}{5000}$ de segundo. El tiempo tan corto del choque se debe a que el material de los globos no se destruye debido a la presión tan importante (15 — 20 toneladas en 1 centímetro cuadrado).

Una duración tan pequeña del choque existe sólo en casos de globos de pequeño tamaño. El cálculo indica que para los globos de acero del tamaño de un planeta (radio = 10,000 kilómetros) que se precipitan con una velocidad de 1 centímetro por segundo, el tiempo del choque debe durar 40 horas. ¡El círculo del acercamiento es en casos semejantes de un radio de 12,5 kilómetros y la fuerza de la presión mutua es aproximadamente de 400 millones de toneladas!

Aprende de tu pelota.

Aquellas fórmulas del choque de los cuerpos, con las cuales nos hemos familiarizado en los capítulos anteriores, tienen en la práctica poca aplicación inmediata. El número de cuerpos que pueden ser considerados como "completamente sin elasticidad" o "completamente elásticos", es muy limitado. La gran mayoría de los cuerpos no pertenece ni a la una ni a la otra categoría: son "elásticos, sin serlo por completo". Entre ellos se destaca la pelota. No debemos asombrarnos de las burlas de los antiguos fabulistas que preguntaban ¿qué cosa es la pelota? ¿es elástica o no, desde el punto de vista de la mecánica?

Hay un método simple para experimentar la elasticidad de la pelota: dejándola caer desde una gran altura hacia un suelo duro. La pelota completamente elástica deberá saltar otra vez exactamente hasta la misma altura desde la que fué lanzada.

Esto se deduce de la fórmula del choque de cuerpos elásticos:

$$y = 2x - v_1 = \frac{2(m_1v_1 + m_2v_2)}{m_1 + m_2} - v_1$$

Añadiendo además que en el caso de la pelota que se estrella contra un suelo inmóvil, podemos considerar la masa m_2 del suelo como infinitamente grande, y sin embargo su velocidad igual a O: $m_2 = \infty$, $v_2 = O$. Hasta la sustitución de estos valores en las fórmulas anteriores que deben ser reformadas, el numerador y denominador se divide por m_2:

$$y = \frac{2\left(\frac{m_1}{m_2} v_1 + v_2\right)}{\frac{m_1}{m_2} + 1} - v_1.$$

Después de la sustitución obtenemos:

$$y = \frac{2\left(\frac{m_1}{\infty} v_1 + 0\right)}{\frac{m_1}{\infty} + m_2} - v_1.$$

Como $\frac{m_1}{\infty} = 0$, la división es igual a cero y la fórmula presenta el siguiente aspecto:

$$y = - v_1$$

Es decir, la pelota debe rebotar del suelo con la misma velocidad con la que cayó a él. Pero cayendo de la altura H, el cuerpo gana en velocidad

$$\sqrt{2gh}, \text{ de ahí resulta que } H = \frac{v^2}{2g}$$

Arrojándola otra vez perpendicularmente hacia arriba con la velocidad v, el cuerpo alcanzaría la altura

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

lo cual significa que $h = H$: la pelota debe alcanzar el mismo nivel del cual cayó.

La pelota sin elasticidad no rebotaría en ningún caso (de esto es fácil persuadirse con arreglo a lo expuesto en las fórmulas).

¿Cómo debe comportarse la pelota no completamente elástica? Para explicar esta cuestión examinemos el fenómeno del choque elástico. La pelota llega hasta el suelo; en el punto de contacto, ella se hunde y las fuerzas que la empujan disminuyen su velocidad. Hasta dicho momento la pelota se comporta de la misma forma como lo hace un cuerpo no elástico; es decir, su velocidad es en este momento igual a x, y la velocidad perdida es igual a $v_1 - x$. Pero en el lugar en que se hunde, la pelota comienza rápidamente a ser empujada hacia arriba, con este proceso, la pelota, como es natural, se prensa contra el suelo que impide su empuje hacia arriba, produciéndose así fuerzas que obran sobre la pelota y disminuyen su velocidad. Si la pelota en dicho instante ha restablecido completamente su forma anterior, es decir, ha recorrido aquella etapa del cambio de su forma por la que pasó en el momento de la caída, completamente al revés, entonces esta nueva pérdida de la velocidad debe ser igual a la anterior, es decir, $v_1 - x$, y de ahí resulta que, en general, la velocidad de una pelota completamente elástica debe disminuirse en $2(v_1 - x)$ y equilibrarse

$$v_1 - 2(v_1 - x) = 2x - v_1$$

Si nosotros decimos que la pelota es "no completamente elástica" queremos decir con relación a esto, que ella no restablece completamente su forma después de su transformación bajo la influencia de las fuerzas exteriores. En el restablecimiento de su forma, colaboran todas fuerzas menos aquellas, que transformarán esta forma, y con relación a esto la velocidad perdida en el período del restablecimiento, es menor que la primitiva; ella no es igual a $v_1 - x$, sino que falta una parte de ella denominada exactamente la fracción e ("el coeficiente de la recuperación"). Así, mientras la velocidad perdida por el choque de cuerpos elásticos en el primer período es igual a $v_1 - x$, en el segundo es igual a $e(v_1 - x)$. La pérdida general es igual a $(1 + e)(v_1 - x)$, y la velocidad y, que se queda después del choque, es igual a

$$y = v_1 - (1 + e)(v_1 - x) = (1 + e)\,x - ev_1$$

La velocidad z, del cuerpo con el cual se choca (en el caso dado, el suelo), y que empuja a la pelota, según la ley de la reacción, debe ser igual, como es fácil de calcular, a:

$$z = (1 + e)\,x - ev_2$$

La diferencia entre $z - y$, de ambas velocidades, es igual a $ev_1 - ev_2 = e.(v_1 - v_2)$, de allí resulta que el coeficiente de la recuperación es

$$e = \frac{z - y}{v_1 - v_2}\,.$$

Para la pelota que se precipita contra el suelo inmóvil,

$$z = (1 + e)\,x - ex_2 = 0,\ v_2 = 0.$$

Por consiguiente,

$$e = \frac{y}{v_1}$$

Pero y —velocidad de la pelota que salta—, es igual a $\sqrt{2gh}$, donde h es la altura hacia la cual salta la pelota $v_1 = \sqrt{2gH}$, donde H es la altura desde la cual cayó la pelota. Esto significa:

$$e = \sqrt{\frac{2gh}{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

Y así hemos logrado el medio para determinar el "coeficiente de recuperación" *(e)* de la pelota que es característico para esta clase de cuerpos y los distingue de los totalmente elásticos: es decir, hace falta medir la altura desde la cual ellos han sido dejados caer y la altura hacia la cual saltan, o sea, extrayendo la raíz cuadrada con relación a estas cantidades es como se encuentra el coeficiente buscado.

Según las normas deportivas, una buena pelota de tenis, en caso de caída desde una altura de 250 centímetros, debe saltar hasta la altura de 125 a 152 centímetros. Esto significa que el coeficiente de la recuperación para la pelota de tenis debe encontrarse dentro de los límites siguientes:

$$\text{de } \sqrt{\frac{127}{250}} \text{ a } \sqrt{\frac{152}{250}}$$

es decir, de 0,71 a 0,78.

Fijamos pues, como cantidad media 0,75, es decir, expresándolo en forma diferente, la pelota es "elástica en un 75%" y de ahí resulta un hecho interesante para el cálculo de un deportista.

Problema primero: ¿Hasta dónde salta la pelota la segunda vez, la tercera y las siguientes, cuando ha sido dejada caer desde una altura H?

La primera vez, la pelota salta, como sabemos, hacia una altura determinada por la siguiente fórmula:

$$e = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

Para $e = 0{,}75$ y $H = 250$ centímetros, tenemos ahora:

$$\sqrt{\frac{h}{250}} = 0{,}75$$

Fig. 45.—Salto de una buena pelota de tenis.

de aquí resulta $h = 140$ centímetros.

La segunda vez, es decir, después de la caída desde la altura $h = 140$ ctms., la pelota salta hacia la altura h_1, por lo tanto,

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_1}{140}},$$

de ahí resulta que $h_1 = 78$ centímetros.

La altura h_2 del tercer salto de la pelota la encontramos de la ecuación

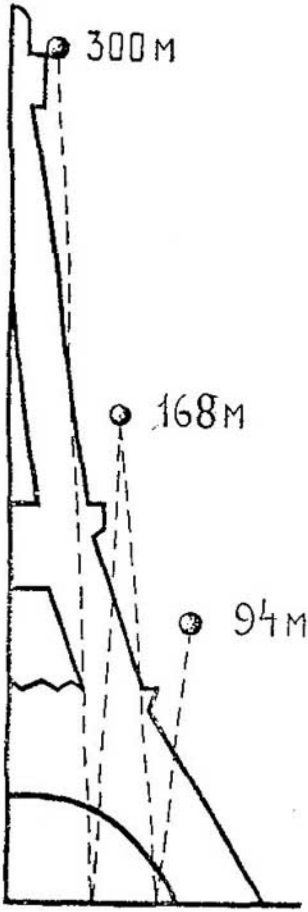


Fig. 46.—¿A qué altura salta una pelota lanzada desde la torre Eiffel?

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_2}{78}}$$

de ahí resulta que $h_2 = 44$ ctms.

Los cálculos siguientes se deben realizar de la misma forma.

Lanzando desde la altura de la torre de Eiffel *(H = 300 m.)* una pelota, ésta saltaría la primera vez hasta 168m., la segunda vez hasta 94ms. y así sucesivamente, sin tener en cuenta la resistencia del aire que en este caso debe ser grande e importante para la velocidad.

Problema segundo: ¿Cuánto tiempo necesita, en total, la pelota que cayó desde la altura H para saltar?

Sabemos que

$$H = \frac{gT^2}{2}\,;\; h = \frac{gt^2}{2}\,;\; h_1 = \frac{gt_1^2}{2}$$

etc.

Y de ahí resulta,

$$T = \sqrt{\frac{2H}{g}}\,;\; t = \sqrt{\frac{2h}{g}}\,;\; t_1 = \sqrt{\frac{2h_1}{g}}$$

etc.

La duración de los saltos es igual a

$$T + 2t + 2t_1 + 2t_2 + \text{etc.}$$

es decir,

$$\sqrt{\frac{2H}{g}}+2\sqrt{\frac{2h}{g}}+2\sqrt{\frac{2h_1}{g}}+\text{etc.}$$

Después de algunas transformaciones, que son fáciles de realizar para el lector que entiende de matemáticas, se logra por sí mismo el cálculo de la suma de la locución; que es igual a:

$$\sqrt{\frac{2H}{g}}\left(\frac{2}{1-e}-1\right)$$

Colocando en lugar de $H = 250$ ctms., $g = 980$ ctms. por segundo elevado al cuadrado, $e = 0{,}75$, calculamos que la duración general del salto de la pelota es igual a 5 segundos; es decir, la pelota salta durante el curso de 5 segundos.

Si dejamos caer la pelota de una altura como la torre Eiffel, el salto duraría aproximadamente un minuto (excluyendo la resistencia de la atmósfera); exactamente 54 segundos, naturalmente sólo en el caso en que la pelota no se estropee durante el choque.

En el caso de una caída de la pelota, desde una altura de algunos metros, la velocidad no es grande, y por tanto, la resistencia del aire no tiene casi importancia. Fué realizado el siguiente experimento: una pelota, cuyo coeficiente de recuperación es 0,76, cayó desde una altura de 250 ctms. Suponiendo la ausencia de la resistencia atmosférica, la pelota debía saltar la segunda vez a una altura de 84 ctms.; en realidad, la pelota saltó a una altura de 83 centímetros; como vemos, la resistencia del aire casi no significa nada.

En el campo del croquet

La pelota del croquet necesita para ser sacada de su inmovilidad, aquel choque que la Mecánica denomina "directo" o "central". ¿Qué es lo que sucede con ambas pelotas después del choque?

Ambas pelotas tienen una masa igual. Si ellas fueran *no elásticas completamente*, entonces su velocidad, después del choque sería uniforme, las dos tendrían, en relación a la velocidad, la misma posición que la pelota que asestó el golpe. Esto se deduce de la fórmula

$$x = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

en la cual $m_1 = m_2$ y $v_2 = 0$.

Por el contrario, si las pelotas fuesen completamente elásticas, según el cálculo (cuya ejecución es conocida por el lector) sería fácil determinar que las pelotas *cambiarían su velocidad*: la pelota que rueda quedaría, después del choque, fija en el lugar, y sin embargo la pelota que antes estaba inmóvil se movería después del choque con la misma velocidad de la pelota que asestó el golpe. Tal como sucede en el caso del choque de las bolas de billar (que son de marfil).

Pero la pelota de croquet no pertenece ni a la una ni a la otra clase de cuerpos: es elástica pero no completamente. Por esto, el resultado del choque no se parece a los casos hasta ahora mencionados. Ambas pelotas continuan después del golpe sus movimientos, pero no con una velocidad igual: la pelota golpeada queda detrás de la pelota que golpea. Volvamos hacia los detalles de las fórmulas del choque de los cuerpos.

El "coeficiente de la recuperación" (tal como lo denominamos, según se recuerda el lector de lo anteriormente expuesto), es igual a e. En el artículo anterior hemos encontrado que la velocidad y y z de ambas pelotas después del choque tienen el siguiente enunciado:

$$y = (1 + e)x - ev_1; \quad z = (1 + e)x - ev_2.$$

Aquí, como en las fórmulas anteriores,

$$x = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

En el caso de la pelota de croquet $m_1 = m_2$ y $v_2 = 0$. Por lo tanto, tenemos la ecuación:

$$x = \frac{v_1}{2}\ ; y = \frac{v_1}{2}(1 - e)\ ; z = \frac{v_1}{2}(1 + e)$$

De ahí es fácil deducir que

$$y + z = v_1; \quad z - y = ev_1$$

Ahora podemos con exactitud pronosticar la suerte de las pelotas del croquet que chocan: la velocidad de las pelotas golpeadas se reparte entre ambas de tal modo que la pelota golpeada se mueve más rápidamente que la que asestó el golpe, siendo el aumento de la velocidad igual a la fracción e en comparación a la velocidad primitiva de la pelota que asestó el golpe.

Veamos pues, un ejemplo. Supongamos que $e = 0{,}75$. En este caso, la pelota golpeada recibe $\frac{7}{8}$ de la velocidad primitiva de la pelota que asestó el golpe, pero esta última, se mueve después del golpe únicamente en $\frac{1}{8}$ parte de su velocidad primitiva.

Sobre la velocidad de la fuerza

Bajo este título encontramos en el libro de L. N. Tolstoi "Primer libro de lectura", la conversación siguiente:

"Una vez una máquina (de tren) corría muy rápida por las vías del ferrocarril. En la misma vía, sobre una traviesa, se encontraba un caballo con un pesado carro. Un campesino intentó arrastrar el caballo fuera de la vía, pero el caballo no pudo arrancar el carro porque sus ruedas se habían atrancado. El conductor gritó al maquinista: "Alto", pero el maquinista no le obedeció. El comprendió bien que el campesino no podía ni echar el caballo fuera del carro ni ladear el carro y que no sería posible tampoco parar la máquina de un golpe. Por ello, no trató de parar el tren sino que puso la máquina a todo vapor e intentó en todos los sentidos caer encima del carro. El campesino huyó del carro, y la máquina, arrojó al carro y al caballo del camino, como una viruta, pero no fué sacudida sino que siguió tranquilamente su marcha. Entonces el maquinista dijo al conductor: "Ahora no hemos matado más que un caballo y destrozado un carro viejo, pero si te hubiera hecho caso nosotros hubiéramos muerto y matado a todos los pasajeros. Debido a la velocidad de la marcha, nos hemos echado encima del carro y no nos dimos cuenta del choque, pero en el caso de una marcha lenta este choque nos habría echado fuera de los rieles."

¿Es posible explicar este suceso desde el punto de vista de la mecánica? Aquí se trata del caso de un choque de cuerpos no elásticos por completo, en el cual el cuerpo que aguanta el choque (el carro), estaba hasta el momento del choque, inmóvil. Si tomamos por la masa y la velocidad del tren la denominación m_1 y v_1 y por la masa y la velocidad del carro m_2 y v_2 $(= 0)$, entonces podemos aplicar aquí ya nuestra fórmula conocida:

$$y = (1 + e)\, x - ex_1; \quad z = (1 + e)\, x - ev_2$$

$$x = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Dividiendo en la última enunciación el numerador y el denominador por m_1 obtenemos:

$$x = \frac{v_1 + \frac{m_2}{m_1} v_2}{1 + \frac{m_2}{m_1}}$$

Pero la relación $\frac{m_2}{m_1}$ de la masa del carro con la masa del tren es casi nula, igualándola a cero obtenemos que

$$x \approx v_1$$

Esto quiere decir que el tren, después del choque, continuará su camino con la velocidad anterior; los pasajeros no sentirán ninguna molestia, (ningún cambio de velocidad).

Pero ¿qué pasará con el carro? Su velocidad, después del choque $z = (1 + e)\; x = (1 + e)\, v_1$ sobrepasa a la velocidad del tren por ev_1. Cuanto más grande sea la velocidad v_1 del tren hasta el momento del choque, tanto más rápido el carro será apartado después del choque, del tren que le empujó.

En el caso expuesto, esto tiene una importancia decisiva para evitar la catástrofe que inevitablemente traería tras sí el roce del carro con el tren; en caso de una energía insuficiente del choque, el carro podría ser un serio impedimento, si se quedase encima de la vía.

Así, poniendo el tren a plena marcha, el maquinista obró de un modo justo, gracias a esto sin perder equilibrio, echó al carro fuera de su camino. Hace falta observar que la conversación en la obra de Tolstoi se refiere a los trenes con una marcha relativamente lenta de aquella época.

EL HOMBRE-YUNQUE

Este número de circo produce siempre una fuerte emoción incluso en un espectador muy acostumbrado a tales espectáculos. Encima del tórax del artista, que está echado en la tierra, se pone un pesado yunque y dos atletas, con todas sus fuerzas, golpean sobre él con martillos muy pesados.

Forzosamente se asombra uno pensando ¿cómo puede un ser viviente aguantar tales golpes sin sufrir daño?

Las leyes del choque de los cuerpos elásticos nos dicen que cuanto más pesado sea el yunque en comparación con el martillo, tanto menor será la velocidad que recibe debido al choque, es decir, tanto menor es la repercusión recibida.

Recordemos la fórmula para la velocidad de los cuerpos golpeados en el caso del choque entre cuerpos elásticos

$$z = 2x - v_2 = \frac{2\,(m_1 v_1 + m_2 v_2)}{m_1 + m_2} - v_2$$

Aquí m_1 es la masa del martillo, m_2 es la masa del yunque, v_1 y v_2 son sus velocidades hasta el choque. Sabemos de antemano, que $v_2 = 0$, porque el yunque hasta el momento del choque permanece inmóvil. Esto significa que nuestra fórmula recibe el aspecto siguiente:

$$z = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{2v_1 . \frac{m_1}{m_2}}{\frac{m_1}{m_2} + 1}$$

(nosotros hemos dividido el numerador y el denominador por m_2). Si la masa m_2 del yunque tiene un peso muy considerable en comparación con la masa m_1 del martillo, entonces la división $\frac{m_1}{m_2}$ es muy pequeña y es posible menospreciarla casi por completo. Así la velocidad del yunque después del golpe es

$$z = 2v_1 . \frac{m_1}{m_2}$$

es decir, queda compuesta solamente de la parte muy pequeña v_1 del martillo.[1]

Para el yunque que es más pesado que el martillo, por ejemplo, 100 veces más, la velocidad es 50 veces menor que la del martillo

$$z = 2v_1 . \frac{1}{100} = \frac{1}{50} v_1 .$$

Cualquier herrero sabe muy bien, por la práctica, que el golpe de un martillo ligero no se transmite hasta el fondo del yunque. Ahora es comprensible por qué para el artista es más ventajoso que el yunque acostado sobre él sea lo más pesado posible. Todas las dificultades consisten en que él sea capaz de aguantar el peso. Esto es posible cuando la base del yunque tiene una forma tal que se adapte bien al cuerpo ocupando mucho espacio y no teniendo contacto solamente con algunos puntos del cuerpo. Así el yunque se distribuye sobre una gran superficie y a cada centímetro cuadrado corresponde sólo una carga no muy grande. Entre la base del yunque y el cuerpo del hombre se coloca un cojín blando.

Engañar al público sobre el peso del yunque no tiene ningún valor para el artista pero sí resultaría para él bien engañarlo sobre el peso del martillo; posiblemente por esto los martillos de los cirqueros no son tan pesados como parecen. Si el martillo es hueco entonces la fuerza de su golpe no es a los ojos del observador menos fuerte, y sin embargo, la vibración del yunque se debilita proporcionalmente a la disminución de la masa del martillo.

[1] Hemos supuesto que tanto el martillo como el yunque son cuerpos completamente elásticos. El lector puede deducir de cualquier cálculo que el resultado cambia poco si ambos cuerpos no son completamente elásticos.