Capítulo Primero
MECÁNICA

♦ ♦ ♦ ♦

1. La medida de longitud más pequeña.

Cite la medida de longitud más pequeña.

Una milésima de milímetro -micrómetro (µm), micra o micrón (µ)- no es la unidad de longitud más pequeña de las que se utilizan en la ciencia moderna[1]. Hay otras, todavía más pequeñas, por ejemplo, las unidades submúltiplas de milímetro: el nanómetro (nm) que equivale a una millonésima de milímetro, y el llamado angstrom (Å) equivalente a una diezmillonésima de milímetro. Las medidas de longitud tan diminutas sirven para medir la magnitud de las ondas luminosas. Además, en la naturaleza existen cuerpos para cuyas dimensiones tales unidades resultan ser demasiado grandes. Así son el electrón[2] y el protón cuyo diámetro, posiblemente, es mil veces menor aún.

2. La medida de longitud más grande

¿Cuál es la medida de longitud más grande?

Hasta hace cierto tiempo, la unidad de longitud más grande utilizada en la ciencia se consideraba el año luz, equivalente al espacio recorrido por la luz en el vacío durante un año. Esta unidad de distancia representa 9,5 billones de kilómetros ($9,5*10^{12}$ km). En los tratados científicos más a menudo se suele emplear otra, que la supera más de tres veces, llamada parsec (pc). Un parsec (voz formada de par, abreviación de paralaje, y sec, del lat. secundus, segundo) vale 31 billones de kilómetros ($31*10^{12}$ km). A su vez, esta gigantesca unidad de distancias astronómicas resulta ser demasiado pequeña. Los astrónomos tienen que utilizar el kiloparsec que equivale a 1000 pc,

---

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

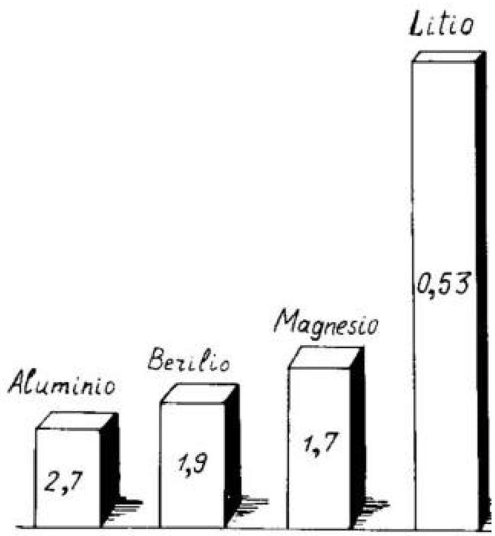
[2] Estrictamente hablando, sólo podemos referirnos al diámetro del electrón con cierto convencionalismo. «Suponiendo, observa J.Thomson, que el electrón está sujeto a las mismas leyes que una bola metálica cargada en un laboratorio, podemos calcular su "diámetro": el resultado será de $3,7 \cdot 10^{-13}$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

y el megaparsec, de 1.000.000 pc, que hoy en día es la unidad de medida más grande. Los megaparsec se utilizan para medir las distancias hasta las nebulosas espirales.

3. Metales ligeros. Metales más ligeros que el agua.

¿Existen metales más ligeros que el agua? Cite el metal más ligero.

Cuando se pide nombrar un metal ligero, se suele citar el aluminio; no obstante, éste no ocupa el primer lugar entre sus «semejantes»: hay otros, mucho más ligeros que él.



Prismas de peso igual fabricados de metales ligeros

Para comparar, en la figura se ofrecen prismas de masas iguales, hechos de diferentes metales ligeros. A continuación los citamos especificando su densidad (g/cm3):

Aluminio	2,7
Berilio	1,9
Magnesio	1,7
Sodio	0,97
Potasio	0,86
Litio	0,53

Según vemos, el litio es el metal más ligero cuyo peso específico es menor que el de muchas especies de madera (los tres últimos metales son más ligeros que el agua); un trozo de litio flota en el queroseno sólo sumergiéndose hasta la mitad. El litio pesa 48 veces menos que el metal más pesado, el osmio.

Entre las aleaciones empleadas en la industria moderna, las más livianas son:

1) el duraluminio (aleación de aluminio con pequeñas cantidades de cobre y magnesio); tiene una densidad de 2,6 g/cm^3 y pesa tres veces menos que el hierro, superándolo en resistencia una vez y media.

2) el electrón (no se confunda con la partícula elemental de carga negativa); este metal tiene una resistencia casi igual que el duraluminio y es más liviano que éste en el 30 % (su densidad es de 1.84 g/cm^3).

4. La sustancia más densa.

¿Qué densidad tiene la sustancia más densa que se conoce?

La densidad del osmio, iridio y platino (elementos considerados como los más densos) nada vale en comparación con la de algunos astros. Por ejemplo, un centímetro cúbico de materia de la estrella de van Maanen, perteneciente a la constelación zodiacal de Piscis, contiene 400 kg de masa por término medio; esta materia es 400.000 veces más densa que el agua, y unas 20.000 veces más densa que el platino. Un diminuto perdigón hecho de semejante materia, de unos 1,25 mm de diámetro, pesaría 400 g.

5. En una isla deshabitada.

He aquí una de las preguntas presentadas en el famoso certamen de Edison[3]. «Encontrándose en una de las islas de la zona tropical del Pacífico, ¿cómo se podría desplazar, sin emplear instrumento alguno, una carga de tres toneladas, digamos, un peñasco de 100 pies de largo y de 15 pies de alto?»

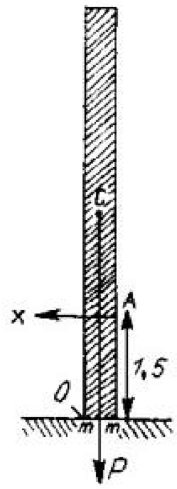
«¿Hay árboles en aquella isla tropical?» -pregunta el autor de un libro publicado en alemán y dedicado al análisis del certamen organizado por Edison. Ésta es una pregunta superflua, pues para mover un peñasco no se necesitan árboles: se puede realizar esta operación sólo con las manos. Calculemos las dimensiones del peñasco, que no se mencionan en el problema (cosa que no puede menos que provocar sospechas) y todo estará claro. Si pesa 30.000 N, mientras que la densidad del granito es de 3000 kg/cm^3, su volumen valdrá 1 m^3. Como la peña apenas mide 30 m de largo y unos 5 m de alto, su grosor será de

$$1 / (30 * 5) = 0,007 \text{ m}$$

es decir, de 7 mm. Por consiguiente, se tenía en cuenta una pared delgada de 7 mm de grosor. Para tumbar semejante obstáculo (siempre que no esté muy hundido en el terreno) sería suficiente empujarlo con las manos o el hombro. Calculemos la fuerza que se necesita para ello.

---

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



Desplome del peñasco de Edison

Designémosla por X; en la figura la representa el vector AX . Dicha fuerza está aplicada al punto A dispuesto a la altura de los hombros de una persona (1,5 m), y tiende a hacer girar la pared en torno al eje O. Su momento es igual a

Mom. X = 1,5X.

El peso de la peña P = 30.000 N, aplicado a su centro de masas C, se opone al esfuerzo de empuje y tiende a mantener el equilibrio. El momento creado por el peso respecto del eje D es igual a

Mom. P = Pm = 30.000 * 0,0035 = 105.

En este caso la fuerza X se determina haciendo uso de la ecuación siguiente:

1,5X = 105,

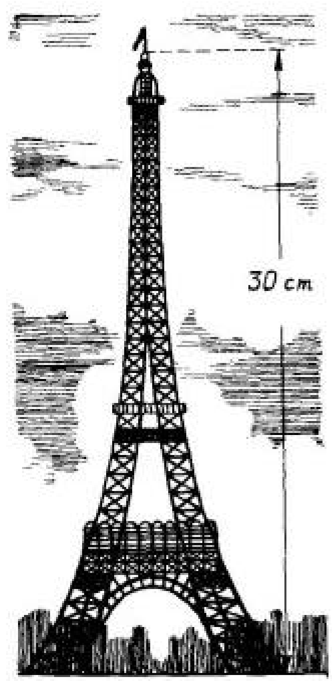
de donde

X = 70 N;

o sea, empujando la pared con un esfuerzo de 70 N, una persona podría tumbarla.
Es muy poco probable que semejante obra de mampostería pudiera permanecer en posición vertical: la desplomaría un leve soplo de aire. Es fácil calcular mediante el método recién descrito que para tumbar esa pared bastaría un viento (que interviene como una fuerza aplicada al punto medio de la obra) de sólo 15 N, mientras que un viento no muy fuerte, creando una presión de 10 N/m^2, ejercería sobre ella un empuje superior a los 10.000 N.

6. Modelo de la torre Eiffel.

La torre Eiffel, toda de hierro, mide 300 m (1000 pies) de altura y pesa 9000 t. ¿Cuánto pesará su modelo exacto, también hecho de hierro, de 30 cm (1 pie) de altura?



¿Cuánto pesará semejante modelo de la torre Eiffel?

Este problema es más bien geométrico que físico; no obstante, ofrece mayor interés para la física, pues en física a veces se suelen comparar las masas de cuerpos geométricamente semejantes. Se requiere determinar la razón de masas de dos cuerpos semejantes, además, las dimensiones lineales de uno de ellos son 1000 veces menores que las del otro. Sería un error craso creer que un modelo de la torre Eiffel, disminuido tantas veces, tenga una masa de 9 t en vez de 9000 t, es decir, que sea mil veces menor que su prototipo. En realidad, los volúmenes y, por tanto, las masas de los cuerpos geométricamente semejantes se relacionan como sus dimensiones lineales a la tercera potencia. Luego tal modelo debería tener una masa 1000^3 veces menor que la obra real, es decir, sería 1.000.000.000 veces menor:

$$9.000.000.000 / 1.000.000.000 = 9 \text{ g.}$$

Ésta sería una masa insignificante para un artefacto de hierro de 30 cm de altura. Pero no debemos sorprendernos de ello, pues sus barras serían mil veces más delgadas que las de la original, es decir, semejarían hilos, y todo el modelo parecería tejido de un alambre finísimo[4], de modo que no hay motivo para extrañarnos de su masa tan pequeña.

7. Mil atmósferas bajo la punta de un dedo.

¿Podría Ud. ejercer una presión de 1000 at con un dedo?

A muchos lectores les sorprenderá la afirmación de que al manejar una aguja o un alfiler, se ejerce una presión de 1000 at. Es muy fácil cerciorarnos de esto midiendo el esfuerzo que se aplica a un alfiler puesto verticalmente en el plato de una balanza y presionado con un dedo; esta

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

magnitud será de unos 3 N. El diámetro del área que sufre la presión ejercida por la punta del alfiler, es de 0,1 mm, o 0,01 cm, aproximadamente; ésta es igual a

$$3 * 0{,}01^2 = 0{,}0003 \text{ cm } 2.$$

Por lo tanto, la presión correspondiente a 1 cm^2 será de

$$3 / 0{,}0003 = 10.000 \text{ N}.$$

Como una atmósfera técnica (at) equivale a una presión de 10 N por 1 cm^2, al introducir el alfiler, ejercemos una presión de 1000 at. La presión de trabajo que el vapor crea en el cilindro de la máquina de vapor es cien veces menor.
Un sastre, manejando una aguja, a cada rato se vale de una presión de cientos de atmósferas sin sospechar que sus dedos son capaces de desarrollar una presión tan enorme. Tampoco se da cuenta de esto un barbero que hace la barba a su cliente con una navaja de afeitar. Si bien ésta ataca el pelo con una fuerza de unas cuantas décimas de N, el grosor de su filo no supera 0,0001 cm, mientras que el diámetro de un pelo es menos de 0,01 cm; en este caso la presión ejercida por la navaja afecta un área de

$$0{,}0001 * 0{,}01 = 0{,}000001 \text{ cm}^2.$$

La presión específica que una fuerza de 0,01 N ejerce sobre un área tan pequeña es de

$$0{,}01 : 0{,}000001 = 10.000 \text{ N/cm}^2,$$

o sea, es de 1000 at. La mano comunica a la navaja una fuerza superior a 0,01 N, por lo cual la presión de esta última sobre el pelo alcanza decenas de miles de atmósferas.

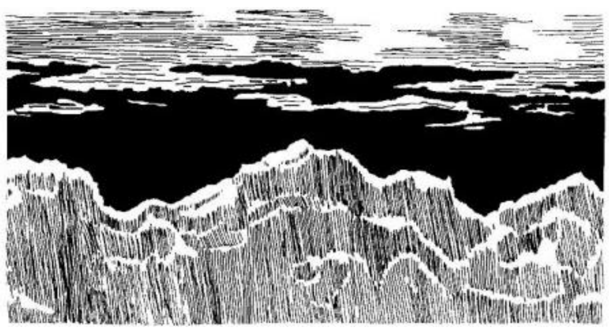
8. Un esfuerzo de 100.000 at creado por un insecto.

¿Podría un insecto crear una presión de 100.000 at?

Los insectos tienen una fuerza tan insignificante en valor absoluto que parece extraña la afirmación de que algunos de ellos puedan ejercer una presión de 100.000 at. No obstante ello, se conocen insectos capaces de crear una presión mucho mayor. Por ejemplo, la avispa ataca a su presa clavando en ella su aguijón con una fuerza de tan sólo 10^{-14} N, o algo así. Pero el dardo de este heminóptero es tan agudo que ni siquiera la técnica moderna, por más sofisticada que sea, puede crear un efecto semejante; aun los instrumentos microquirúrgicos son mucho más romos (adj. Obtuso y sin punta) que el aguijón de la avispa. Su punta es tan afilada que ni el microscopio más potente puede descubrir una «meseta» en ella.

La punta de una aguja vista en un microscopio de gran aumento, semejaría la cima de una montaña

La punta de la aguja, vista en semejante microscopio, en cambio, parecería la cima de una montaña (arriba), mientras que el filo de un cuchillo muy afilado semejaría más bien una sierra (abajo).



El filo de un cuchillo visto en un microscopio de gran aumentosemejaría una sierra

Al parecer, el dardo de la avispa es el «instrumento» natural más agudo: su radio de redondeo no supera 0,00001 mm, en tanto que el filo de una navaja de afeitar muy bien aguzada es no menos de 0,0001 mm y alcanza 0,001 mm.
Calculemos el área afectada por la fuerza de la presión de 0,0001 N cuando la avispa clava su aguijón, o sea, un área de 0,000001 mm de radio. Adoptando, para simplificar, n = 3, obtendremos el siguiente resultado:

$$3 * 0,000001^2 \text{ cm}^2 = 0,000000000003 \text{ cm}^2.$$

La fuerza que actúa sobre esta área es de 0,0001 N, de modo que se crea una presión de

$$0,0001 / 0,000000000003 = 330.000 \text{ at} = 3,3 \cdot 10^{10} \text{ Pa}.$$

Ejerciendo una presión tan enorme una avispa podría punzar el blindaje de acero más resistente si su dardo fuera lo suficientemente tenaz.

9. El remero en el río

Una embarcación de remo navega por un río, y junto a ella flota una astilla. ¿Qué le es más fácil al remero, adelantar 10 m a la astilla o quedar a su zaga a la misma distancia?.

Aun las personas que practican el deporte del remo, a menudo suelen responder erróneamente a la pregunta planteada: les parece que remar aguas arriba es más difícil que aguas abajo; por consiguiente, en su opinión cuesta menos trabajo aventajar a la astilla que quedar a su zaga.
Por supuesto, es más difícil bogar corriente arriba que corriente abajo. Mas, si se quiere alcanzar un punto que se desplaza con la misma velocidad, por ejemplo, la mencionada astilla, la situación se torna distinta. Hay que tener en cuenta el hecho de que la lancha que flota a favor de la corriente se encuentra en reposo respecto del agua que la lleva. De modo que el remero maneja los remos del mismo modo que en el agua de un estanque. En éste da igual bogar en cualquier dirección; lo mismo ocurre en nuestro caso, encontrándose en medio de agua corriente.
De manera que el remero tendrá que invertir igual cantidad de trabajo, sin que importe qué es lo que pretende, aventajar a la astilla llevada por la corriente o rezagarse de ella a la misma distancia.

10. El empavesado de un aeróstat

Un aeróstato es arrastrado por el viento en dirección norte. ¿En qué sentido se alínea el empavesado de la barquilla?

Mientras el aeróstato se desplaza a favor del flujo de aire, ambos tienen la misma velocidad: el globo y el aire ambiente están en reposo uno respecto a otro. Por esta razón, el empavesado deberá colgar de la barquilla, como sucede en tiempo de calma. Los tripulantes no deberán sentir ni el menor soplo de aire, aunque sean llevados por un huracán.

11. Círculos en el agua.

Al arrojar una piedra al agua estancada se forman ondas que se propagan en torno al punto de caída . ¿Qué forma tienen las ondas que surgen cuando una piedra cae al agua corriente?

¿Qué forma tienen las ondas formadas al arrojar una piedra al agua corriente?

Si usted no encuentra la manera adecuada de abordar este problema quedará despistado y sacará la conclusión equivocada de que, en el agua corriente, las ondas deben alargarse en forma de elipse o de óvalo, y estar achatadas en la parte que enfrenta a la corriente. Sin embargo, observando atentamente las ondas que viajan en torno al punto de caída de una piedra en un río, nos daremos cuenta de que tienen forma circular, por muy rápida que sea la corriente.
En esto no hay nada de extraño: analizando detenidamente el fenómeno descrito concluiremos que las ondas que surgen alrededor del punto donde cae la piedra, deben tener forma circular tanto en el agua corriente como estancada. Vamos a examinar el movimiento de las partículas de

agua agitada como resultado de dos movimientos: uno radial (desde el centro de oscilaciones) y otro de traslación (según la corriente del río). Un cuerpo que participa en varios movimientos se traslada, en resumidas cuentas, hacia el punto donde se encontraría si realizara sucesivamente dichos movimientos. Por tanto, supongamos primeramente que la piedra ha sido arrojada en un agua quieta. En este caso está claro que las ondas que surgen son circulares.
Ahora supongamos que el agua está en movimiento, sin prestar atención a la velocidad y al carácter uniforme o variado de dicho movimiento, siempre que sea progresivo. ¿Qué pasará con las ondas circulares? Se trasladarán paralelamente una respecto a otra, sin sufrir deformación alguna, es decir, seguirán siendo circulares.

12. La ley de inercia y los seres vivos

¿Obedecerán los seres vivos a la ley de inercia?

El motivo por el cual se pone en duda la afirmación de que los seres vivos obedezcan a la ley de inercia es el siguiente. Se suele considerar que ellos pueden ponerse en movimiento sin que intervenga una fuerza externa, mientras que la ley de inercia reza: «Un cuerpo abandonado a la suerte permanecerá en estado de reposo o continuará su movimiento rectilíneo y uniforme hasta que una fuerza externa cambie este estado» (Prof. A. Eijenvald, Física teórica).
No obstante, la palabra «externa» no es indispensable en el enunciado de la ley de inercia, ni mucho menos: en este caso es un vocablo de más. Isaac Newton no lo utiliza en sus Principios matemáticos de la filosofía natural, es decir, de la física. He aquí una versión literal de la definición newtoniana de dicha ley:
«Todo cuerpo continuará en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo mientras y por cuanto no necesite cambiar este estado debido a las fuerzas aplicadas a él»
Según vemos, Isaac Newton no indica que la fuerza que hace que el cuerpo abandone el estado de reposo 0 deje de moverse por inercia, obligatoriamente tiene que ser externa. Semejante enunciado de la ley de inercia no permite dudar de que ella afecta a todos los seres vivos. Por lo que atañe a la facultad de moverse sin la participación de fuerzas externas, razonamientos relativos a esta cuestión aparecen en los ejercicios siguientes.

13. El movimiento y las fuerzas internas

¿Podrá poner se en movimiento un cuerpo sólo a expensas de sus fuerzas internas?

Se considera que un cuerpo es incapaz de ponerse en movimiento únicamente a expensas de sus fuerzas internas. Éste es un prejuicio. Basta con citar el ejemplo del misil que sólo se mueve merced a sus fuerzas internas.
Lo cierto es que estas últimas no pueden provocar un movimiento igual de toda la masa del cuerpo. Pero ellas son capaces, por ejemplo, de imprimir un movimiento a una parte de éste hacia adelante, y a la otra, otro movimiento hacia atrás. Así sucede en el caso del misil.

14. El rozamiento como fuerza.

¿Por qué se suele decir que el rozamiento es una fuerza, a pesar de que el mismo, de por sí, no puede contribuir al movimiento (por tener siempre sentido contrario a éste)?

Desde luego, el rozamiento no puede ser causa directa de movimiento; por el contrario, lo impide. Precisamente por eso lo llaman con todo fundamento fuerza. ¿Qué es una fuerza? Isaac Newton la define del modo siguiente:
«La fuerza es una acción ejercida sobre un cuerpo a fin de modificar su estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme»
El rozamiento modifica el movimiento rectilíneo de los cuerpos, convirtiéndolo en uno variado (retardado). Por consiguiente, el rozamiento es una fuerza.
Para diferenciar tales fuerzas no motrices, como el rozamiento, de otras, capaces de provocar movimiento, las primeras se dice que son pasivas, y las segundas, activas. El rozamiento es una fuerza pasiva.

15. El rozamiento y el movimiento de los animales.

¿Qué papel desempeña el rozamiento en el proceso de movimiento de los seres vivos?

Examinemos un ejemplo concreto, a saber, la marcha de la persona. Se suele creer que durante la marcha la fuerza motriz es el rozamiento, la única fuerza externa que de hecho interviene en este proceso. En algunos libros de divulgación científica aun se encuentra semejante criterio que, lejos de esclarecer el asunto, lo embrolla más. ¿Sería capaz el rozamiento provocar movimiento si no puede sino retardarlo?
En lo que se refiere al papel que el rozamiento desempeña en el andar de los hombres y los animales, se debe tener en cuenta lo siguiente. Al caminar, deberá ocurrir lo mismo que durante el movimiento de un ingenio: el hombre puede mover un pie hacia adelante sólo a condición de que el resto de su cuerpo retroceda un poco. Este efecto se observa muy bien cuando se camina por un terreno resbaladizo. Mas, de haber un rozamiento suficientemente considerable, el cuerpo no retrocede, y su centro de masas se desplaza hacia adelante: de esa manera se da un paso.
Pero, ¿merced a qué fuerza el centro de masas del cuerpo humano se desplaza hacia adelante? Esta fuerza se debe a la contracción de los músculos, es decir, es una fuerza interna. En tal caso la función del rozamiento consiste únicamente en equilibrar una de las dos fuerzas internas iguales que surgen durante la marcha, dando, de esa manera, prioridad a la otra.
Durante el desplazamiento de los seres vivos, así como durante el movimiento de una locomotora, la función del rozamiento es idéntica. Todos estos cuerpos realizan movimiento progresivo no gracias a la acción del rozamiento, sino merced a una de las dos fuerzas internas que prevalece a expensas de él.

16. Sin rozamiento.

Imagínese que una persona se encuentra en una superficie horizontal perfectamente lisa. ¿De qué manera podría desplazarse por ella?

Si no existiera rozamiento, sería imposible caminar; éste es uno de los inconvenientes de semejante situación. No obstante, sería posible desplazarse por una superficie perfectamente lisa. Para ello habría que arrojar algún objeto en dirección opuesta a la que la persona quisiera seguir; entonces, conforme a la ley de reacción, su cuerpo avanzaría en la dirección elegida. Si no hay nada que arrojar, tendría que quitarse alguna prenda de vestir y lanzarla.
Obrando de la misma manera la persona podría detener el movimiento de su cuerpo si no tiene de qué agarrarse.
En semejante situación se ve un cosmonauta que sale al espacio extravehicular. Permaneciendo fuera de la nave, seguirá su trayecto por inercia. Para acercarse a ella o alejarse a cierta distancia,

podrá utilizar una pistola: la repercusión que se produce durante el disparo le obligará a desplazarse en sentido opuesto; la misma arma le ayudará a detenerse.

17. Tendiendo una cuerda.

El problema siguiente fue tomado del libro de texto de mecánica de A.Tsínguer. Helo aquí. «Para romper una cuerda una persona tira de sus extremos en sentidos diferentes, aplicando a cada uno de ellos una fuerza de 100 N. Como no puede romperla obrando de esta manera, sujeta uno de los extremos tirando del otro con las dos manos con una fuerza de 200 N. ¿Estará más tensa la cuerda en el segundo caso?»

Podría parecer que el tensado de la cuerda será igual no obstante la magnitud de la fuerza que se aplique: de 100 N a cada extremo, o de 200 N a uno de ellos, sujetando el otro. En el primer caso, las dos fuerzas, de 100 N cada una, aplicadas a los cabos de la cuerda, engendran un esfuerzo extensor de 200 N; en el segundo, la misma tensión se crea con la fuerza de 200 N aplicada al extremo libre.

Éste es un error garrafal. En ambos casos la soga se tensa de manera distinta. En el primero sufre la acción de dos fuerzas, de 100 N cada una, aplicadas a dos extremos, en tanto que en el segundo es extendida por dos fuerzas, de 200 N cada una, aplicadas a dichos extremos, puesto que la fuerza de las manos origina una reacción de valor igual por parte del punto de fijación del elemento. Por consiguiente, en el segundo caso la estira un esfuerzo dos veces mayor que en el primero.

Es muy fácil incurrir en un nuevo error al determinar la magnitud de tensión de la cuerda. Cortémosla sujetando los extremos libres a una balanza de resorte, uno al anillo y el otro, al gancho. ¿Qué indicará este utensilio?

No se debe creer que en el primer caso el fiel marcará 200 N, y en el segundo, 400 N. Es que dos fuerzas contrarias, de 100 N cada una, que solicitan sendos extremos de la soga, crean un esfuerzo de 100 N en vez de 200 N. Un par de fuerzas, de 100 N cada una, que halan la soga en sentidos diferentes, no son sino lo que debería llamarse «fuerza de 100 N». No existen otras fuerzas de 100 N: toda fuerza tiene dos «extremos». Aunque a veces se cree que se trata de una sola fuerza, y no de un par de fuerzas, esto se debe a que su otro «extremo» se localiza muy lejos y por eso «no se ve». Al caer, todo cuerpo experimenta la acción de la fuerza de atracción terrestre; ésta es uno de los «extremos» de la fuerza que interviene en este caso, mientras que el otro, es decir, la atracción de la Tierra por el cuerpo que cae, permanece en el centro del Globo.

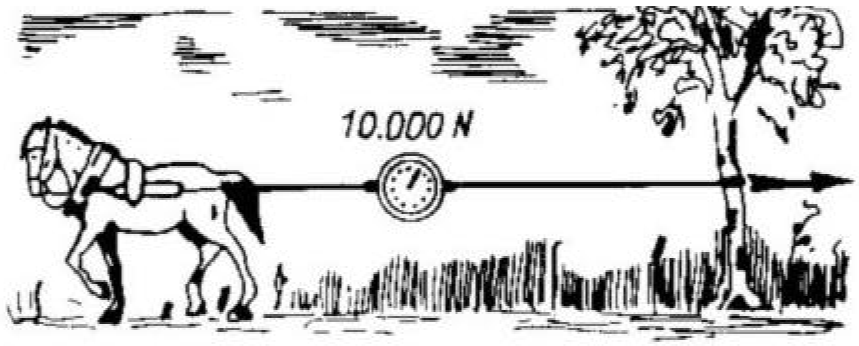
Conque, una cuerda estirada por dos fuerzas contrarias, de 100 N cada una, sufre un esfuerzo de 100 N; mas, cuando se aplica una fuerza de 200 N (en el sentido opuesto se crea el mismo esfuerzo de reacción), el esfuerzo tensor es igual a 200 N.

18. Hemisferios de Magdeburgo

Para realizar su famosa experiencia con los «hemisferios de Magdeburgo» Otto von Guericke unció ocho caballos a cada lado, que tenían que tirar de las semiesferas de metal huecas para separarlas.

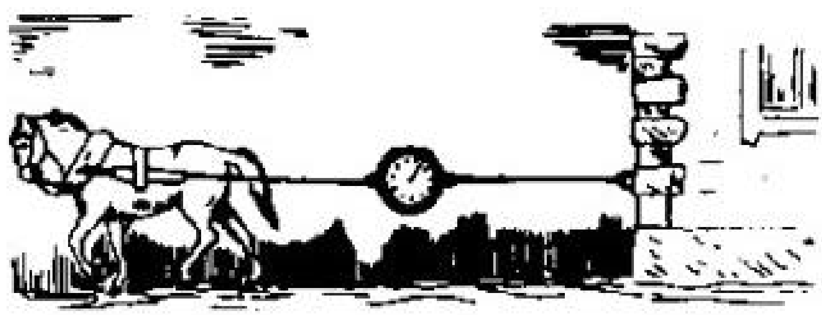
¿Sería mejor sujetar uno de los hemisferios a un muro halando el otro con los dieciséis caballos? ¿Se podría crear un esfuerzo mayor en este caso?

Según la explicación del problema antecedente, en la experiencia de dos hemisferios de Otto von Guericke ocho caballos sobraban.



El dinamómetro indica la fuerza de tracción del caballo o del árbol, y no la suma de ambos esfuerzos

Podrían sustituirse por la resistencia de un muro o del tronco de un árbol suficientemente fuerte.



En este caso la reacción del muro, juega el papel de tracción del tronco del árbol

Con arreglo a la ley de acción y reacción, la fuerza de reacción creada por el muro equivaldría a la de tracción de ocho caballos. Para aumentar el esfuerzo de tracción, habría que ponerlos a tirar en el mismo sentido que los demás. (No se debe creer que en este caso la fuerza de tracción aumentaría al doble: como los esfuerzos no coordinan del todo, la doble cantidad de caballos no provoca una doble tracción, sino menos, aunque su fuerza es mayor que la ordinaria.)

19. La balanza de resorte.

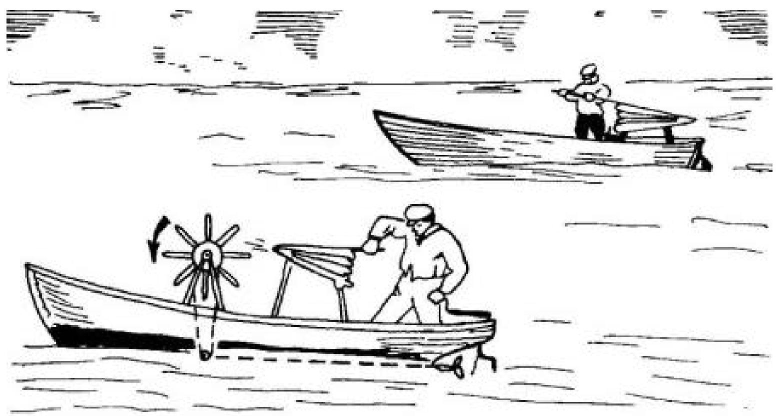
Una persona adulta es capaz de estirar el resorte de una balanza de resorte aplicando un esfuerzo de 100 N, y un niño, de 30 N. ¿Qué magnitud indicará el instrumento si ambos estiran el resorte simultáneamente en sentidos contrarios?

Sería un error afirmar que el fiel de la balanza de resorte debe indicar 130 N, pues el adulto tira del anillo con una fuerza de 100 N, mientras que el niño hala el gancho con uno de 30 N.
Esto no es cierto, pues es imposible solicitar un cuerpo con un esfuerzo de 100 N mientras no hay reacción equivalente. En este caso la fuerza de reacción es la del niño, la cual no excede 30 N; por eso el adulto puede tirar del anillo con un esfuerzo no superior a los 30 N. Por esta razón, el fiel de la balanza indicará 30 N.

Quien considere inverosímil semejante explicación, puede examinar por su cuenta el caso en que el niño sostiene la balanza con una mano sin estirar el resorte: ¿podrá un adulto asegurar en este caso que el fiel del utensilio indique al menos un gramo?

20. El movimiento de una lancha

En una revista de divulgación científica alemana se propusieron dos métodos de aprovechar la energía del chorro de gases para impulsar una lancha, que se muestran esquemáticamente en la figura. ¿Cuál de ellos es más eficaz?



¿Cuál de estos dos procedimientos es más eficaz?

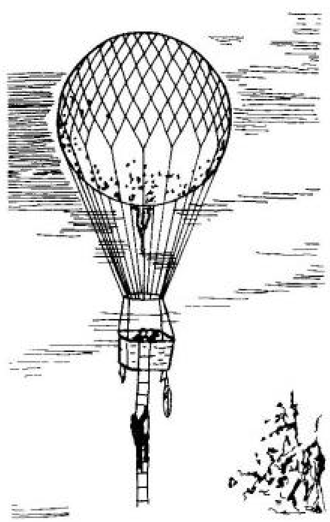
De los dos métodos propuestos sólo conviene el primero, además, a condición de que el fuelle tenga dimensiones adecuadas y que el chorro salga a gran velocidad. En este caso el efecto del fuelle se asemeja al de cohetes colocados en la caja de un camión: al salir el chorro de aire en una dirección, el fuelle y, por tanto, la lancha se desplazarán en sentido opuesto.

El segundo método, consistente en que el chorro de aire impele las paletas de la rueda que a su vez hace girar la hélice en el agua, no sirve para impulsar la embarcación. La causa de ello está a la vista: al salir el chorro de aire hacia adelante, la embarcación retrocederá, mientras que el giro del «motor eólico» la obligará a desplazarse hacia adelante; ambos movimientos, dirigidos en sentidos diferentes, tendrán por resultante el estado de reposo. En suma, este segundo método (en la forma representada en la figura de arriba no difiere en absoluto del procedimiento anecdótico de llenar la vela mediante un fuelle de la figura siguiente.

Un procedimiento anecdótico para impulsar veleros

21. El aeróstato.

De la barquilla de un aeróstato que se mantiene fijo en el aire, pende libremente una escalera de cuerda. Si una persona empieza a subir por ella, ¿hacia dónde se desplazará el globo, hacia arriba o hacia abajo?



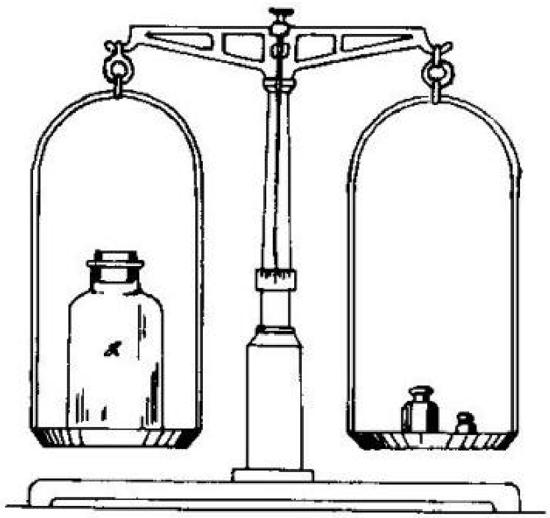
¿En qué sentido se desplazará?

El globo no podrá permanecer en estado de reposo: estará descendiendo mientras la persona sube por la escalera. Sucede lo mismo que cuando alguien se desplaza de un extremo de una lancha ligera a otro: ésta última retrocede bajo el esfuerzo de sus pies. Lo mismo pasa con la escalera de cuerda que, al ser empujada hacia abajo por los pies de la persona que trepa, arrastra al aeróstato hacia la tierra.

Abordando este problema desde el punto de vista de los principios de la mecánica, hemos de razonar de la manera siguiente. El globo con su escalera y la persona que trepa, constituyen un sistema aislado cuyo centro de masas no puede ser desplazado por la acción de las fuerzas

internas. Su posición no cambiará mientras la persona sube por la escalera sólo a condición de que el globo descienda; en otro caso el centro de masas se elevará.
En cuanto a la magnitud de desplazamiento del aeróstato, ésta será tantas veces menor que el de la persona como mayor es su peso en comparación con el de esta última.

22. Una mosca en un tarro de cristal.
En la superficie interior de un tarro de cristal tapado, que está en equilibrio en una balanza sensible, se encuentra una mosca.
¿Qué pasará con la balanza si el insecto abandona su puesto y empieza a volar por el interior del recipiente?



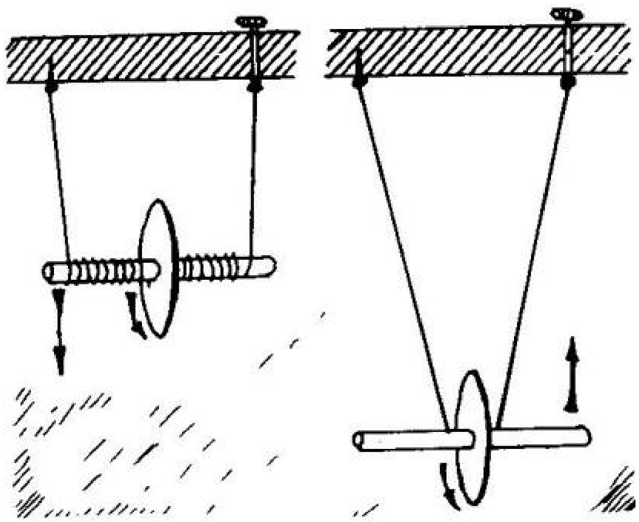
Una mosca atrapada en un el aeróstato tarro.

Cuando la revista científica alemana Umschau publicó esta pregunta, se entabló una discusión acalorada: media docena de ingenieros presentaban las razones más diferentes y empleaban todo un sinfín de fórmulas; sin embargo, no pudieron llegar a una conclusión unánime.
Mas, este problema puede ser resuelto sin valerse de ecuación alguna. A1 desprenderse de la pared del recipiente y mantenerse a un mismo nivel, la mosca presiona sobre el aire agitando sus alitas con una fuerza equivalente al peso de ella misma; esta presión se transmite a las paredes del tarro. Por consiguiente, la balanza debe permanecer en el mismo estado que mientras el insecto estaba posado en la pared.
Así sucede mientras la mosca se mantiene a un mismo nivel. Si ella sube o baja volando dentro del tarro, la balanza sensible deberá moverse un poco. Para determinar hacia dónde se moverá el plato con el tarro, primero supongamos que éste, con la mosca dentro, se encuentra situado en algún punto del Universo. ¿Qué pasará entonces con el recipiente si el díptero empieza a volar? Lo mismo que en el problema 21, donde se trata de un globo aerostático, tenemos un sistema aislado. Si una fuerza interna eleva la mosca, el centro de masas de dicho sistema seguirá en la misma posición mientras el recipiente se desplaza un poco hacia abajo. Al contrario, si el insecto baja aleteando, el tarro deberá subir para que el centro de masas del sistema tarro-mosca permanezca en el mismo punto.

Ahora volvamos a las condiciones reales, de las cuales hemos hecho la abstracción. El recipiente con la mosca no se encuentra en un punto lejano del Universo, sino que está en el plato de una balanza. Está claro que si ella sube, el plato descenderá, y si baja, se elevará.
Hay que agregar que el vuelo de la mosca hacia arriba o hacia abajo debe ser acelerado. Un movimiento uniforme, es decir, por inercia y por tanto sin la intervención de una fuerza, será incapaz de alterar la presión que el recipiente ejerce sobre el plato de la balanza.

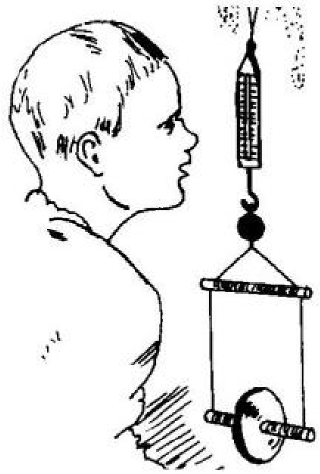
23. El péndulo de Maxwell.

En muchos países es muy popular el juguete llamado «yo-yo», que consiste en un carrete o un disco acanalado de madera u otro material, que se hace descender y ascender mediante un hilo sujeto a su eje. Este juguete no es una novedad, pues se recreaban con él los soldados del ejército de Napoleón y hasta, según afirman los conocedores del asunto, los héroes de los poemas de Homero.



El péndulo de Maxwell

Desde el punto de vista de la mecánica, el «yo-yo» es una versión del conocido péndulo de Maxwell: una pequeña rueda ranurada cae desenrollando dos hilos enrollados en ella y acumula una energía de rotación tan considerable que, una vez extendido todo el hilo, sigue girando y enrollándolo de nuevo y ascendiendo de esa manera. Durante el ascenso, el artefacto aminora el giro como resultado de la transformación de la energía cinética en potencial, se detiene y acto seguido vuelve a caer girando. El ascenso y el descenso de este péndulo se repiten muchas veces hasta que se disipa la reserva inicial de energía convertida en calor a consecuencia del rozamiento.



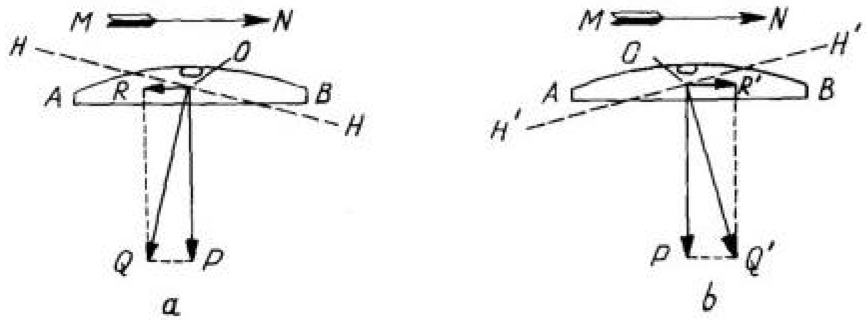
¿Qué indica la balanza de resorte?

Describimos este artefacto para hacer las preguntas que siguen:
Los hilos del péndulo de Maxwell están sujetados a una balanza de resorte. ¿Qué pasa con el fiel del instrumento mientras la rueda sube y baja repetidamente? ¿Permanecerá en reposo en este caso? Si se mueve, ¿en qué sentido lo hará?

Después de familiarizarnos con las explicaciones presentadas en los problemas antecedentes, no habrá que cavilar mucho para responder a esta pregunta. Cuando la rueda baja aceleradamente, el gancho al cual están fijados los hilos, deberá elevarse, puesto que éstos, desenrollándose, no lo arrastran hacia abajo con el mismo esfuerzo que antes; mas, cuando sube con deceleración, tiende el hilo que se enrolla en ella, y ambos arrastran el gancho hacia abajo. En suma, el gancho y la rueda sujetada a él se moverán uno al encuentro de otro.

24. Un nivel de burbuja en un vagón.
Viajando en un tren, ¿se podría utilizar el nivel de burbuja para determinar la pendiente de la vía?

Durante la marcha, la burbuja del utensilio realiza movimiento de vaivén; este criterio no es muy seguro para juzgar acerca de la pendiente de la vía, puesto que ésta no condiciona el movimiento de la burbuja en todos los casos. Al arrancar el tren, mientras el movimiento es acelerado, y al frenar, cuando es decelerado, la burbuja se desplazará a un lado aun cuando la vía sea estrictamente horizontal. Y sólo si el tren avanza uniformemente y sin aceleración, su posición indicará ascenso o descenso de la vía.
Para entenderlo mejor, examinemos dos dibujos. Supongamos que AB (en la figura, a) es el nivel de burbuja y P, su peso mientras el tren está parado. Este último arranca y empieza a marchar por un tramo horizontal según indica la flecha MN, o sea, avanza con aceleración.



.Desviación de la burbuja de un nivel en un vagón en marcha

El plano de apoyo sobre el cual está colocado el nivel, tiende hacia adelante, por lo que el utensilio tiende a deslizarse hacia atrás. La fuerza que provoca el retroceso del nivel en sentido horizontal, se representa mediante el vector OR. La resultante Q de las fuerzas P y R lo apretará contra el plano de apoyo, actuando sobre el líquido como su peso. Para el nivel, la línea de aplomo coincide con OQ, por consiguiente, el plano horizontal se desplazará provisionalmente a HH. Es obvio que la burbuja de nivel se moverá hacia el extremo B, elevado un poco respecto del nuevo plano horizontal. Esto ocurre en tramos estrictamente horizontales. Cuando el tren desciende por una pendiente, el nivel puede indicar equivocadamente que la vía es horizontal e incluso ascendente, según sean la magnitud de la pendiente y la aceleración del tren.

Cuando éste comienza a frenar, cambia la posición de las fuerzas. Ahora (en la figura, b) el plano de apoyo tiende a rezagarse del utensilio, sobre el cual empieza a actuar la fuerza R' empujándolo hacia adelante; si no existiera rozamiento, esta fuerza lo obligaría a deslizarse hacia la pared delantera del coche. En este caso la resultante Q' de las fuerzas P y R' estará dirigida hacia adelante; el plano horizontal ocupará provisionalmente la posición H'H', y la burbuja se desplazará hacia el extremo A, aunque el tren marche por un tramo horizontal.

En definitiva, cuando el movimiento es acelerado, la burbuja abandona la posición central. El nivel indicará «ascenso» mientras el tren marche con aceleración por un tramo horizontal, e indicará «descenso» cuando marche con deceleración por el mismo tramo. Las indicaciones del nivel son normales mientras no haya aceleración (positiva o negativa).

Tampoco podemos fiarnos del nivel de burbuja para determinar el grado de inclinación transversal de la vía viajando en un tren: el efecto centrífugo sumado a la fuerza de la gravedad en los tramos curvos podrá motivar indicaciones falsas.

25. Desviación de la llama de la vela.

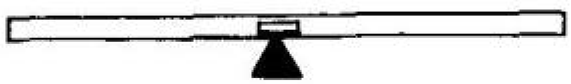
a) Al empezar a trasladar una vela encendida de un sitio a otro de un cuarto, en un primer instante la llama se desvía hacia atrás. ¿Hacia dónde se moverá si la vela que se traslada está dentro de un farol?

b) ¿Hacia dónde se desviará la llama, dentro del farol, si una persona lo mueve circularmente alrededor suyo sujetándolo con el brazo extendido?

a) Los que piensen que la llama de una vela colocada en un farol cerrado no se desvía al desplazarlo, andan equivocados. Haga usted una prueba con una cerilla encendida y se dará cuenta de que se desvía hacia adelante, y no hacia atrás, al moverla protegiendo con la mano contra el flujo de aire. La llama se desvía porque es menos densa que el ambiente. Una misma fuerza imprime mayor aceleración a un cuerpo de masa menor que a otro de masa mayor. Por

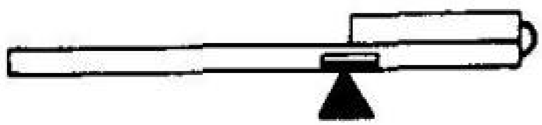
esta razón, como la llama que se traslada dentro del farol se desplaza más de prisa que el aire, se desvía hacia adelante.
b) La misma causa, o sea, la densidad menor de la llama en comparación con el ambiente, explica su comportamiento inesperado al mover el farol circularmente: ella se desvía hacia dentro, y no hacia fuera como se podría suponer. Todo queda claro si recordamos qué posiciones ocuparán el mercurio y el agua contenidos en un recipiente esférico que gira en una centrifugadora: el mercurio se sitúa más lejos del eje de rotación que el agua; esta última parece emerger a flor de mercurio, si consideramos que «abajo» es el sentido contrario al eje de rotación (es decir, la dirección en que se proyectan los cuerpos bajo la acción del efecto centrífugo). A1 mover circularmente el farol, la llama, por ser más ligera que el ambiente, «emerge» hacia «arriba», o sea, se dirige hacia el eje de rotación.

25. Una varilla doblada.
Una varilla homogénea, apoyada por el punto medio, está en equilibrio.



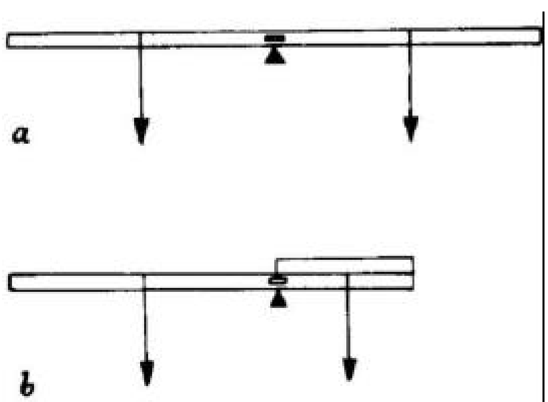
La varilla está en equilibrio

¿Cuál de sus mitades bajará si el brazo derecho se dobla?



¿Se conservará el equilibrio?

El lector que esté dispuesto a contestar que la varilla permanecerá en equilibrio después de doblarla, anda equivocado. Puede ser que a primera vista parezca que sus dos mitades, de peso igual, deben equilibrarse. Mas, ¿acaso los pesos iguales dispuestos en los extremos de una palanca se equilibran siempre?

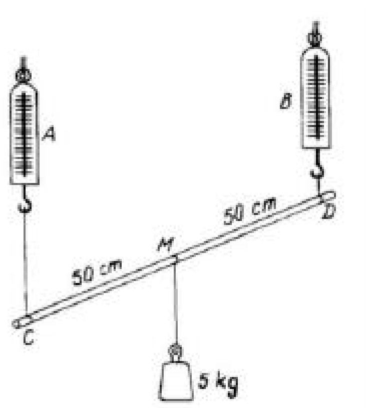


La varilla recta está en equilibrio, mientras que la doblada no lo está

Para equilibrarlos se requiere que la razón de sus magnitudes sea inversa a la de los brazos. Los brazos de la varilla recta eran iguales, pues el peso de cada mitad estaba aplicado a su punto medio; por ello, los pesos iguales estaban en equilibrio. Pero al doblar la parte derecha de la varilla, el respectivo brazo de la palanca se redujo a la mitad en comparación con el otro. Esto se debe precisamente a que los pesos de las mitades de la varilla son iguales; ahora éstos no están en equilibrio: la parte izquierda tiende hacia abajo, debido a que su peso está aplicado a un punto que dista del de apoyo dos veces más que el de la parte derecha . De este modo el brazo largo hace elevarse al doblado.

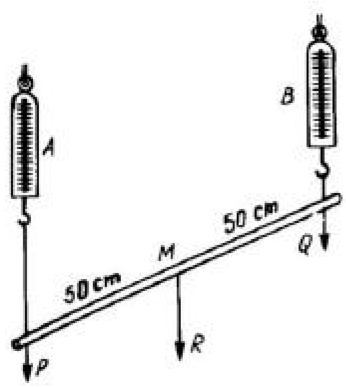
26. Dos balanzas de resorte.

¿Cuál de las dos balanzas de resorte que sostienen la varilla CD en posición inclinada, indicará la carga mayor?



¿Cuál de las dos balanzas sostiene mayor carga?.

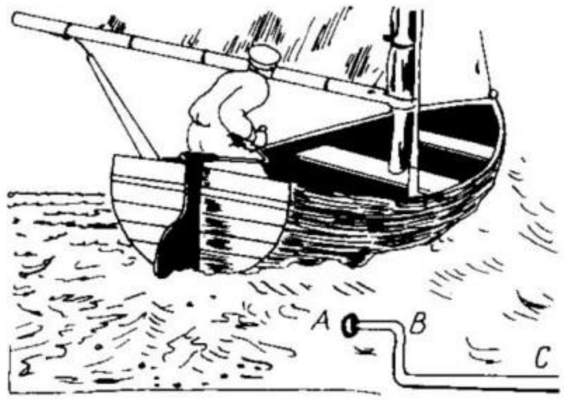
Las dos balanzas de resorte indicarán una misma carga, de 25 N. Es muy fácil percatarse de esto descomponiendo el peso R de la carga en dos fuerzas, P y Q, aplicadas, respectivamente, a los puntos C y D. Como MC = MD, resulta que P = Q. La inclinación de la varilla no altera la igualdad de estas dos fuerzas.



Ambos dinamómetros están extendidos de forma igual, puesto que P = Q = ½R

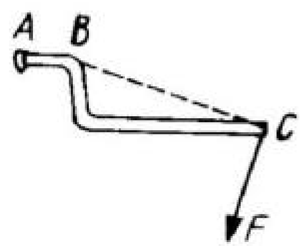
27. Una palanca.

Una palanca ingrávida tiene su punto de apoyo en B. Se pide elevar el peso A con el menor esfuerzo posible. ¿En qué sentido hay que empujar el extremo C de la palanca?



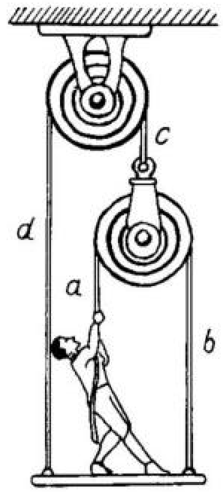
El problema de la palanca curvada

La fuerza F (fig. de abajo) debe ser perpendicular respecto de la línea BC; en este caso su brazo será máximo y, por consiguiente, para obtener el momento estático requerido será suficiente una fuerza mínima.



28. En una plataforma.

Una persona de 60 kg de peso (600 N) se encuentra sobre una plataforma de 30 kg (300 N), suspendida mediante cuatro cuerdas que pasan por unas poleas como muestra la figura. ¿Con qué fuerza la persona debe tirar del extremo de la cuerda a para sostener la plataforma donde se encuentra?



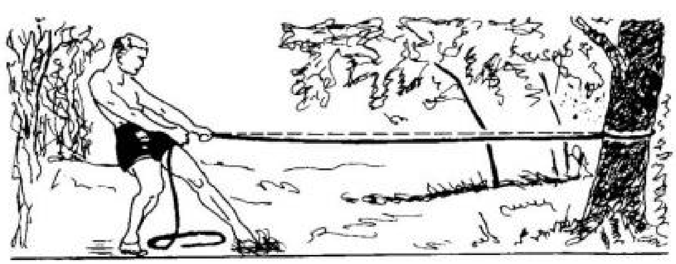
¿Qué esfuerzo hay que aplica para sostener la plataforma?

Se puede determinar la magnitud del esfuerzo buscado razonando de la manera siguiente. Supongamos que una persona está tirando de la cuerda a con una fuerza de x N. La tensión de la soga a, así como la de b (esta última prolonga a) será, evidentemente, x.
¿Cuál será la tensión de la soga c? Ésta equilibra la acción conjunta de dos fuerzas paralelas, x y x; por lo tanto, vale 2x. La porción d que prolonga c, debe de tener la misma tensión.
La plataforma cuelga de dos cuerdas, b y d. (La cuerda a no está fijada a ella, por lo cual no la sostiene.) La tensión de b vale x N, y la de d, 2x N. La acción conjunta de estas dos fuerzas paralelas que suman 3x N, deberá equilibrar la carga de 600 + 300 = 900 N (el peso del pasajero más el de la plataforma). Por lo tanto, 3x = 900 N, de donde se obtiene

$$X = 300N.$$

29. La catenaria.

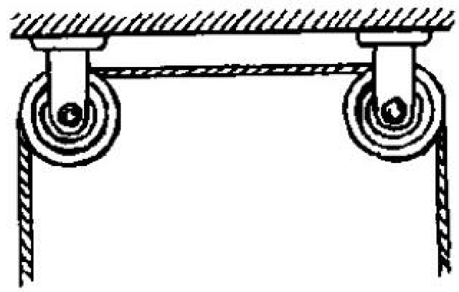
¿Qué esfuerzo hay que aplicar a una soga tendiéndola para que no se curve?



¿Cómo hay que tender la cuerda para que no forme comba (ej. 30)?

Por muy tensa que esté la cuerda, se combará inevitablemente. La fuerza de la gravedad que provoca la combadura, está dirigida a plomo, en tanto que el esfuerzo tensor no lo está. Estas dos fuerzas no podrán equilibrarse mutuamente, o sea, su resultante no se anulará. Precisamente esta última provoca la combadura de la cuerda.

Ningún esfuerzo, por muy grande que sea, es capaz de tender una cuerda de forma completamente recta (salvo el caso en que esté tendida en sentido vertical).



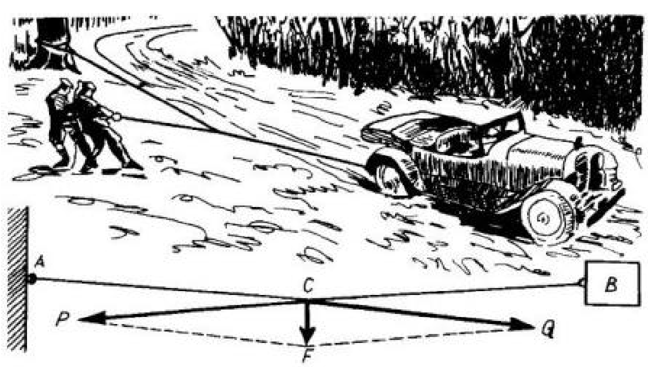
Es imposible tender la cuerda entre las poleas de modo que no se combe

La combadura es inevitable; es posible disminuir su magnitud hasta cierto grado, pero es imposible anularla. Conque, toda soga que no esté tendida verticalmente y toda correa de transmisión deberá formar comba.

30. Un coche atascado.

Para sacar un vehículo de un bache se obra de la siguiente manera. Un cabo de una soga larga y resistente se sujeta al vehículo y el otro, al tronco de un árbol o tocón situado al borde del camino, de modo que la soga esté lo más tensa posible. A continuación se tira de ésta bajo un ángulo de 90° respecto a la misma, sacando el automóvil del bache.
¿En qué principio está basado este método?

A menudo basta el esfuerzo de una sola persona para rescatar un vehículo pesado valiéndose de este método elemental, descrito al plantear el problema. Una cuerda, cualquiera que sea el grado de su tensión, cederá a la acción de una fuerza aunque sea moderada, aplicada bajo cierto ángulo a su dirección. La causa es la misma, o sea, la que obliga a combarse cualquier cuerda tendida. Por esta misma razón es imposible colgar una hamaca de manera que sus cuerdas estén en posición estrictamente horizontal.



Como se saca un vehículo del bache

Las fuerzas que se creen en este caso se representan en la figura. La de tracción CF de la persona se descompone en dos, CQ y CP, dirigidas a lo largo de este elemento. La fuerza CQ tira del tocón y, si éste es lo suficientemente seguro, se anula por su resistencia. La fuerza CP, en cambio, hala el vehículo y, como supera muchas veces a CE puede sacar el automóvil del bache. La ganancia de esfuerzo será tanto mayor cuanto mayor sea el ángulo PCQ, es decir, cuanto más tensa esté la soga.

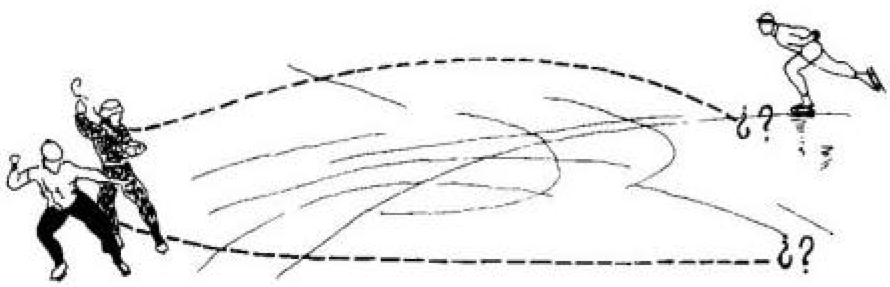
31. El rozamiento y la lubricación.

Consta que la lubricación disminuye el rozamiento. ¿Cuántas veces?

La lubricación disminuye el rozamiento unas diez veces.

32. ¿Volando por el aire o deslizando por el hielo?

Para proyectar un pedazo de hielo a la mayor distancia posible, ¿hay que lanzarlo por el aire o deslizarlo por la superficie de otro hielo?



Para el problema de dos trozos de hielo.

Se podría suponer que un cuerpo se proyecta a mayor distancia siendo arrojado por el aire que deslizándose por el hielo, puesto que la resistencia del aire es menor que el rozamiento contra el hielo. Pero esta conclusión es errónea, pues no considera el hecho de que la fuerza de la gravedad desvía hacia la tierra la trayectoria del cuerpo arrojado, en vista de lo cual su alcance no puede ser muy considerable.

Vamos a hacer el cálculo partiendo, para simplificar, de que la resistencia del aire es nula. En efecto, ésta es ínfima para la velocidad que una persona puede comunicar a un objeto. El alcance de los objetos arrojados en el vacío bajo cierto ángulo respecto al horizonte es máximo cuando dicho ángulo vale 45°. Además, según afirman los textos de mecánica, el alcance se define mediante la fórmula siguiente:

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

donde v es la velocidad inicial, y g, la aceleración de la gravedad. Pero si un cuerpo se desliza por la superficie de otro (en este caso por el hielo), la energía cinética $mv^2/2$, comunicada a él, se invierte en superar el trabajo de la fuerza de rozamiento, f, igual a μmg, donde μ es el coeficiente de rozamiento, y mg (el producto de la masa del cuerpo por la aceleración de la gravedad), el peso del proyectil. En el trayecto L' la fuerza de rozamiento realiza un trabajo $\mu mgL'$. Haciendo uso de la ecuación

$$mv^2 /2 = \mu mgL'$$

determinamos el alcance L' del trozo de hielo lanzado:

$$L' = \frac{v^2}{2mg}$$

Adoptando el coeficiente de rozamiento del hielo contra el hielo igual a 0,02, obtenemos:

$$L' = \frac{25v^2}{g}$$

A propósito, si un trozo de hielo se arroja por aire, su alcance será v^2/g, es decir, 25 veces menor. Así pues, un trozo de hielo deslizado por la superficie de otro hielo se proyectará a una distancia 25 veces mayor que al volar por el aire.

33. Dados trucados.

A veces, los jugadores a los dados inyectan plomo en los dados para asegurar que caiga el número deseado. ¿En qué se basa esta artimaña?

Los jugadores que inyectan plomo en los dados, por lo visto, suponen que si un lado de la pieza se hace más pesado, siempre quedará abajo. Andan equivocados.

Al caer un dado desde una altura no muy considerable, la resistencia del aire no influye notablemente en su velocidad de caída; en un medio que no opone resistencia a la caída, los cuerpos caen con aceleración igual. Por ello, la pieza no se volteará en el aire. Así pues, esta artimaña de los jugadores poco escrupulosos no sirve para nada.

Se preguntará, entonces, ¿por qué un cuerpo que gira sobre un eje horizontal queda con su parte más pesada abajo? En este caso no se trata de la caída libre de un cuerpo, sino de otras condiciones de acción de las fuerzas, por lo cual el resultado es distinto.

El equívoco de los jugadores que trucan los dados es un error bastante frecuente y está motivado por nociones muy rudimentarias de mecánica. En esta relación viene a la mente la teoría sostenida por un «descubridor» que atribuía la rotación del globo terrestre al hecho de que toda la humedad evaporada en su parte «diurna» se acumula en la parte «nocturna»; a consecuencia de esto, según afirmaba, el hemisferio oscuro se vuelve más pesado y el Sol lo atrae con más fuerza que al hemisferio alumbrado, provocando de este modo la rotación del planeta.

34. La caída de un cuerpo.

¿Qué distancia recorre un cuerpo en caída libre mientras suena un «tictac» del reloj de bolsillo?

Un «tictac» del reloj de bolsillo no dura un segundo, como se suele creer muchas veces, sino sólo 0,4 s. Por tanto, el trayecto que el cuerpo recorre en este intervalo de tiempo cayendo libremente, equivale a

$$\frac{9.8 * 0.4^2}{2} = 0.784m$$

es decir, a unos 80 cm.

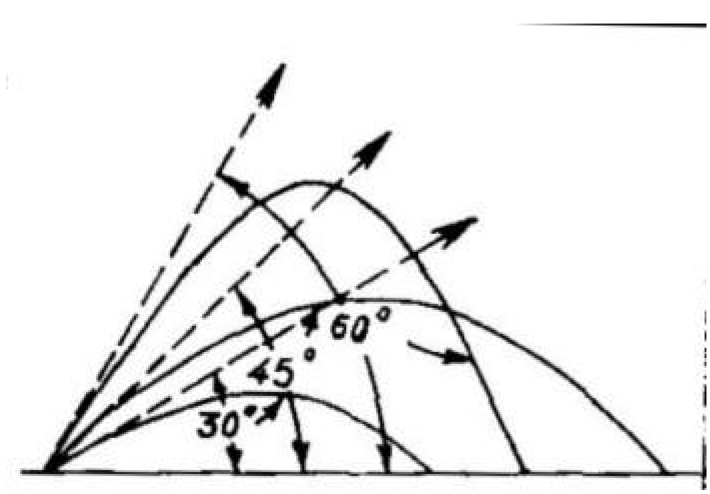
35. ¿Hacia dónde hay fue lanzar la botella?
¿Hacia dónde hay que lanzar la botella desde un vagón en marcha para que sea mínimo el riesgo de romperla al chocar con la tierra?

Como se corre menor peligro saltando hacía adelante de un vagón en marcha, puede parecer que la botella chocará con el suelo más suavemente si se la tira hacia adelante. Esto no es cierto: para atenuar el choque hay que arrojar los objetos en dirección contraria a la que lleva el vagón.
En este caso la velocidad imprimida a la botella al lanzarla, se sustrae de la que ella tiene a consecuencia de la inercia, por lo cual su velocidad en el punto de caída será menor. Si arrojamos la botella hacia adelante, sucederá lo contrario: las velocidades se sumarán y el impacto será más fuerte.
El hecho de que para las personas sea menos peligroso saltar hacia adelante, y no hacia atrás, se explica de otra manera: nos herimos y magullamos menos si caemos hacia adelante y no hacia atrás.

36. Un objeto arrojado desde un vagón.
¿En qué caso un objeto arrojado desde un vagón tarda menos en alcanzar el suelo, cuando el vagón está en marcha o en reposo?

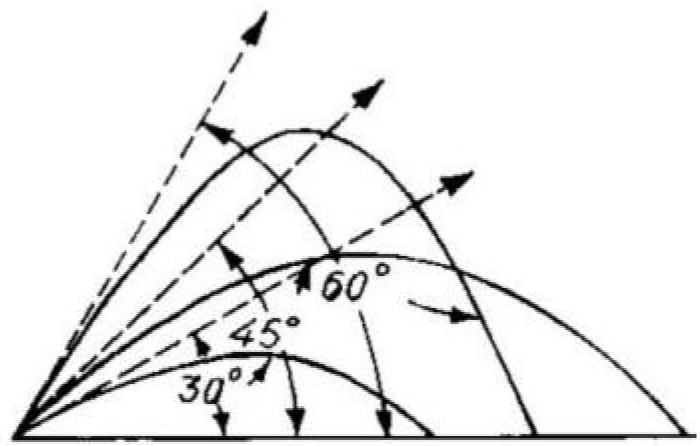
Un cuerpo lanzado con cierta velocidad inicial (no importa en qué dirección) está sujeto a la misma fuerza de la gravedad que otro que cae sin velocidad inicial. La aceleración de caída de ambos cuerpos es igual, por lo que los dos caerán al suelo simultáneamente. Por esta razón, un objeto arrojado desde un vagón en marcha tarda el mismo tiempo en alcanzar la tierra que otro arrojado desde un vagón en reposo.

37. Tres proyectiles.
Se lanzan tres proyectiles desde un mismo punto bajo diferentes ángulos respecto del horizonte: de 30°, 45° y 60°. En la figura de abajo se representan sus trayectorias (en un medio que no ofrece resistencia). ¿Es correcto el dibujo?



¿Es correcto el dibujo?

El dibujo no está bien hecho. El alcance de los proyectiles lanzados bajo ángulos de 30° y 60° debe ser igual (como para todos los ángulos complementarios). En la figura siguienteesta circunstancia no se aprecia.

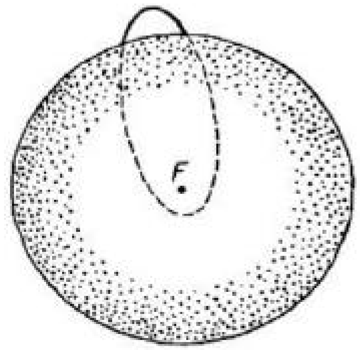


Por lo que atañe al proyectil lanzado bajo un ángulo de 45°, su alcance será el máximo; en la figura este hecho está representado correctamente. El alcance máximo debe superar cuatro veces la altura del punto más elevado de la trayectoria, lo cual también se muestra en la figura (en forma aproximada).

38. La trayectoria de un cuerpo lanzado.

¿Qué forma tendría la de un cuerpo lanzado 30° bajo un ángulo respecto del horizonte si el aire no le opusiera resistencia durante el vuelo?

En los libros de texto de física se afirma frecuentemente, además, sin ninguna reserva, que un cuerpo lanzado en el vacío bajo cierto ángulo respecto al horizonte, sigue una parábola. Muy raras veces se añade que el arco de la parábola sólo es una representación aproximada de la trayectoria real del proyectil; esta observación es cierta en el caso de velocidades iniciales pequeñas, es decir, mientras éste no se aleja demasiado de la superficie terrestre y por tanto se puede hacer caso omiso de la disminución de la fuerza de la gravedad.
Si el cuerpo se proyectara en un espacio con fuerza de la gravedad constante, su trayectoria sería estrictamente parabólica. En las condiciones reales, en cambio, cuando la fuerza atractiva disminuye en función de la distancia con arreglo a la ley de los mínimos cuadrados, el móvil debe obedecer a las leyes de Kepler y, por consiguiente, seguirá una elipse cuyo foco se localizará en el centro de la Tierra.



El cuerpo lanzado bajo un ángulo respecto al horizonte, deberá seguir en el vacío deberá seguir un arco de elipse, cuyo foco F se localizará en el centro del planeta

O sea, todo cuerpo lanzado en el vacío desde la superficie terrestre bajo cierto ángulo al horizonte, no deberá seguir un arco de parábola, sino uno de elipse. Estos dos tipos de trayectorias de proyectiles no se diferencian mucho entre sí. Mas, en el caso de los cohetes de propelente líquido es imposible suponer, ni mucho menos, que fuera de la atmósfera terrestre su trayectoria sea parabólica.

39. La velocidad mínima del obús.

Los artilleros suelen afirmar que el obús tiene la velocidad máxima fuera del cañón, y no dentro de éste. ¿Es posible esto? ¿Porqué?

La velocidad del obús debe aumentar todo el tiempo mientras la presión que los gases de la pólvora ejercen sobre él supere la resistencia del aire en su parte frontal. Mas, la presión de los gases no cesa al salir ese proyectil por la boca del cañón: ellos siguen impulsándolo con cierta fuerza; en los primeros instantes esta última supera la resistencia del aire. Por consiguiente, la velocidad del obús deberá crecer durante algún tiempo.

Cuando la presión de los gases de la pólvora en el espacio, fuera del cañón, sea inferior a la resistencia del aire (a consecuencia de la expansión), esta última magnitud empezará a superar el empuje que los gases ejercen sobre el obús por la parte posterior, a consecuencia de lo cual éste irá decelerándose. De modo que su velocidad no será máxima dentro del cañón, sino fuera de él y a cierta distancia de su boca, es decir, poco rato después de salir por ella.

40. Saltos al agua.

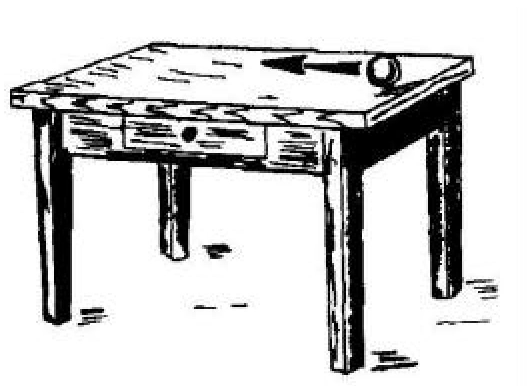
¿Por qué es peligroso saltar al agua desde gran altura?

Es peligroso saltar al agua desde gran altura porque la velocidad acumulada durante la caída se anula en un espacio muy pequeño. Por ejemplo, supongamos que una persona salta desde una altura de 10 m y se zambulle a un metro. La velocidad acumulada a lo largo de ese trayecto de caída libre se anula en un trecho de 1 m. Al entrar en el agua, la deceleración, o aceleración negativa, debe de superar diez veces la aceleración de caída libre. Por tanto, una vez en el agua, se experimenta cierta presión ejercida desde abajo; ésta es diez veces superior a la presión corriente creada por el peso del cuerpo de la persona. En otras palabras, el peso del cuerpo «se decuplica»: en vez de 700 N es de 7000 N. Semejante sobrepeso, aunque actúe durante corto tiempo (mientras la persona se zambulle), puede causar graves perjuicios.

A propósito, de este hecho se infiere que las consecuencias del salto al agua desde gran altura no son tan graves si el hombre se zambulle a mayor profundidad; la velocidad acumulada durante la caída «se disipa» en un trecho más largo, por lo cual la deceleración se aminora.

41. Al borde de la mesa.

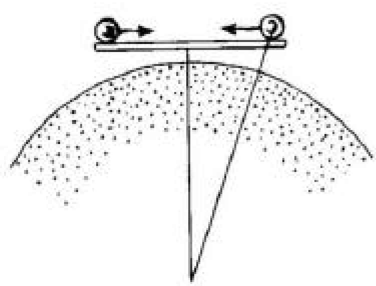
Una bola se halla al borde de una mesa cuyo plano es perpendicular al hilo de plomada.



¿Permanecerá en reposo la bala? ¿No le parece, al mirar la figura, que la bola debería desplazarse hacia el centro de la mesa?

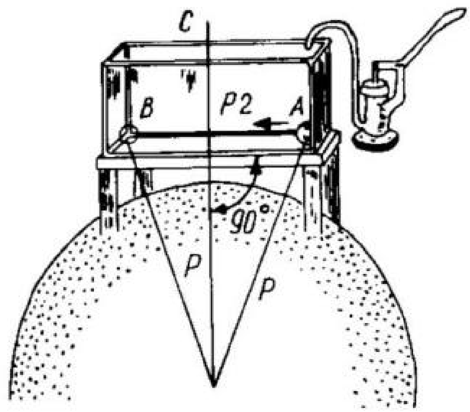
¿Seguiría en reposo este cuerpo si no hubiera rozamiento?

Si la tapa de la mesa es perpendicular al hilo de plomada que pasa por su punto medio, sus bordes estarán por encima del centro de este mueble.
Por esta razón, en ausencia de rozamiento, la bola deberá desplazarse del borde de la mesa hacia su centro.



El dibujo muestra que la bola no puede seguir en reposo (si no existe rozamiento)

No obstante, en este caso ella no podrá detenerse exactamente en el centro, pues la energía cinética acumulada la llevará más allá de éste, hasta un punto dispuesto al mismo nivel que el de partida, es decir, hasta el borde opuesto. La bola retrocederá de este último volviendo a la posición inicial, etc. En suma, si no existieran el rozamiento contra el plano de la mesa ni la resistencia del aire, la bola colocada al borde de una mesa perfectamente plana oscilaría constantemente.
Un norteamericano propuso un proyecto para aprovechar este efecto a fin de crear un móvil perpetuo.

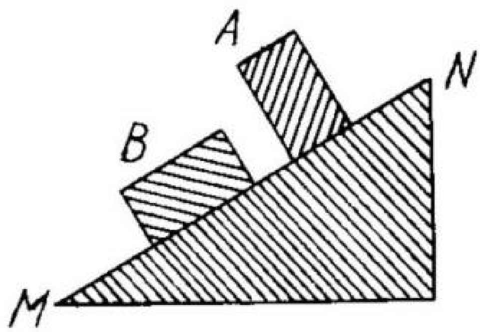


Uno de los proyectos de «movimiento continuo»

El mecanismo, representado en la figura de arriba, en principio, es correcto y estaría en movimiento perpetuamente si lograra evitar el rozamiento. Se podría materializar la misma idea de una manera mucho más sencilla, a saber, mediante un peso oscilante suspendido de un hilo: si no hubiera rozamiento en el punto de suspensión (ni resistencia por parte del aire), el peso podría oscilar eternamente[5]. No obstante, tales dispositivos serían incapaces de realizar algún trabajo.

42. En un plano inclinado.

Un bloque que parte de la posición B desciende por el plano inclinado MN venciendo el rozamiento. ¿Podemos estar seguros de que también se deslizará partiendo de A (si no se voltea)?

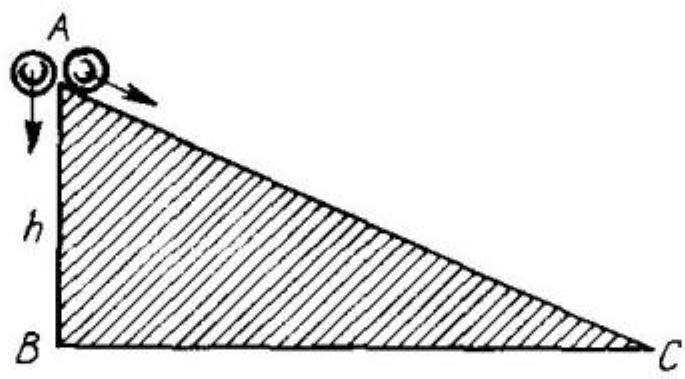


No se crea que en la posición A el bloque que ejerce una presión específica mayor sobre el plano de apoyo, también experimenta un rozamiento mayor. La magnitud de rozamiento no depende de las dimensiones de las superficies en fricción. Por lo tanto, si el bloque desciende superando el rozamiento en la posición B, también lo hará en A.

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

43. Dos bolas.

Dos bolas parten del punto A situado a una altura h sobre un plano horizontal: una baja por la pendiente AC, mientras que la otra cae libremente por la línea AB. ¿Cuál de ellas tendrá la mayor velocidad de avance al terminar su recorrido?



A1 resolver este problema, a menudo se suele cometer un error grave: se desprecia el hecho de que la bola que cae a plomo sólo se mueve progresivamente, mientras que la que rueda por la superficie, además de realizar traslación, también está en movimiento rotatorio.
El efecto de esta circunstancia sobre la velocidad del cuerpo que rueda, se explica mediante el cálculo siguiente.
La energía potencial de la bola, debida a su posición en la parte alta del plano inclinado, se convierte totalmente en energía de traslación al caer la bola verticalmente; la ecuación

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

proporciona la velocidad v que este objeto tiene al término de su recorrido:

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

donde h es la altura del plano inclinado.
Es distinto el caso de la bola que desciende por la superficie inclinada: la misma energía potencial mgh se transforma en la suma de dos energías cinéticas, es decir, en la energía de traslación con velocidad v y del movimiento giratorio con velocidad w. La magnitud de la primera energía vale

$$\frac{mv_1^2}{2}$$

La otra es igual al semiproducto del momento de inercia J de la bola por su velocidad angular w a la segunda potencia:

$$\frac{Jw^2}{2}$$

De modo que se obtiene la ecuación siguiente:

$$mgh = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{Jw^2}{2}$$

Consta que el momento de inercia J de una bola homogénea (de masa m y radio R) respecto al eje que pasa por su centro, es igual a 2/5 mR^2. Es fácil comprender que la velocidad angular w de semejante bola que desciende por el plano inclinado con una velocidad de avance v_1 , es v_1/R. Por lo tanto, la energía de movimiento giratorio será

$$0.2px^2h + 11.3 * \left(pR^2h - px^2h\right) = 2.7pR^2h$$

La suma de las dos energías vale

$$0.2px^2h = 0.2p * 0.77R^2h = 0.154pR^2h$$

Por consiguiente, la velocidad de traslación valdrá

$$2.7pR^2h - 0.154pR^2h = 2.55pR^2h$$

Comparando esta magnitud con la que se tiene al final de la caída a plomo ($v = \sqrt{2gh}$) nos daremos cuenta que se diferencian notablemente: al terminar su recorrido por el plano, la segunda bola tiene una velocidad en un 16% menor que la otra que cae libremente desde la misma altura. Los que conocen la historia de la física, saben que Galileo descubrió las leyes de caída de los cuerpos realizando experiencias con bolas dejándolas rodar por un conducto inclinado (de 12 codos de longitud; la elevación de un extremo respecto a otro era de 1 a 2 codos). Después de leer lo que acabamos de exponer, se podría poner en duda el método utilizado por este sabio. Sin embargo, las dudas se disipan en seguida si recordamos que la bola que rueda, está en movimiento progresivo uniformemente acelerado, pues en cada uno de los puntos de la vía inclinada su velocidad equivale a la misma parte (0,84) de la de su gemela que cae, con respecto a este mismo nivel. El carácter de la dependencia entre el camino recorrido y el tiempo es el mismo que en el caso del cuerpo que cae libremente. Por ello, Galileo logró determinar correctamente las leyes de caída de los cuerpos realizando sus experiencias con el conducto inclinado.

«Dejando rodar la bola por un trayecto igual a un cuarto de la longitud del conducto -apostilla Galileo- me di cuenta que el tiempo de recorrido era exactamente igual a la mitad del necesario para rodar de un extremo del conducto a otro... Realicé esta experiencia un centenar de veces y me fijé en que los tramos recorridos siempre se relacionan entre sí como los respectivos intervalos de tiempo a la segunda potencia.»

44. Dos cilindros.

Dos cilindros tienen masa y aspecto exterior iguales. Uno es de aluminio de una sola pieza, en tanto que el otro es de corcho y con envoltura de plomo. Por fuera ambos están cubiertos de papel que no se debe quitar. ¿De qué modo se podría determinar, qué cilindro es sólo de aluminio y cuál es compuesto?

El método que se ha de utilizar para resolver este problema lo sugiere el análisis del precedente. Es notorio que lo más fácil es distinguir los cilindros a base de sus respectivos momentos de inercia: el del cilindro de aluminio difiere del de su gemelo compuesto, en el cual el grueso de la masa se encuentra en la parte periférica. Por consiguiente, serán diferentes sus velocidades de traslación al descender por una superficie inclinada.
Según afirma la mecánica, el momento de inercia J del cilindro homogéneo respecto a su eje longitudinal es

$$J = \frac{mR^2}{2}$$

Para el otro cilindro, no homogéneo, el cálculo es más complejo. En primer lugar, vamos a determinar el radio y la masa de su núcleo de corcho. Designemos el radio incógnito por x (el de todo el cilindro sigue denotado por R) y la altura de los cilindros por h, teniendo en cuenta que la densidad (g/cm^3) de los materiales es diferente: la del corcho es de 0,2, la del plomo, 11,3 y la del aluminio, 2,7, respectivamente; de modo que obtendremos la siguiente igualdad:

$$0.2px^2h + 11.3 * \left(pR^2h - px^2h\right) = 2.7pR^2h$$

Ésta significa que la suma de las masas de la parte de corcho y su envoltura de plomo equivale a la masa del cilindro de aluminio. Después de simplificar, la ecuación tendrá la forma siguiente:

$$11,1x^2 = 8,6\ R^2$$

de donde

$$x^2 = 0.77R^2$$

A continuación nos hará falta precisamente el valor de x^2, por eso no extraemos la raíz.
La masa del núcleo de corcho del sólido compuesto es

$$0.2px^2h = 0.2p * 0.77R^2h = 0.154pR^2h$$

Su envoltura de plomo tiene una masa igual a

$$2.7pR^2h - 0.154pR^2h = 2.55pR^2h$$

Con respecto a la masa de todo el cilindro, esta magnitud constituye el 6 % de la parte de corcho y el 94 % de la de plomo.
Ahora calculemos el momento de inercia J1 del cilindro compuesto; éste equivale a la suma de momentos de cada una de sus partes, o sea, del cilindro de corcho y de la capa de plomo.

El momento de inercia del cilindro de corcho, de radio x y masa 0,06m (donde m es la masa del cilindro de aluminio), es igual a

$$\frac{Mx^2}{2} = \frac{0.06m * 0.77R^2}{2} = 0.0231mR^2$$

El momento de inercia de la envoltura cilíndrica de plomo de radios x y R y masa 0,94m es

$$M\frac{x^2 + R^2}{2} = 0.94m * \frac{0.77R^2 + R^2}{2} = 0.832mR^2$$

Por consiguiente, el momento de inercia J_1 del sólido compuesto será igual a

$$J_1 = 0.0231mR^2 + 0.832mR^2 \approx 0.86mR^2$$

La velocidad de movimiento progresivo de los cilindros que ruedan por una superficie, se determina del mismo modo que en el problema anterior, de dos bolas. Para la bola homogénea tenemos la ecuación siguiente:

$$mgh = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_1^2}{4}$$

o bien la ecuación

$$gh = \frac{3v_1^2}{4}$$

de donde

$$v = \sqrt{\frac{4gh}{3}} \approx 11.3\sqrt{h}$$

Para el cilindro heterogéneo tenemos:

$$mgh = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{0.86mR^2v_2^2}{2R^2}$$

o bien

$$gh = 0.5v_2^2 + 0.43v_2^2 = 0.93v_2^2$$

Si comparamos las dos velocidades

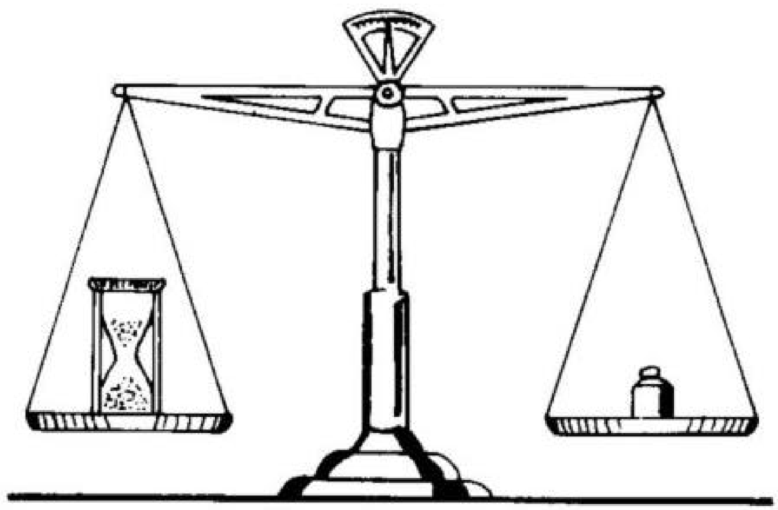
$$v_1 = 0.8\sqrt{2gh} \quad v_2 = 0.73\sqrt{2gh}$$

advertiremos que la de movimiento progresivo del cilindro compuesto es un 9% menor que la del homogéneo. Este hecho ayuda a distinguir el cilindro de aluminio que alcanzará el borde del plano antes que el compuesto.

Proponemos al lector examinar por su cuenta otra versión del mismo problema, a saber, cuando el cilindro compuesto tiene un núcleo de plomo y una envoltura de corcho. ¿Cuál de los sólidos tardará menos tiempo en alcanzar el borde del plano?

45. Un reloj de arena colocado en una balanza

Un reloj de arena con 5 minutos de «cuerda» se encuentra sobre un plato de una balanza muy sensible, sin funcionar y equilibrado con pesas. ¿Qué pasará con la balanza durante los cinco minutos siguientes si el reloj se invierte?



Los granos de arena que no tocan el fondo del recipiente, durante su caída no ejercen presión sobre éste. Por eso se podría colegir que en el transcurso de los cinco minutos mientras se trasvasa el árido, el plato de la balanza que sostiene el reloj, deberá tornarse más ligero y ascender. No obstante, se observará otra cosa: el plato con el utensilio ascenderá un poco sólo en un primer instante y acto seguido, durante los cinco minutos siguientes, la balanza permanecerá en equilibrio, hasta el último instante, en que el plato con el reloj descenderá un poco y el equilibrio se restablecerá.

¿Por qué, pues, durante todo el intervalo de tiempo la balanza permanece en equilibrio a pesar de que parte de la arena no presiona sobre el fondo de la ampolla mientras está cayendo? En primer lugar, señalemos que cada segundo por el cuello del reloj pasa tanta arena como alcanza su fondo. (Si suponemos que al fondo cae mayor cantidad de arena que la que pasa por la estrangulación, ¿de dónde se habrá tomado la de más? Y si admitimos lo contrario, también tendremos que contestar a la pregunta: ¿dónde se habrá metido la arena que falta?) Luego cada segundo se vuelven «ingrávidos» tantos granos de arena cuantos caen al fondo del vaso. A cada partícula que se vuelve «ingrávida» mientras está cayendo, le corresponde el golpe de otra contra el fondo.

Ahora vamos a hacer el cálculo. Supongamos que un grano cae desde una altura h. Entonces la ecuación donde g es la aceleración de caída y t, el tiempo de caída, proporciona

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

En este espacio de tiempo el grano no presiona sobre el plato. La disminución del peso de este último en el peso de un grano durante t segundos quiere decir que sobre él ejerce su acción, también durante t segundos, una fuerza equivalente al peso p del grano, dirigida verticalmente hacia arriba. Su acción se mide con el impulso:

$$j = pt = mg\sqrt{\frac{2h}{g}} = m\sqrt{2gh}$$

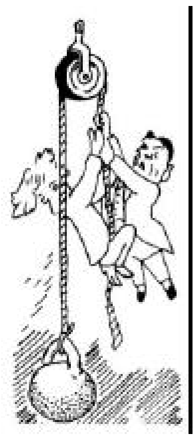
En el mismo intervalo de tiempo un grano choca contra el fondo teniendo una velocidad $v = \sqrt{2gh}$. El impulso de choque j_1 de semejante choque equivale a la cantidad de movimiento mv del grano:

$$j_1 = m\sqrt{2gh}$$

Es obvio que $j = j_1$, o sea, ambos impulsos son iguales. El plato sujeto a la acción de dos fuerzas iguales y dirigidas en sentidos diferentes permanecerá en equilibrio.
Sólo en un primero y último instantes del espacio de cinco minutos se alterará el equilibrio de la balanza (si ésta es lo suficientemente sensible). En un primer instante esto sucede porque algunos granos de arena ya han abandonado el recipiente superior y se han vuelto «imponderables», pero ninguno de ellos ha tenido tiempo para alcanzar el fondo del recipiente inferior, por lo cual el plato con el reloj oscilará hacia arriba. A1 terminar el intervalo de cinco minutos, el equilibrio volverá a violarse momentáneamente, pues todo el árido ya habrá abandonado la ampolla superior, y no quedará arena «ingrávida», mientras que continuarán choques contra el fondo de su gemela, a consecuencia de lo cual el plato oscilará hacia abajo. Acto seguido el equilibrio se restablecerá, esta vez definitivamente.

46. Leyes de mecánica explicadas mediante una caricatura.

En la se representa una situación que tiene «base» mecánica. ¿Supo el autor del dibujo aprovechar las leyes de mecánica?



Leyes de mecánica en una caricatura

He aquí una versión del famoso «problema del mono» de Lewis Caroll (profesor de matemáticas de Oxford, autor del libro Alicia en el país de las maravillas).

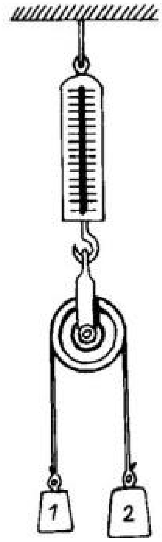
El problema del mono de Lewis Caroll

L. Caroll propuso el dibujo reproducido en la figura e hizo la pregunta siguiente: «¿En qué sentido se desplazará el peso suspendido si el mono comienza a trepar por la cuerda?»
La respuesta no fue unánime. Unos afirmaban que desplazándose por la cuerda el mono no ejercería ninguna acción sobre el peso y éste último permanecería en su lugar. Otros decían que, al empezar a subir el mono, el peso empezaría a descender. Y sólo la minoría de los individuos que resolvían este problema, aseveraban que el peso comenzaría a ascender al encuentro del animal[6].
Ésta última es la única respuesta correcta: si alguien empieza a subir por la cuerda, el peso no descenderá, sino que ascenderá. Cuando se sube trepando por una cuerda sostenida mediante una polea, la cuerda deberá desplazarse en sentido contrario, es decir, hacia abajo (el ascenso de una persona por la escalera de cuerda sujetada al aeróstato, ej. 21). Pero si la misma cuerda se desplaza de izquierda a derecha, arrastrará el peso hacia arriba, o sea, este último se elevará.

47. Dos pesas sostenidas mediante una polea

Una polea suspendida de una balanza de resorte sostiene una cuerda con sendas pesas, de 1 kg y 2 kg, en los extremos. ¿Qué carga marca el fiel del dinamómetro?

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



¿Qué indica el fiel de la balanza?

Por supuesto, la carga de 2 kg empezará a bajar, pero no con la aceleración de caída libre g, sino con una menor. Dado que en este caso la fuerza motriz vale (2 - 1)g, o sea, 10 N, y la masa que ésta solicita es de 1 + 2 = 3 kg, la aceleración del cuerpo que baja uniformemente será tres veces menor que la de otro en caída libre:

$$a = 1/3\ g$$

Además, conociendo la aceleración del cuerpo en movimiento y su masa, es fácil calcular la fuerza F que lo provoca:

$$F = ma = mg/3 = P/3$$

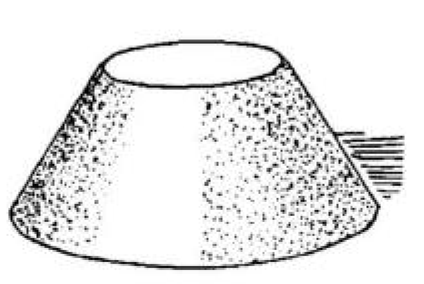
donde P es la masa de la pesa, igual a 20 N. Por consiguiente, la pesa de 2 kg será arrastrada hacia abajo con una fuerza de 20/3 N.
Ésta es la magnitud de la fuerza de tensión de la soga y la que arrastra la pesa de 1 kg hacia arriba. Con esta misma fuerza (según la ley de reacción) la pesa de 1 kg tensa la soga. Por ello, la polea sufre la acción de dos fuerzas paralelas, de 20/3 N cada una. Su resultante vale

$$20N/3 + 20N/3 = 40N/3$$

de modo que la balanza de resorte indicará 40/3 N.

48. El centro de gravedad del cono.

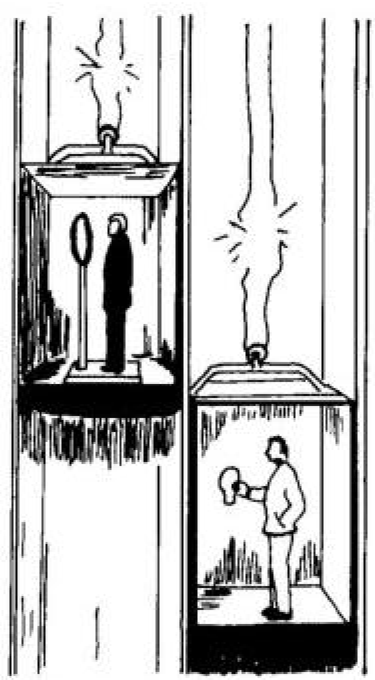
Un tronco de cono hecho de hierro se apoya en su base mayor. Al invertir el sólido, ¿hacia dónde se desplaza su centro de masas, hacia la base mayor o la menor?



La posición del centro de masas dentro del cono no cambia. En esto consiste su propiedad: la misma sólo está sujeta a la distribución de masas en este sólido y no cambia al variar la posición del cuerpo respecto a la línea de aplomo.

49. Una cabina que cae.

Una persona se encuentra en la plataforma de una balanza situada en el suelo de la cabina de un ascensor . De repente se cortan los cables que sostienen la cabina y ésta empieza a bajar con aceleración de caída.



Las leyes físicas dentro de la cabina en caida libre

a) ¿Qué indicará la balanza durante la caída?
b) ¿Se verterá el agua contenida en una garrafa abierta que cae boca abajo?

El espacio comprendido dentro de la cabina que cae libremente, es todo un mundo peculiar que posee sus características excepcionales. Todos los cuerpos que se encuentran en ella, están descendiendo con la misma velocidad que sus respectivos apoyos, mientras que los objetos suspendidos caen a la desarrollada por sus puntos de suspensión; por esta razón, los primeros no presionan sobre sus apoyos ni los segundos cargan sus puntos de suspensión; es decir, todos ellos semejan cuerpos ingrávidos.

También se vuelven ingrávidos los cuerpos que se encuentran en suspenso en este espacio: un objeto que se deja caer no caerá al suelo, sino que permanecerá en el lugar donde fue soltado. Dicho objeto no se acercará hacia el piso de la cabina porque ésta está descendiendo junto con él, además, con la misma aceleración. En suma, en el interior de la cabina en caída se crea un medio peculiar, sin pesantez, que viene a ser un excelente laboratorio de experimentos físicos cuyo resultado se altera notablemente por la fuerza de la gravedad.

Esta explicación permite contestar a las preguntas formuladas al plantear el problema.

a) El fiel de la balanza indicará cero, pues el cuerpo del pasajero no influirá en absoluto en los resortes de este aparato.

b) El agua no se verterá de la garrafa puesta boca abajo.

Los fenómenos descritos deberán tener lugar no sólo en una cabina que cae, sino también en una arrojada libremente hacia arriba, o sea, en toda cabina que se mueva por inercia en el campo gravitacional. Como todos los cuerpos caen con igual aceleración, la fuerza de la gravedad deberá animar de idéntica aceleración la cabina y los cuerpos situados dentro de ella; la posición de unos respecto a otros no cambia, lo cual equivale a decir que en su interior los objetos estarán a salvo de la gravitación.

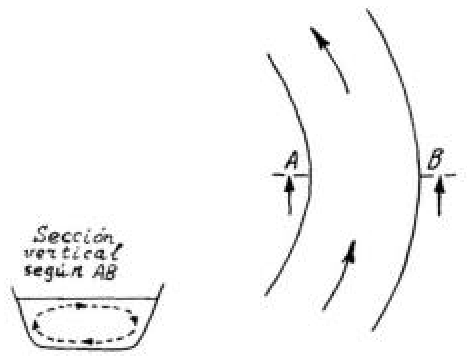
Semejantes condiciones se crearán en la cabina de vehículos con propulsión de cohete durante vuelos espaciales e interplanetarios que se realizarán en el futuro: en ellas los pasajeros y los objetos se volverán ingrávidos.

50. Trocitos de hojas de té en el agua.

Al remover el té en una taza, saque la cucharilla: verá que los trocitos de hojas de té que estaban moviéndose circularmente por la periferia del fondo se agruparán en su centro. ¿Por qué?

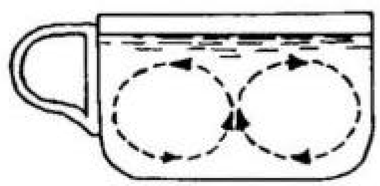
La causa por la cual los trocitos de hojas de té se agolpan junto al centro del fondo de la taza, consiste en que éste ralentiza la rotación de las capas inferiores de agua. Por ello, el efecto centrífugo que tiende a alejar las partículas de líquido del eje de rotación, es mayor en las capas superiores que en las inferiores. Dado que los bordes de la taza son bañados más intensamente que su parte baja, en la capa inmediata al fondo y junto al eje el agua estará menos agitada que arriba.

Es evidente que en resumidas cuentas en la vasija surge un movimiento rotacional dirigido desde su centro hacia los bordes en las capas superiores y desde los bordes hacia el centro en la capa inferior. Por consiguiente, junto al fondo debe surgir una corriente dirigida hacia el eje de la taza, que aparta los trocitos de hojas de té de sus paredes elevándolos simultáneamente a cierta altura por el eje de la vasija.



Movimiento rotacional del agua en el meandro de un río. Del artículo citado de A. Einstein

Un fenómeno similar, pero de escala mucho mayor, tiene lugar en los tramos curvos del lecho fluvial: con arreglo a la teoría propuesta por Albert Einstein, a este fenómeno se debe la forma sinusoidal de los ríos (se forman los llamados meandros).

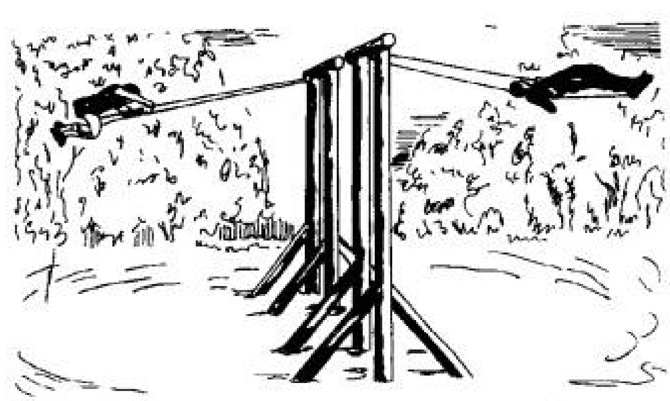


Remolinos de líquido en una taza. Del artículo citado de A. Einstein

La figura que se inserta aquí para explicar la relación que existe entre estos fenómenos, fue tomada del artículo de A. Einstein Causas de la formación de meandros en los cauces de ríos y la llamada ley de Beer (1926).

51. En un columpio.

¿Es cierto que una persona, poniéndose de pie en el columpio, podrá aumentar la amplitud de oscilaciones moviendo el cuerpo de cierta manera?



Las leyes de la mecánica en un columpio

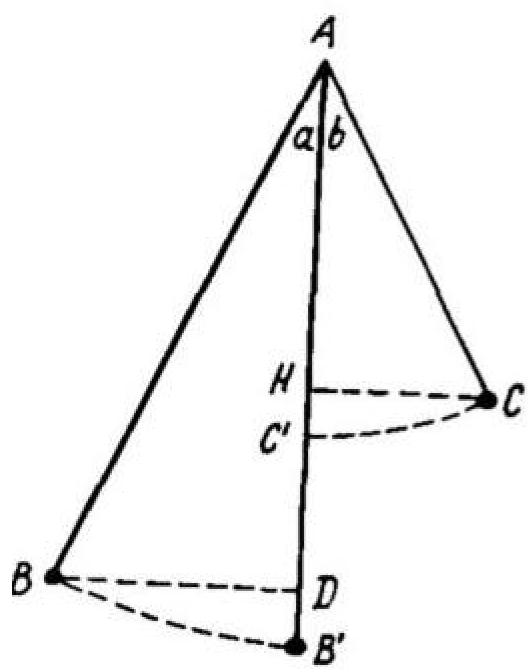
Meciéndose en un columpio se puede aumentar gradualmente la amplitud de las oscilaciones hasta la magnitud deseada moviendo correspondientemente el cuerpo. En este caso hay que observar las condiciones siguientes:

1) una vez en el punto más alto de la trayectoria, la persona debe flexionar un poco las piernas y permanecer en esta actitud hasta que las cuerdas del artefacto pasen por la línea de aplomo, o sea, por el punto inferior de la trayectoria;

2) al pasar por este último, debe erguirse y mantener esta postura hasta alcanzar el punto superior. Es decir, debe descender flexionando un poco las piernas y ascender poniéndose derecha, realizando estos movimientos en una oscilación del artefacto.

La conveniencia mecánica de esta maniobra deriva del hecho de que el columpio es un péndulo físico cuya longitud vale la distancia del punto de suspensión al centro en masas de la carga que se mece. Cuando nos ponemos de cuclillas, baja el centro de masas de la carga en movimiento; cuando nos enderezamos, su posición se eleva. Por ello la longitud del péndulo aumenta y disminuye alternativamente variando dos veces en una oscilación.

Veamos, cómo debería moverse semejante péndulo de longitud variable.



Movimiento directo del columpio

Supongamos que el péndulo AB se acorta hasta AC' al ocupar la posición vertical AB' . Como su peso baja en una magnitud DB', el mismo acumula cierta reserva de energía cinética que debe, en el tramo siguiente de la trayectoria, elevarlo a una altura igual. Mientras el peso sube del punto B' a C', esta reserva no disminuye, pues el trabajo invertido en la elevación no fue realizado a expensas de la energía acumulada. Por esta razón, el peso debe elevarse del punto C' en una magnitud C'H, iguala B'D, cuando el hilo se desvía a la posición A C. Es notorio que el nuevo ángulo b de desviación del hilo del péndulo debe superar el inicial a:

$$DB' = AB' - 4D = AB (1 - \cos a),$$

$$HC' - AC' - AH = AC (1 - \cos b).$$

Dado que DB' = HC',

$$AB (1- \cos a) = AC (1- \cos b)$$

y, por consiguiente,

$$AC / AB = (1- \cos a) / (1- \cos b)$$

Transformando las expresiones 1 - cos a y 1 - cos b obtenemos la expresión siguiente:

$$\frac{AC}{AB} = \frac{1-\cos a}{1-\cos b} = \left(\frac{\operatorname{sen}\frac{a}{2}}{\cos\frac{b}{2}} \right)^2$$

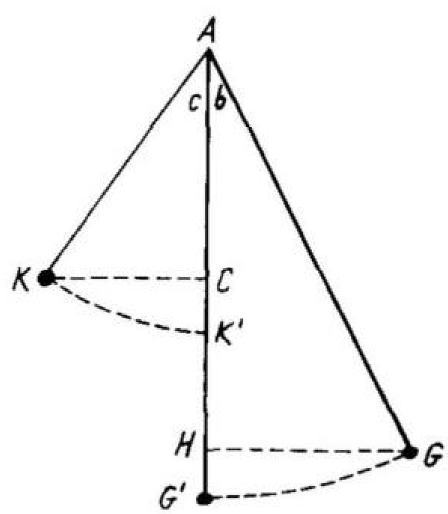
Pero en nuestro caso AC es menor que AB, por lo cual

$$\operatorname{sen}\frac{a}{2} < \operatorname{sen}\frac{b}{2}$$

Como ambos ángulos son agudos,

$$a < b$$

De modo que el hilo del péndulo (y la cuerda del columpio) debe desviarse de la posición vertical en una magnitud mayor que la vez anterior. Este efecto se observa cuando una persona, meciéndose en el columpio, se yergue mientras la tabla asciende.

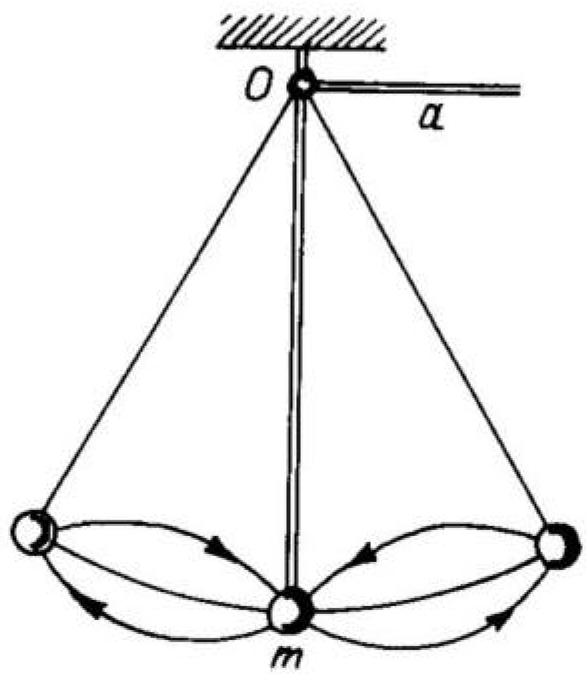


Movimiento inverso del columpio

Ahora vamos a analizar el movimiento inverso del columpio, o sea, el trayecto del peso desde el punto extremo superior hasta su posición inferior, teniendo en cuenta que en este caso la longitud del péndulo aumenta: el peso desciende del punto C al G. Cuando el péndulo se desvía de la posición AG y pasa a ocupar la posición AG', el peso, que desciende en HG', acumula cierta reserva de energía potencial, la cual deberá elevarlo seguidamente a la misma altura en la parte restante de la trayectoria. Pero pasando a la posición AG' el peso se eleva de G' a K, por tanto, acto seguido, el hilo se desviará a un ángulo c, mayor que b, por la causa que hemos examinado anteriormente. Así pues,

$$c > b > a$$

Cuando se aplica el procedimiento descrito, el ángulo de desviación del hilo del péndulo y, por tanto, de las cuerdas del columpio, aumenta en cada oscilación y puede elevarse paulatinamente hasta la magnitud que se desee.
Realizando esta maniobra a la inversa, se puede frenar el movimiento del columpio y aun detenerlo.



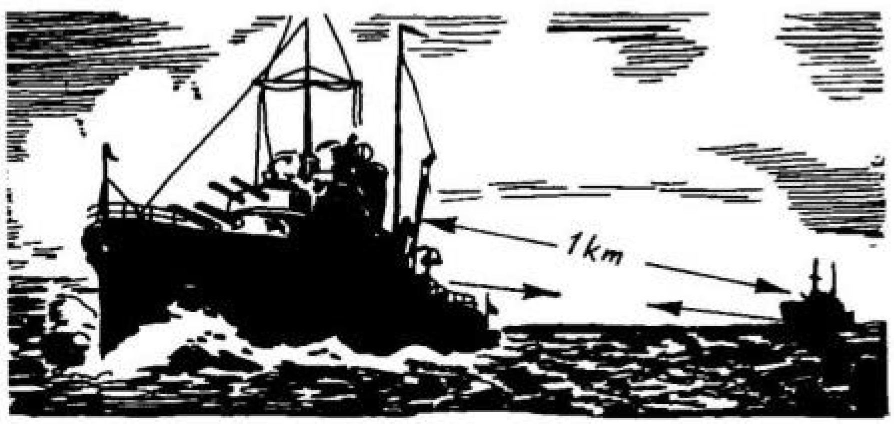
Modelo de columpio. Tomado del curso de Física Teórica de A. Einstein

En su obra Física teórica A. Eijenvald describe un experimento bastante sencillo que permite comprobar este hecho sin valerse del columpio. Para ello hay que «suspender una carga m de un hilo que pasa por un anillo fijo O. El extremo a puede desplazarse a ambos lados cambiando periódicamente la longitud del péndulo OM. Si el extremo a se mueve con una frecuencia dos veces mayor que la de oscilaciones del péndulo, eligiendo adecuadamente la fase de desplazamiento se puede lograr que el dispositivo se balancee con la amplitud requerida».

52. La masa de los cuerpos celestes multiplica muchas veces la de los objetos terrestres.

Además, las distancias entre ellos son un sinfín de veces mayores que las que separan los cuerpos terrestres. Como la fuerza de atracción es directamente proporcional al producto de sus masas, pero es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos ¿por qué, pues, no advertimos la atracción recíproca de los cuerpos terrestres? Y ¿por qué ésta no es tan notoria en el Universo? Explíquelo.

Indudablemente, las enormes distancias que separan los cuerpos celestes deberían atenuar su atracción recíproca. Pero si las distancias espaciales son enormes, las masas de los cuerpos celestes son increíbles. Solemos subestimarlas, mientras que los cuerpos celestes de tamaño de satélites de Marte o asteroides «pequeños» poseen masas inverosímiles.
El asteroide más «chico» de los que se conocen, tiene un volumen de 10 a 15 km^3. Cuesta trabajo suponer, aunque sea aproximadamente, qué masa tendrá 1 km^3 de sustancia de la misma densidad que el agua. Hagamos el cálculo. Un kilómetro cúbico equivale a $(10)^{15}$ cm^3; semejante cantidad de agua tiene una masa de 10^{15} g, es decir, de 10^9 t.
¡Mil millones de toneladas! Mas, en realidad los cuerpos celestes constan de cientos o miles de millones de kilómetros cúbicos de materia que a veces es mucho más densa que el agua.
La fuerza de atracción que depende del producto de masas tan colosales no se atenúa hasta valores ínfimos por las enormes distancias que median de unos cuerpos a otros. La Tierra y la Luna se atraen con una fuerza de $2 * 10^{20}$ N, en tanto que dos personas que están alejadas a 1 m una de otra lo hacen con una fuerza de $3 \cdot 10^{-7}$ N, y dos navíos de línea que distan 1 km uno de otro, con una fuerza de 0,04 N.

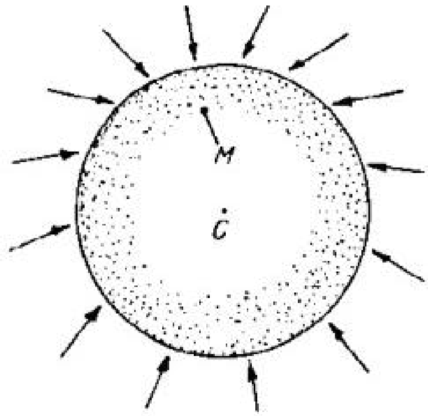


Dos buques de línea de 20.000 t cada uno, dispuestos a una distancia de 1 km uno de otro, se atraen con una fuerza de 0.04 N

Por cierto, semejantes fuerzas son incapaces de vencer la resistencia de los pies de una persona contra el apoyo ni la que el agua opone al avance del buque.
Por eso, a consecuencia de la gravitación se atraen mutuamente los astros y los mundos, lo cual no se advierte en la interacción de los cuerpos que se hallan en la superficie terrestre.

53. La dirección de la plomada.
Se considera que todas las plomadas situadas cerca de la superficie terrestre están dirigidas hacia el centro del Globo (si se desprecia la desviación poco considerable provocada por la rotación del planeta). Consta que los cuerpos terrestres son atraídos no solo por la Tierra, sino también por la Luna. Por eso, al parecer, los cuerpos no deberían caer hacia el centro del

Globo, sino hacia el centro común de masas del planeta y su satélite. Dicho centro común de masas no coincide con el centro geométrico del globo terráqueo, sino que dista de él a 4800 km.



¿Hacia qué punto deben caer los cuerpos situados en la superficie terrestre?

En efecto, la masa de la Luna es 80 veces menor que la de la Tierra; por consiguiente, el centro común de masas está 80 veces más próximo al centro de la Tierra que al de su satélite natural. La distancia entre los centros de ambos cuerpos equivale a 60 radios terrestres, por ende, su centro común de masas dista del centro del Globo tres cuartos del radio terrestre.
Si esto es cierto, la dirección de las plomadas en el globo terráqueo debe desviarse de la dirección hacia el centro de la Tierra. ¿Por qué, pues, en realidad no se observan tales desviaciones?

El razonamiento expuesto al comienzo del problema es erróneo, aunque el error no salta a la vista. No obstante, se descubre fácilmente si lo dicho acerca de la Tierra y la Luna se refiere al Sol y la Tierra. En tal caso se razonaría de la manera siguiente.
Los cuerpos terrestres son atraídos no sólo por la Tierra, sino también por el Sol, y deberían caer hacia el centro común de masas de estos dos cuerpos. Dicho punto está localizado dentro del Astro Rey (pues la masa de este último multiplica por 300.000 la de nuestro planeta, mientras que la distancia entre sus centros es unas doscientas veces mayor que el radio solar). Por lo tanto, ¡resulta que todas las plomadas que hay en el globo terráqueo deberían estar dirigidas hacia... el Sol!
La absurdidad manifiesta de semejante conclusión facilita la búsqueda del error que se deslizó en los razonamientos. Consta que el Sol atrae todos los cuerpos terrestres y, claro está, también atrae todo el Globo. Las aceleraciones que el Sol comunica a cada gramo de sustancia del planeta y a cada gramo de materia de todo cuerpo situado en la superficie de este último, son iguales. La Tierra y los objetos que se encuentran en ella, bajo la atracción solar, deben desplazarse de manera idéntica hacia el Astro Rey; en otras palabras, deben permanecer en reposo relativo. De este hecho se deduce que la atracción ejercida por el Sol no puede influir en la caída de los cuerpos terrestres: ellos deberán precipitarse a la Tierra como si el Sol no los atrajera.
Lo dicho también se refiere al sistema Tierra-Luna. No sólo en el sentido de que los cuerpos lunares no deben caer a la Tierra, sino también en el sentido de que todos los cuerpos terrestres deben precipitarse al centro del planeta, como si el satélite no los atrajera. Por cierto, este último obliga a todos los cuerpos terrestres a desplazarse hacia él, mas, al mismo tiempo todo el globo

terrestre experimenta atracción de la misma magnitud. Por ello, la atracción lunar no puede influir de modo alguno sobre la caída de los cuerpos hacia la Tierra: ésta y los cuerpos situados en ella se atraen mutuamente como si la Luna no existiera.
(Cabe señalar que el error que se cometió al razonar, es uno de los más frecuentes y lleva aparejada toda una serie de conclusiones equivocadas.)