

Principios matemáticos de la filosofía natural



Isaac Newton · 1687

Audiolecciones ilustradas

Lecturized

Principios matemáticos de la filosofía natural

Audiolecciones ilustradas

Isaac Newton · 1687

Contado como lecciones ilustradas por Lecturized
lecturized.com

Del original: The Mathematical Principles of Natural Philosophy, translated by Andrew
Motte (first American edition, 1846)

Índice

Cuánta materia, cuánto movimiento

Tres maneras de medir un mismo tirón

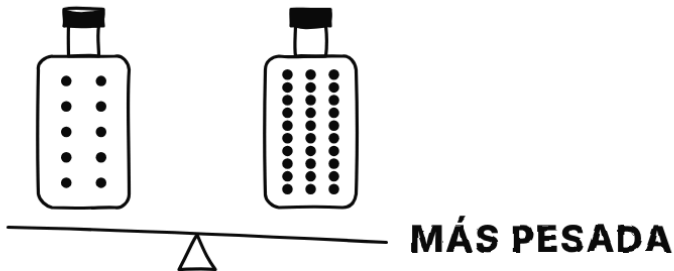
Tiempo verdadero, espacio verdadero y el marinero

Por qué el movimiento verdadero no se lee en los vecinos

El cubo, los dos globos y el propósito del libro

Cuánta materia, cuánto movimiento

Tome dos botellas de plástico rígido idénticas, una con aire a presión normal y el tapón enroscado. Ahora meta aire en la otra con una bomba de bicicleta hasta que quede dura. Las dos botellas ocupan el mismo espacio, pero la dura contiene más aire, y en una báscula de cocina sensible incluso pesa un poco más. Así que «cuánto» hay de algo no se puede saber solo por su tamaño. Esa es la cuestión que Newton resuelve primero, antes de escribir una sola ley del movimiento.



$$\text{MASA } m = \underset{\text{DENSIDAD}}{\rho} \times V \text{ VOLUMEN}$$

$$2 \times 2 = 4$$

$$2 \times 3 = 6$$

Mismo tamaño, más materia

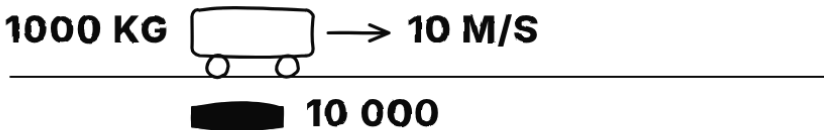
Su primera definición dice que la cantidad de materia se mide por su densidad y su volumen tomados conjuntamente. En la notación de hoy se escribe $m = \rho V$: la masa m es la densidad ρ , la letra griega rho, multiplicada por el volumen V . En palabras, dice que un cuerpo tiene más materia cuando está más apretado, y más cuando es más grande, y que los dos efectos se multiplican. La intuición es una multitud: el doble de personas por metro cuadrado en el doble de metros cuadrados da cuatro veces más personas. Las propias cifras de Newton funcionan igual: un aire de densidad doble en un espacio doble es cuatro veces la cantidad, porque $2 \times 2 = 4$; en un espacio triple es seis veces, porque $2 \times 3 = 6$. La nieve prensada hasta hacerse hielo y el polvo comprimido en una pastilla cambian su volumen y su densidad, pero no su cantidad de materia.

Newton deja de lado, por ahora, cualquier medio sutil que pudiera fluir libremente entre las partes de los cuerpos; solo cuenta la materia del propio cuerpo. Esta cantidad es lo que, a partir de ahora, llamará cuerpo o masa. Y añade algo que no es nada evidente: la masa de un cuerpo es proporcional a su peso. Lo descubrió mediante experimentos con péndulos, hechos con mucho cuidado y descritos más adelante en el libro. Péndulos de la misma longitud, con masas de materiales muy distintos, oscilan en el mismo tiempo, y eso le dice que el peso crece exactamente al mismo paso que la masa. Es la razón por la que la báscula de su baño, que en realidad mide un tirón, puede marcar kilogramos de materia.

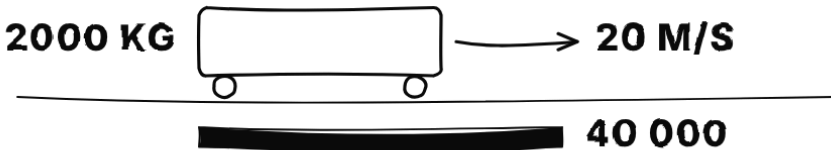
La segunda definición se apoya en la primera. La cantidad de movimiento se mide por la velocidad y la cantidad de materia juntas, y hoy escribimos $p = mv$, donde p se llama momento lineal. En palabras: cuanta más materia se mueve, y cuanto más rápido se mueve, más movimiento hay. La intuición es que el movimiento de un

cuerpo entero no es más que el movimiento de todas sus partes sumado, así que el doble de materia a la misma velocidad es el doble de movimiento. De nuevo las cifras de Newton: un cuerpo de doble cantidad con igual velocidad tiene doble movimiento; si además tiene el doble de velocidad, tiene cuatro veces el movimiento, $2 \times 2 = 4$. Un coche de 1000 kilogramos a 10 metros por segundo lleva $1000 \times 10 = 10\,000$ unidades de movimiento; una furgoneta de 2000 kilogramos a 20 metros por segundo lleva $2000 \times 20 = 40\,000$, cuatro veces más, y por eso necesita tanta más carretera para detenerse.

p	=	m	v
MOMENTO		MASA	VELOCIDAD



CUESTA PARAR



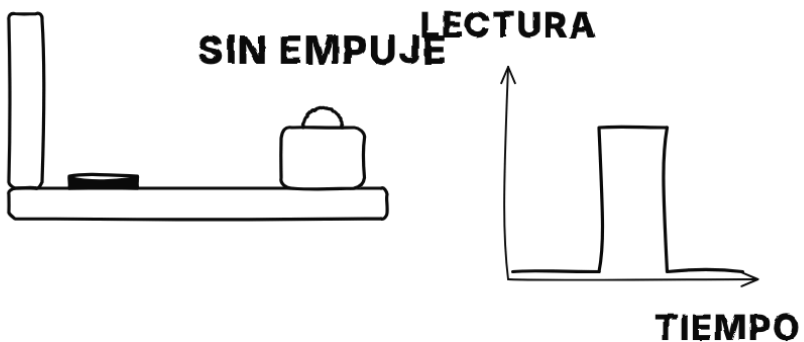
Movimiento es masa por velocidad

La tercera definición da nombre a algo que todos sienten pero nadie había definido: la vis insita, la fuerza que nace en la propia materia. Es un poder de resistir por el cual todo cuerpo, en la medida en que

puede, mantiene su estado presente, ya sea en reposo o moviéndose uniformemente en línea recta. Newton insiste en que es proporcional al cuerpo, y en que no es más que la inactividad de la masa, vista desde otro lado. Su nombre más acertado es *vis inertiae*, la fuerza de inactividad, y de ahí viene nuestra palabra inercia. Un cuerpo muestra esta fuerza solo cuando alguna otra fuerza intenta cambiar su estado. Visto desde el cuerpo que se mantiene quieto, parece resistencia; visto desde el cuerpo que empuja contra otro, parece impulso. Y Newton advierte que el reposo y el movimiento, tal como se suelen pensar, solo se distinguen de manera relativa; los cuerpos que parecen en reposo no siempre lo están de verdad.

Pruébalo

Ponga su teléfono plano en el asiento del copiloto de un coche y abra cualquier aplicación gratuita de sensores que muestre el acelerómetro. Mientras el coche avanza a velocidad constante por una carretera recta, la lectura en la dirección de la marcha se mantiene cerca de cero. Cuando el conductor frena, la lectura salta, y una bolsa suelta en el asiento se desliza hacia delante. Nada empujó la bolsa hacia delante; simplemente siguió adelante mientras al coche se le obligaba a parar, y eso es la *vis inertiae* en acción.

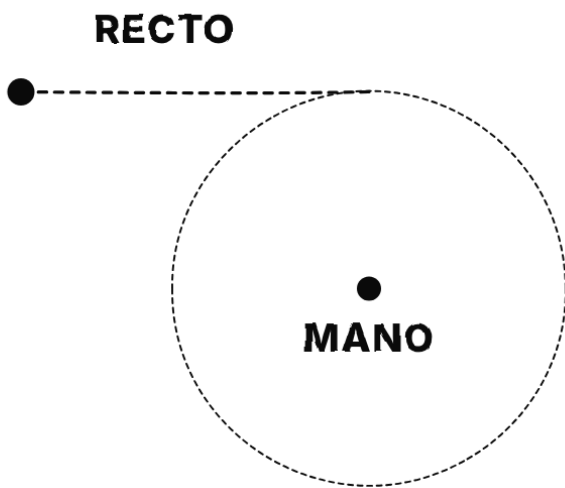


La bolsa sigue adelante

La cuarta definición: una fuerza impresa es una acción sobre un cuerpo que cambia su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme. Existe solo mientras dura la acción, y nada de ella queda después en el cuerpo; el cuerpo mantiene su nuevo estado solo por su inercia. Las fuerzas impresas vienen de golpes, de la presión y de la fuerza centrípeta. Las pastillas de freno aprietan solo mientras el pedal está pisado; una vez que el coche ha bajado a su nueva velocidad, la mantiene sin que nada apriete.

La quinta definición presenta la fuerza de la que trata todo el libro: una fuerza centrípeta atrae o impulsa un cuerpo hacia un punto, como hacia un centro. La gravedad es una, que atrae los cuerpos hacia el centro de la Tierra; el magnetismo es otra, que atrae el hierro hacia el

imán; y también lo es la fuerza, sea cual sea, que no deja de curvar a los planetas desde las líneas rectas hacia órbitas curvas. La imagen de Newton es una piedra que se hace girar en una honda. La piedra tira para escapar de la mano y tensa la honda, con más fuerza cuanto más rápido va, y en el momento en que se suelta sale volando. El tirón de la honda, siempre dirigido de vuelta a la mano en el centro del círculo, es lo que él llama fuerza centrípeta, literalmente la fuerza que busca el centro. Todo cuerpo que se mueve en cualquier órbita la abandonaría por una línea recta, de forma uniforme, si no lo retuviera una fuerza así.



El tirón hacia el centro

Luego viene la imagen más famosa de las definiciones: un cañón en lo alto de una montaña que dispara una bala de plomo en horizontal. Sin

gravedad, y sin aire, la bala seguiría recta para siempre; la gravedad curva su trayectoria hacia abajo, más cuanto más pesada es para su masa, menos cuanto más rápido se dispara. Newton da cifras: si la bala cae a dos millas, entonces, sin aire, el doble de velocidad la lleva a unas cuatro millas y diez veces la velocidad, a unas veinte. La regla detrás de esto es sencilla: la bala cae la misma altura en el mismo tiempo sea cual sea su velocidad, así que la distancia que recorre antes de caer crece en proporción a la velocidad. Si sigue aumentando la velocidad, la trayectoria se aplana, hasta que la bala cae a 10, 30 o 90 grados alrededor de la Tierra, da la vuelta completa antes de caer, o no cae nunca y sigue viajando hacia los cielos. Ese último caso no es una fantasía: cada satélite GPS que escucha su teléfono es la bala de cañón de Newton, que se mueve tan rápido de lado que sigue cayendo alrededor de la Tierra sin llegar nunca abajo.

Para recordar

Newton mide la materia por la densidad y el volumen juntos, así que densidad doble en espacio doble es cuatro veces la materia, y esta cantidad, proporcional al peso, es lo que llama masa. La cantidad de movimiento es la masa y la velocidad juntas, así que el doble de masa al doble de velocidad es cuatro veces el movimiento. La inercia, la *vis inertiae*, es la tendencia de un cuerpo a conservar su estado, y una fuerza impresa existe solo mientras actúa. Una fuerza centrípeta atrae hacia un centro y convierte el movimiento recto en una órbita, como la honda sostiene la piedra y la gravedad sostiene la Luna. Dispare una bala de cañón lo bastante rápido y nunca cae, así se mantiene en el cielo cada satélite, y hallar fuerzas a partir de órbitas y órbitas a partir de fuerzas es la tarea que el libro se propone.

Preguntas

1. Usando $m = \rho V$, ¿qué le pasa a la cantidad de materia si la densidad se duplica y el volumen se triplica?
 - a. Se duplica
 - b. Se hace cinco veces mayor
 - c. Se hace seis veces mayor
 - d. Sigue igual, porque la masa no puede cambiar
2. ¿Por qué pudo Newton concluir, a partir de los péndulos, que la masa es proporcional al peso?

- a. Las masas más pesadas oscilan más rápido, al paso de su peso
 - b. Los péndulos de la misma longitud oscilan en el mismo tiempo sea cual sea el material de su masa
 - c. Los péndulos se detienen antes cuando su masa es ligera
 - d. La oscilación de un péndulo mide directamente su densidad
3. Una bolsa suelta se desliza hacia delante cuando el coche frena. ¿Qué dice la lección que está pasando?
- a. La bolsa sigue adelante por su vis inertiae mientras al coche se le obliga a parar
 - b. Los frenos empujan la bolsa hacia delante a través del asiento
 - c. La lectura del acelerómetro empuja la bolsa
 - d. Una fuerza centrípeta tira de la bolsa hacia el parabrisas
4. Si se suprimiera el aire, ¿por qué el alcance de la bala de cañón crece en proporción a su velocidad?
- a. Una bala más rápida siente una gravedad más débil
 - b. Una bala más rápida tiene más inercia, así que cae más despacio
 - c. La bala cae la misma altura en el mismo tiempo sea cual sea su velocidad, así que la distancia crece con la velocidad
 - d. La gravedad solo actúa cuando la bala ha dejado de avanzar

Respuestas

1. c) La densidad y el volumen se multiplican, así que el doble de densidad en el triple de espacio da dos por tres, seis veces la materia, como dice Newton del aire en un espacio triple.

2. b) Los péndulos de la misma longitud con masas de materiales muy distintos oscilan en el mismo tiempo, y eso le dice que el peso crece exactamente al mismo paso que la masa.

3. a) Nada empujó la bolsa hacia delante: simplemente siguió adelante mientras al coche se le obligaba a parar, y eso es la vis inertiae en acción.

4. c) La bala cae la misma altura en el mismo tiempo sea cual sea su velocidad, así que la distancia que recorre antes de caer crece en proporción a la velocidad.

Ejemplos resueltos

Aire de densidad doble Un aire de densidad doble llena un espacio doble, y en un segundo caso un espacio triple. ¿Cuántas veces la cantidad de materia original es cada uno, usando $m = \rho V$?

En $m = \rho V$ la densidad y el volumen se multiplican.

Densidad doble, volumen doble: $2 \times 2 = 4$, cuatro veces la materia.

Densidad doble, volumen triple: $2 \times 3 = 6$, seis veces la materia.

Respuesta: cuatro veces y seis veces

La bala de cañón de Newton Una bala de plomo disparada en horizontal desde una montaña cae a dos millas. Sin aire, ¿hasta dónde llega con el doble y con diez veces la velocidad?

Sin aire, la bala cae la misma altura en el mismo tiempo a cualquier velocidad.

Así que la distancia que recorre antes de caer es proporcional a la velocidad.

El doble de velocidad: $2 \times 2 = 4$ millas; diez veces la velocidad: $10 \times 2 = 20$ millas.

Respuesta: 4 millas y 20 millas

Ejercicios

1. Usando $p = mv$, un cuerpo de masa doble se mueve al doble de velocidad que otro. ¿Cuántas veces su cantidad de movimiento lleva?

Pista: Multiplique el factor de la masa por el factor de la velocidad.

Respuesta: Cuatro veces: $2 \times 2 = 4$; como dice Newton, cuádruple.

2. Un coche de 1000 kilogramos se mueve a 10 metros por segundo y una furgoneta de 2000 kilogramos a 20 metros por segundo.

¿Cuántas veces el momento lineal del coche tiene la furgoneta?

Pista: Calcule $p = mv$ para cada uno y divida.

Respuesta: Cuatro veces: el coche tiene $1000 \times 10 = 10\,000$ unidades, la furgoneta $2000 \times 20 = 40\,000$ unidades.

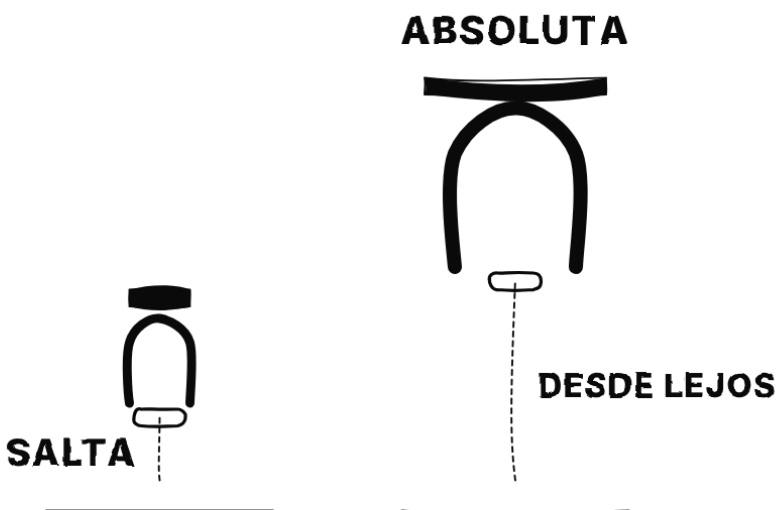
3. Sin aire, la bala que cae a dos millas se dispara con tres veces la velocidad. ¿Hasta dónde llega?

Pista: El alcance crece en proporción a la velocidad cuando la caída dura lo mismo.

Respuesta: Seis millas: tres veces la velocidad la lleva tres veces más lejos, $3 \times 2 = 6$ millas.

Tres maneras de medir un mismo tirón

Sostenga un imán pequeño de nevera unos centímetros por encima de un clip y bájelo despacio. A cierta altura el clip salta y se pega. Pruebe otra vez con un imán grande y fuerte y el clip salta desde mucho más lejos. Y con cualquiera de los dos imanes, cuanto más cerca lo sostenga, con más fuerza salta el clip. Así que «¿qué fuerza tiene el tirón?» tiene más de una respuesta honrada, y Newton decide mantener separadas tres de ellas.

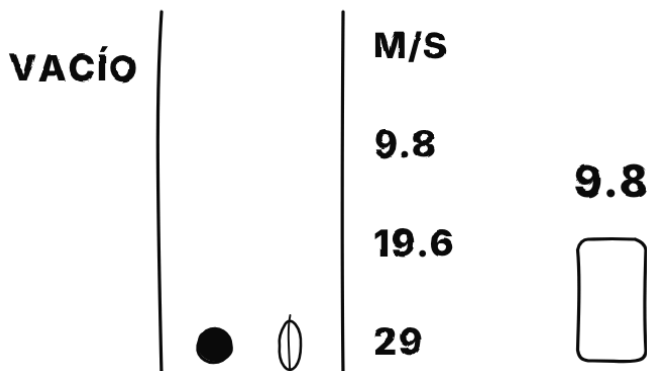


Imán pequeño, imán grande

La primera es la cantidad absoluta de una fuerza centrípeta: una medida de la propia fuente, de lo poderosa que es la causa que envía el tirón desde el centro al espacio de alrededor. En palabras, un imán grande y fuerte tiene más fuerza absoluta que uno pequeño y débil, sea lo que sea lo que se le acerque. No hay una sola fórmula en el pasaje para ella; simplemente ordena las fuentes unas frente a otras. La brújula de su teléfono siente el magnetismo de la Tierra en su conjunto, una fuente mucho más fuerte que cualquier imán de nevera, aunque está tan repartida que la aguja apenas lo nota.

La segunda es la cantidad aceleradora: una medida proporcional a la velocidad que el tirón produce en un tiempo dado. Hoy la escribiríamos $a = \Delta v / \Delta t$, la aceleración, donde Δ , la letra griega delta, significa «cambio en». Dice lo rápido que el tirón acelera las cosas en un lugar dado, sea lo que sea lo que se ponga allí. El mismo imán acelera con más fuerza de cerca que de lejos, y la gravedad es un poco más fuerte en un valle que en la cima de una montaña muy alta, y más débil todavía más lejos de la Tierra. Pero a la misma distancia de la Tierra, una vez descontado el aire, la gravedad acelera por igual a todo cuerpo que cae, pesado o ligero, grande o pequeño. Un cálculo: una piedra soltada cerca del suelo gana unos 9,8 metros por segundo de velocidad cada segundo, así que a los 3 segundos cae a unos $9,8 \times 3 \approx 29$ metros por segundo, y una pluma en un tubo de vacío haría exactamente lo mismo. El acelerómetro de su teléfono, quieto sobre una mesa, marca ese mismo 9,8 en cualquier lugar a la misma altura, tanto si el teléfono está desnudo como si va dentro de una funda pesada.

$$\text{ACELERACIÓN } a = \frac{\Delta v \text{ GANA VELOC.}}{\Delta t \text{ TIEMPO}}$$



Aceleración: velocidad ganada por segundo

La tercera es la cantidad motriz: una medida proporcional al movimiento, el momento lineal, que el tirón produce en un tiempo dado. Esto es lo que Newton llama el peso del cuerpo, su tendencia total hacia el centro, y se mide siempre por la fuerza igual y opuesta que basta justo para impedir que el cuerpo caiga. La báscula del baño hace exactamente eso: empuja hacia arriba justo lo necesario para que usted no se hunda, y muestra cuánto es. Un cuerpo mayor tiene más peso, y el mismo cuerpo pesa más cerca de la Tierra y menos lejos de ella.

$$F = m a$$

$$W = m g$$

M: MASA, G: 9,8



El peso es masa por g

Newton une las tres. La fuerza motriz pertenece al cuerpo, como la suma de las tendencias de todas sus partes; la fuerza aceleradora pertenece al lugar, como una especie de poder repartido desde el centro a cada punto a su alrededor; y la fuerza absoluta pertenece al centro, como la causa, sea cual sea, que produce el tirón. Esa causa podría ser un cuerpo central, un imán o la Tierra, o algo aún desconocido; dice claramente que solo da una noción matemática de estas fuerzas, no sus causas físicas.

Luego viene la relación clave: la fuerza aceleradora es a la fuerza motriz como la velocidad es al movimiento. Igual que el movimiento es la velocidad multiplicada por la cantidad de materia, la fuerza motriz es la fuerza aceleradora multiplicada por la cantidad de

materia, lo que hoy se escribe $F = ma$, y para el peso $W = mg$. En palabras: el tirón sobre un cuerpo entero es el tirón sobre cada pequeña parte, sumado sobre todas sus partes. Por eso cerca de la Tierra, donde la gravedad aceleradora g es la misma para todo, el peso es simplemente proporcional al cuerpo.

El propio cálculo de Newton sube más alto. Supongamos que subimos a una región donde la gravedad aceleradora es solo la mitad de la de aquí. Allí, un cuerpo dos veces menor pesa $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ del peso del cuerpo grande aquí, cuatro veces menos; un cuerpo tres veces menor pesa $\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$, seis veces menos. A la altura de los satélites GPS, a unos veinte mil kilómetros, la gravedad aceleradora está muy por debajo del 9,8 que sentimos, así que un satélite allí pesa solo una pequeña fracción de lo que pesaba en la plataforma de lanzamiento, aunque su masa es exactamente la misma.

 **AQUÍ: 1**

G $\frac{1}{2}$  $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$

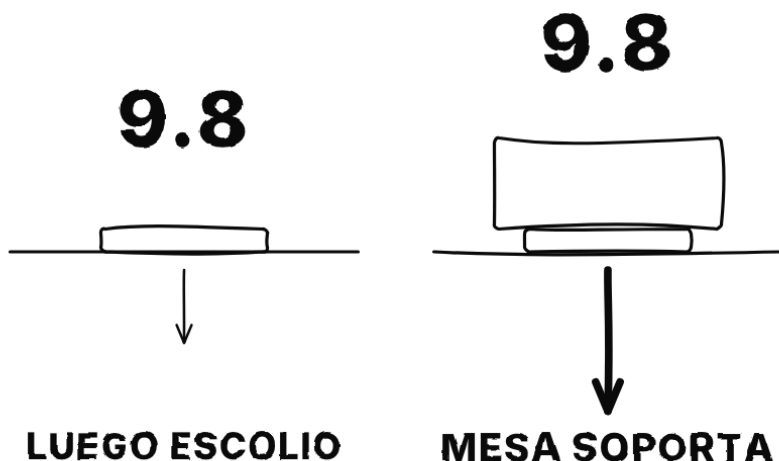
G $\frac{1}{2}$  $\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6}$


GPS

Mitad de g, cuerpos menores

Pruébalo

Ponga su teléfono plano sobre una mesa y abra una aplicación gratuita de sensores que muestre el acelerómetro. Anote la lectura que apunta hacia arriba desde la mesa, cerca de 9,8 metros por segundo cada segundo. Ahora ponga un libro pesado sobre el teléfono y mire de nuevo: la lectura no cambia. La cantidad aceleradora pertenece al lugar, no al cuerpo; el peso del libro cambió lo que soporta la mesa, no la aceleración que da allí la gravedad.



El libro no cambia g

Newton añade una advertencia sobre las palabras: llamará a las atracciones y a los impulsos aceleradores y motrices en el mismo sentido, y usará atracción, impulso y propensión hacia un centro de forma intercambiable. No pretende decir qué son estas fuerzas ni cómo actúan, ni que un centro, que es solo un punto matemático, atraiga de verdad nada. Y aquí terminan las definiciones y empieza una larga nota, un escolio. El tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento, dice, no necesitan definición, por ser conocidos de todos; pero la gente corriente solo piensa en ellos a través de las cosas que puede ver y tocar, y eso engendra prejuicios. Para eliminarlos separará lo absoluto de lo relativo, lo verdadero de lo aparente, lo matemático de lo común.

Para recordar

Un tirón hacia un centro puede medirse de tres maneras: por el poder de su fuente, la cantidad absoluta; por lo rápido que acelera las cosas en un lugar, la cantidad aceleradora; y por el movimiento que produce en un cuerpo entero, la cantidad motriz, que es el peso. La fuerza motriz es la fuerza aceleradora por la cantidad de materia, como el movimiento es la velocidad por la cantidad de materia, así que donde la aceleración de la gravedad es igual, el peso es simplemente proporcional al cuerpo. Donde la gravedad se reduce a la mitad, un cuerpo dos o tres veces menor pesa cuatro o seis veces menos. A la misma distancia de la Tierra la gravedad acelera igual a todo cuerpo, como muestra el acelerómetro de un teléfono tenga o no un libro encima. Newton da a estas fuerzas solo un significado matemático, y pasa después a separar el tiempo, el espacio y el movimiento verdaderos de sus medidas cotidianas.

Preguntas

1. El acelerómetro de un teléfono marca el mismo 9,8 con o sin un libro pesado encima. ¿Cuál de las tres cantidades de Newton muestra esa lectura?
 - a. La cantidad motriz, que crece con el cuerpo
 - b. La cantidad aceleradora, que pertenece al lugar
 - c. La cantidad absoluta, que pertenece a la fuente
 - d. La cantidad de movimiento del libro

2. Usando $F = ma$, ¿por qué el peso es simplemente proporcional al cuerpo cerca de la superficie de la Tierra?
 - a. Porque allí todos los cuerpos tienen la misma masa
 - b. Porque allí la gravedad aceleradora g es la misma para todo
 - c. Porque el peso no depende de la gravedad
 - d. Porque la fuerza motriz es la misma para todos los cuerpos
3. ¿Qué cantidad mide lo poderosa que es la fuente de un tirón, sea lo que sea lo que se le acerque?
 - a. La cantidad motriz
 - b. La cantidad aceleradora
 - c. La cantidad absoluta
 - d. La cantidad de movimiento
4. En una región donde la gravedad aceleradora se reduce a la mitad, ¿cómo se compara el peso de un cuerpo tres veces menor con el peso del cuerpo mayor aquí?
 - a. Tres veces menor
 - b. Cinco veces menor
 - c. Seis veces menor
 - d. Nueve veces menor

Respuestas

1. **b)** La cantidad aceleradora pertenece al lugar, no al cuerpo; el libro cambió lo que soporta la mesa, no la aceleración que da allí la gravedad.
2. **b)** Cerca de la Tierra la gravedad aceleradora g es la misma para todo, así que el peso $W = mg$ crece en proporción solo a la cantidad de materia.

3. c) La cantidad absoluta es una medida de la propia fuente, de lo poderosa que es la causa que envía el tirón desde el centro.
4. c) El peso es la masa por la gravedad aceleradora, así que un tercio de la masa por la mitad de la gravedad da un sexto, seis veces menos.

Ejemplos resueltos

El peso donde la gravedad se reduce a la mitad Donde la gravedad aceleradora es la mitad de su valor aquí, ¿cuánto pesan cuerpos dos y tres veces menores, comparados con el cuerpo mayor aquí?

El peso es $W = mg$: la cantidad de materia por la gravedad aceleradora.

Dos veces menor y la mitad de la gravedad: $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$, cuatro veces menos.

Tres veces menor y la mitad de la gravedad: $\frac{1}{3} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{6}$, seis veces menos.

Respuesta: cuatro veces menos y seis veces menos

Ejercicios

1. Una piedra soltada cerca del suelo gana unos 9,8 metros por segundo de velocidad cada segundo. ¿A qué velocidad cae a los 2 segundos, sin contar el aire?

Pista: La cantidad aceleradora es la velocidad ganada por segundo; multiplíquela por el tiempo.

Respuesta: Unos 19,6 metros por segundo: $9,8 \times 2 = 19,6$.

2. Donde la gravedad aceleradora se reduce a la mitad, un cuerpo es cuatro veces menor que uno de aquí. ¿Cuántas veces menos pesa?

Pista: Use $W = mg$ y multiplique las dos fracciones.

Respuesta: Ocho veces menos: $\frac{1}{4} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$.

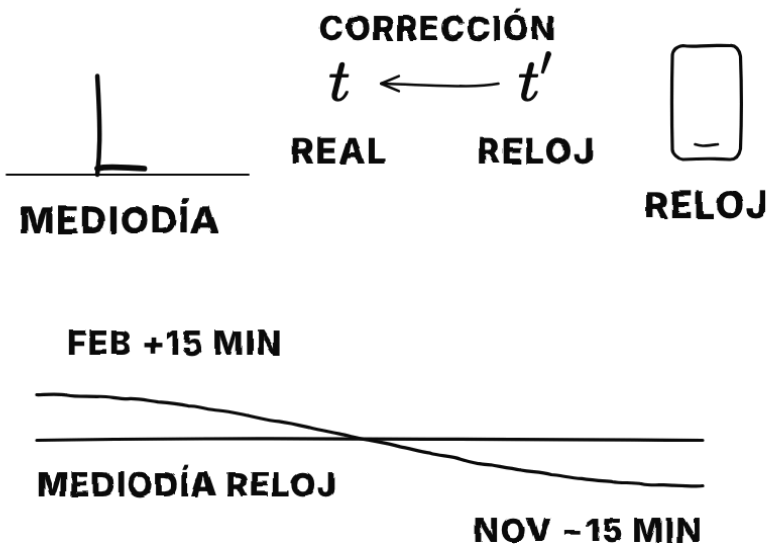
3. Cerca de la Tierra, un cuerpo tiene el triple de cantidad de materia que otro. ¿Cómo se comparan sus pesos?

Pista: Cerca de la Tierra g es la misma para los dos, así que $W = mg$ depende solo de m .

Respuesta: El triple de peso: con la misma g , el peso es proporcional a la cantidad de materia.

Tiempo verdadero, espacio verdadero y el marinero

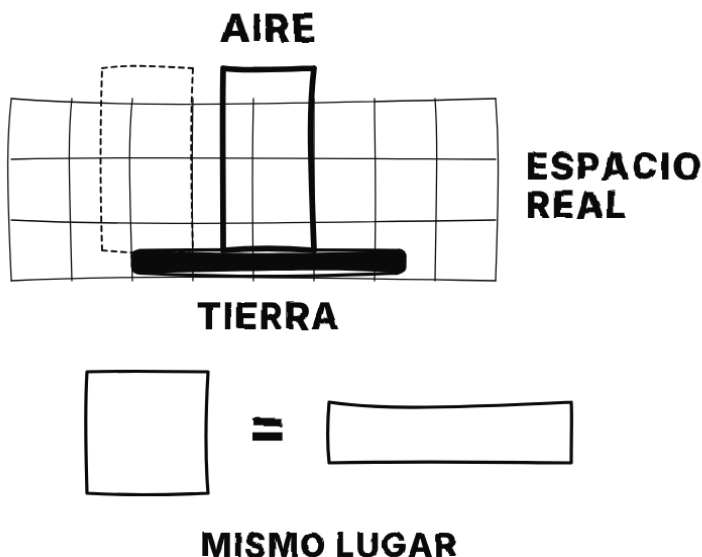
Ponga un reloj de sol, o simplemente un palo clavado en el suelo, en su jardín, y anote el momento en que su sombra es más corta cada día: el mediodía local. Compárelo con el reloj de su teléfono a lo largo de un año. Frente al reloj constante, el mediodía de la sombra se desplaza a lo largo del año: en febrero llega un cuarto de hora más tarde que su hora media, y a principios de noviembre un cuarto de hora antes. Entonces, ¿cuál es el mediodía real, y qué es un día, si los días según el Sol no duran todos lo mismo?



Mediodía por la sombra, mediodía por el reloj

El escolio de Newton responde dividiendo el tiempo en dos. El tiempo absoluto, verdadero y matemático fluye uniformemente por sí mismo, sin relación con nada externo, y su otro nombre es duración. El tiempo relativo y común es cualquier medida visible de la duración hecha por algún movimiento, una hora, un día, un mes, un año, exacta o no. En símbolos podría escribirse el tiempo verdadero como t y un tiempo medido como t' , que se lee « t prima»; el reloj da t' , y solo después de corregirlo dice t . El reloj de su teléfono es un t' : cuenta las vibraciones de un cristal de cuarzo y se corrige con los relojes atómicos de los satélites, pero sigue siendo un movimiento que se usa para medir el tiempo.

Luego el espacio. El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sigue siempre igual y nunca se mueve. El espacio relativo es una medida móvil de él, fijada por los sentidos a través de su posición entre los cuerpos, como el espacio bajo tierra, el aire o el cielo, medidos desde la Tierra. Los dos tienen la misma forma y tamaño, pero no tienen por qué seguir siendo el mismo trozo de espacio: si la Tierra se mueve, el aire que mantiene la misma posición a nuestro alrededor pasa, en sentido absoluto, por una parte del espacio tras otra.

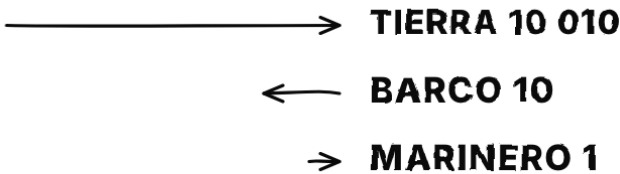


Espacio verdadero y lugares

El lugar es la parte del espacio que llena un cuerpo, absoluto o relativo según lo sea el espacio. Es una parte del espacio, no la posición del cuerpo ni su superficie exterior: los sólidos iguales tienen siempre lugares iguales, aunque sus superficies, al tener formas distintas, sean a menudo desiguales. Las posiciones no tienen tamaño; son propiedades de los lugares más que lugares. Y como el movimiento de un todo es la suma de los movimientos de sus partes, el lugar de un todo es la suma de los lugares de sus partes, dentro del cuerpo entero.

Luego el movimiento. El movimiento absoluto es el paso de un cuerpo de un lugar absoluto a otro; el movimiento relativo es el paso de un lugar relativo a otro. En un barco a vela, el lugar relativo de un cuerpo es la parte del barco que llena, que se mueve con el barco, y el reposo

relativo es quedarse en esa parte. El reposo verdadero sería quedarse en la misma parte del espacio inmóvil, por el que es llevado el barco con todo lo que contiene. Así que si la Tierra está de verdad en reposo, un cuerpo que reposa en el barco se mueve realmente con la velocidad del barco sobre la Tierra; y si la Tierra también se mueve, el movimiento verdadero del cuerpo se compone del movimiento de la Tierra, del movimiento del barco sobre la Tierra y del movimiento propio del cuerpo en el barco.

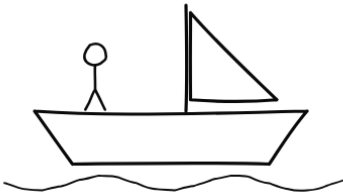


$$v = 10\ 010 - 10 + 1 = 10\ 001$$

REAL, ESTE

$$-10 + 1 = -9$$

EN TIERRA: 9 O



La velocidad del marinero

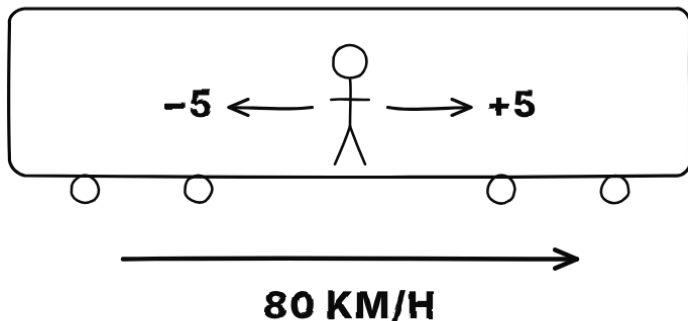
Newton le pone cifras. Que la parte de la Tierra bajo el barco se mueva de verdad hacia el este con 10 010 partes de velocidad, que el barco navegue hacia el oeste con 10 partes y que un marinero camine por el barco hacia el este con 1 parte. Contando el este como positivo, la

velocidad verdadera del marinero es $v = 10\,010 - 10 + 1 = 10\,001$ partes hacia el este. En palabras: las velocidades a lo largo de una misma línea simplemente se suman, cada una medida desde lo que la lleva. Su velocidad respecto a la Tierra deja fuera la parte de la propia Tierra: $-10 + 1 = -9$, nueve partes hacia el oeste. Así que un mismo marinero corre hacia el este por el espacio mientras va a la deriva hacia el oeste a lo largo de la costa. El GPS de un teléfono muestra exactamente el segundo tipo de cifra: su velocidad sobre el suelo, que deja fuera por completo el movimiento de la propia Tierra.

Pruébalo

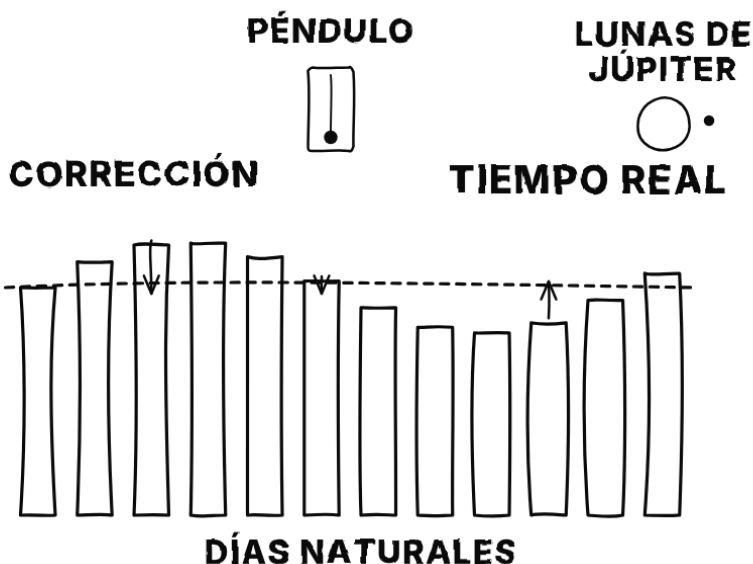
Camine hacia delante por el pasillo de un tren en marcha con una aplicación de velocidad GPS abierta. La aplicación muestra la velocidad del tren más su paso, quizá 80 kilómetros por hora más 5, así que 85. Camine hacia atrás y muestra 80 menos 5, así que 75. La aplicación suma velocidades a lo largo de una línea, igual que hace Newton con el marinero, y se detiene en el suelo, sin incluir nunca el movimiento de la propia Tierra.

ATRÁS: 75 ADELANTE: 85



Caminar en un tren

Volvamos al tiempo, donde la astronomía traza la línea en la práctica. El tiempo absoluto se separa del relativo mediante la ecuación, o corrección, del tiempo común. Los días naturales, de sol a sol, son en verdad desiguales, aunque la gente los trata como iguales y los usa para medir el tiempo; los astrónomos corrigen esta desigualdad para calcular con exactitud los movimientos de los cielos. Esa corrección es lo que mostraba su reloj de sol: un cuarto de hora en un sentido u otro según la estación.



Los días naturales son desiguales

Puede ser, añade Newton, que ningún movimiento sea perfectamente uniforme, de modo que el tiempo nunca pueda medirse con exactitud; todo movimiento puede acelerarse o frenarse, pero el fluir del tiempo verdadero no puede cambiar. La duración de las cosas es la misma tanto si sus movimientos son rápidos como lentos o no existen en absoluto, así que la duración debe mantenerse aparte de sus medidas visibles, y recuperarse de ellas mediante la corrección de los astrónomos. Dos cosas prueban que la corrección es necesaria: los experimentos con relojes de péndulo y los eclipses de las lunas de Júpiter, cuyos tiempos solo cuadran una vez corregidos los días desiguales. Los relojes de los satélites que mantienen la hora de su teléfono se corrigen con el mismo espíritu, para que lo que cuentan coincida con el tiempo constante que necesitan los cálculos.

Para recordar

El tiempo verdadero fluye uniformemente por sí mismo, y todo reloj, un día, un péndulo o su teléfono, es solo un movimiento que se usa para medirlo. El espacio verdadero nunca se mueve; los espacios que medimos están fijados por cuerpos y pueden estar viajando a través de él. Un lugar es la parte del espacio que llena un cuerpo, y el movimiento verdadero es el paso entre lugares del espacio verdadero, mientras que el movimiento relativo se mide respecto a un entorno en movimiento. El marinero de Newton va 10 010 menos 10 más 1, es decir, 10 001 partes hacia el este de verdad, mientras va 9 partes hacia el oeste respecto a la Tierra. Los astrónomos recuperan el tiempo verdadero a partir de los días naturales desiguales mediante una corrección, cuya necesidad muestran los relojes de péndulo y los eclipses de las lunas de Júpiter.

Preguntas

1. Al reloj de su teléfono se le llama t' y no t . ¿Por qué?
 - a. Porque siempre está mal
 - b. Porque es una medida de la duración hecha por algún movimiento, no el tiempo verdadero mismo
 - c. Porque mide el espacio, no el tiempo
 - d. Porque solo cuenta días

2. En un barco en movimiento, ¿qué es el reposo relativo de un cuerpo?
 - a. Quedarse en la misma parte del espacio inmóvil
 - b. Quedarse en la misma parte del barco, que se mueve con el barco
 - c. Moverse con la velocidad del barco sobre la Tierra
 - d. Moverse contra el viento
3. La Tierra se mueve hacia el este con 10 010 partes, el barco hacia el oeste con 10 y el marinero hacia el este en el barco con 1.
 1. ¿Cuál es la velocidad del marinero respecto a la Tierra?
 - a. 10 001 partes hacia el este
 - b. 11 partes hacia el oeste
 - c. 9 partes hacia el oeste
 - d. 1 parte hacia el este
4. ¿Qué muestran los relojes de péndulo y los eclipses de las lunas de Júpiter, según Newton?
 - a. Que el tiempo absoluto no existe
 - b. Que la corrección de los días naturales desiguales es necesaria
 - c. Que la Tierra está en reposo
 - d. Que todos los movimientos son perfectamente uniformes

Respuestas

1. b) El tiempo relativo es cualquier medida visible de la duración hecha por algún movimiento; el teléfono cuenta las vibraciones de un cristal, así que da t' , que solo después de corregirse dice t .

2. b) El lugar relativo de un cuerpo es la parte del barco que llena, que se mueve con el barco, y el reposo relativo es quedarse en esa parte.

3. c) Respecto a la Tierra, la parte de la propia Tierra desaparece: $-10 + 1 = -9$, nueve partes hacia el oeste.

4. b) Dos cosas prueban que la corrección es necesaria: los experimentos con relojes de péndulo y los eclipses de las lunas de Júpiter.

Ejemplos resueltos

Las dos velocidades del marinero La parte de la Tierra bajo el barco se mueve hacia el este con 10 010 partes de velocidad, el barco navega hacia el oeste con 10 partes y un marinero camina por el barco hacia el este con 1 parte. Halle la velocidad verdadera del marinero y su velocidad respecto a la Tierra.

Cuente el este como positivo; las velocidades a lo largo de una misma línea se suman, cada una medida desde lo que la lleva.

Velocidad verdadera: $v = 10\ 010 - 10 + 1 = 10\ 001$ partes, hacia el este.

Respecto a la Tierra, quite la parte de la Tierra: $-10 + 1 = -9$, así que 9 partes hacia el oeste.

Respuesta: 10 001 partes hacia el este de verdad; 9 partes hacia el oeste respecto a la Tierra

Ejercicios

1. Mantenga las 10 010 partes de la Tierra hacia el este y las 10 del barco hacia el oeste, pero deje que el marinero camine hacia el oeste con 1 parte. ¿Cuáles son sus velocidades verdadera y relativa?

Pista: Cuente el este como positivo y sume las tres velocidades.

Respuesta: Verdadera: $10\ 010 - 10 - 1 = 9\ 999$ partes hacia el este.

Respecto a la Tierra: $-10 - 1 = -11$, así que 11 partes hacia el oeste.

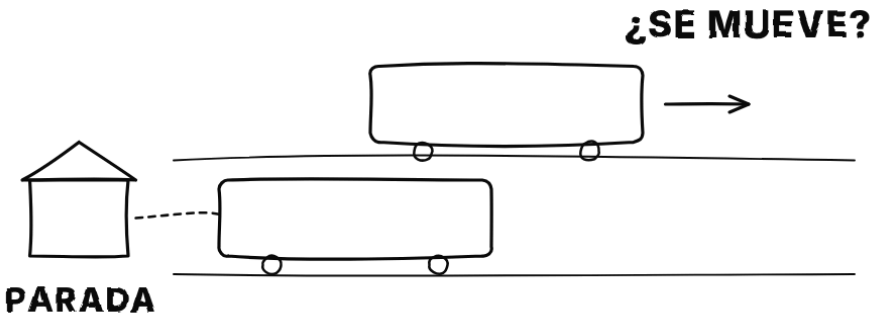
2. Un tren va a 80 kilómetros por hora y usted camina hacia la parte delantera a 5. ¿Qué velocidad muestra una aplicación GPS, y qué deja fuera?

Pista: Sume las velocidades a lo largo de la línea, medidas desde el suelo.

Respuesta: 85 kilómetros por hora: $80 + 5$. Deja fuera el movimiento de la propia Tierra, porque solo mide respecto al suelo.

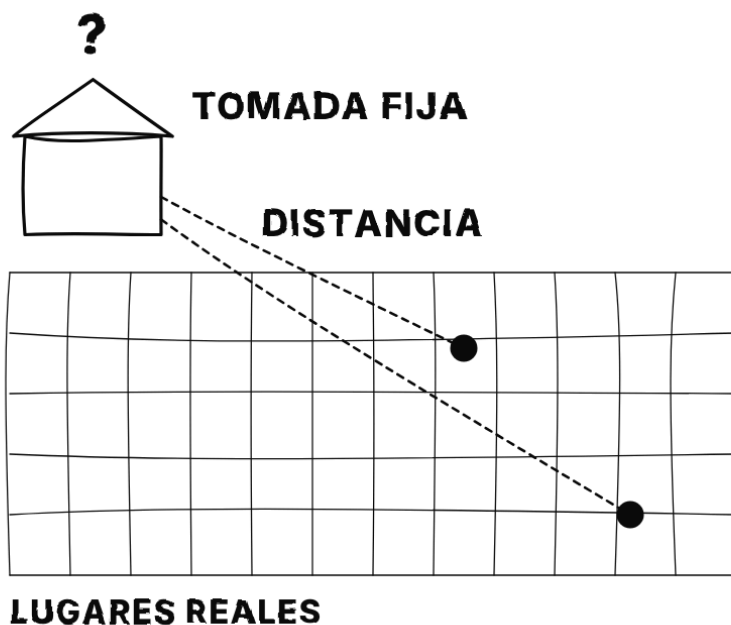
Por qué el movimiento verdadero no se lee en los vecinos

Siéntese en un tren en un andén mientras el tren de la vía de al lado empieza a rodar. Durante unos segundos juraría que es usted quien se mueve, hasta que mira la torre del reloj de la estación y ve que nada ha cambiado. Sus ojos le compararon con la cosa grande más cercana, y la cosa grande más cercana se movía. Newton se pregunta si alguna comparación con los vecinos podría decidir alguna vez quién se mueve de verdad, y su respuesta es que no.



¿Quién se mueve?

Empieza por el orden. Las partes del tiempo conservan su orden para siempre: este momento nunca intercambia su sitio con el siguiente. Las partes del espacio están igual de fijas: mover una parte del espacio fuera de su lugar sería moverla fuera de sí misma, como dice Newton, porque los tiempos y los espacios son los lugares de sí mismos y de todo lo demás. Todo está en el tiempo en un orden de sucesión y en el espacio en un orden de situación, así que estos son los lugares verdaderos y absolutos, y salir de ellos es el único movimiento verdadero.

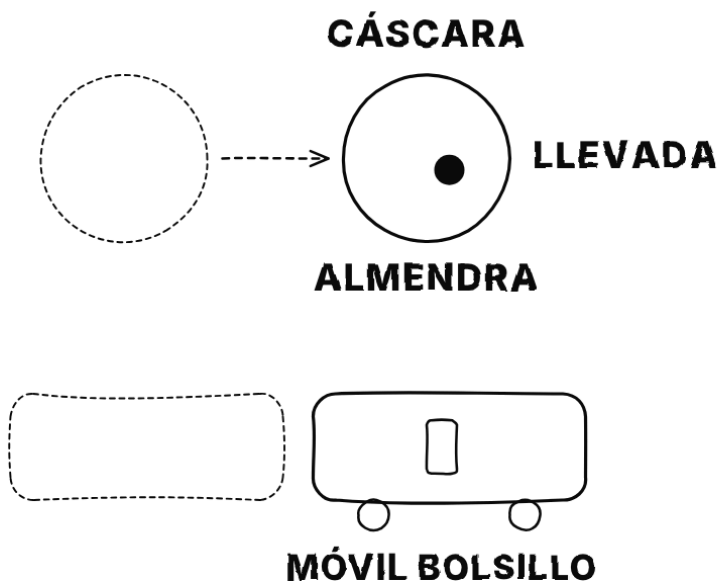


Lugares medidos desde un cuerpo

El problema es que no podemos ver las partes del espacio ni distinguir una de otra. Así que elegimos un cuerpo que tratamos como inmóvil, una estación, el suelo, la costa, y definimos cada lugar por sus

distancias y direcciones desde ese cuerpo; luego juzgamos cada movimiento respecto a esos lugares. Para la vida cotidiana esto no hace ningún daño. Pero en la filosofía natural, dice Newton, debemos mirar más allá de nuestros sentidos, a las cosas mismas, porque puede que no haya en ninguna parte un cuerpo de verdad en reposo desde el que medir. El mapa de su teléfono hace exactamente esto: mide cada posición desde el suelo que pisa, tomado como fijo, lo cual funciona perfectamente para encontrar una cafetería y no dice nada de cómo se mueve la propia Tierra.

Promete distinguir el movimiento verdadero del relativo por sus propiedades, sus causas y sus efectos, y empieza por las propiedades. La primera propiedad: los cuerpos de verdad en reposo están en reposo unos respecto a otros. Podría haber un cuerpo de verdad en reposo entre las lejanas estrellas fijas o mucho más allá; pero a partir de las posiciones de los cuerpos de nuestra parte del mundo nunca podremos saber si alguno de ellos mantiene una posición fija respecto a él. Así que el reposo verdadero no puede hallarse a partir de las posiciones de los cuerpos cercanos.

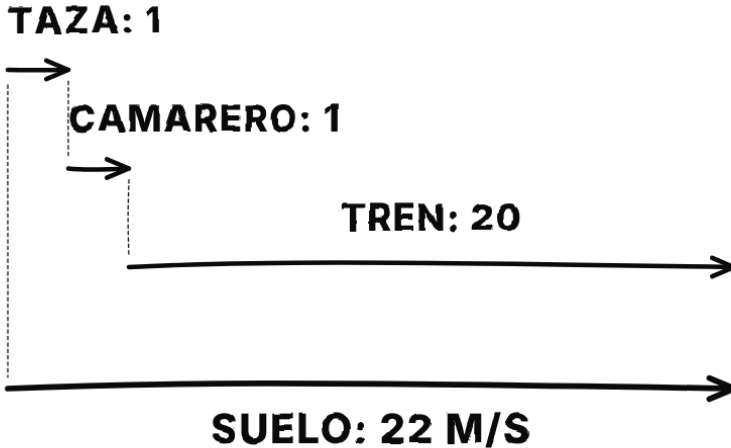


Si la cáscara se mueve, la almendra se mueve

La segunda propiedad: las partes que mantienen posiciones fijas dentro de un todo participan del movimiento del todo. Cada parte de un cuerpo que gira se esfuerza por alejarse del eje, y el empuje hacia delante de un cuerpo en movimiento es la suma de los empujes de sus partes. Así que si los cuerpos de alrededor se mueven, lo que reposa entre ellos se mueve con ellos. Por eso el movimiento verdadero no puede hallarse observando un cuerpo respecto a cosas que solo parecen estar en reposo: esas cosas tendrían que estar de verdad en reposo. La imagen de Newton es una cáscara y su almendra: si la cáscara se mueve, la almendra también se mueve, como parte del todo, sin alejarse nunca de la cáscara. El teléfono quieto en su bolsillo en un autobús en marcha es la almendra; el autobús es la cáscara, y el teléfono viaja con él aunque nunca se desplaza dentro de su bolsillo.

La tercera propiedad se sigue de cerca: si un lugar se mueve, todo lo que hay en él se mueve con él, así que un cuerpo que sale de un lugar en movimiento también participa del movimiento del lugar. Todo movimiento medido desde un lugar en movimiento es, por tanto, solo una parte del movimiento entero y verdadero. El todo se construye paso a paso: el movimiento del cuerpo dentro de su lugar, más el movimiento de ese lugar dentro de su propio lugar, y así sucesivamente, hasta llegar a algún lugar inmóvil, como con el marinero que ya conocimos. En símbolos, con cada movimiento medido desde el lugar que lo lleva, $v_{\text{verd}} = v_1 + v_2 + v_3 + \dots$. En palabras: el movimiento verdadero es la suma de todos los movimientos anidados, hasta llegar a un lugar que no se mueve. Un cálculo: una taza de café se desliza hacia delante sobre una bandeja a 1 metro por segundo, el camarero camina hacia delante a 1 metro por segundo por un tren, y el tren corre a 20 metros por segundo sobre el suelo, así que respecto al suelo la taza se mueve a $1 + 1 + 20 = 22$ metros por segundo, y ese todavía no es su movimiento verdadero, porque el propio suelo es llevado.

$$v_{true} = v_1 + v_2 + v_3 + \dots$$

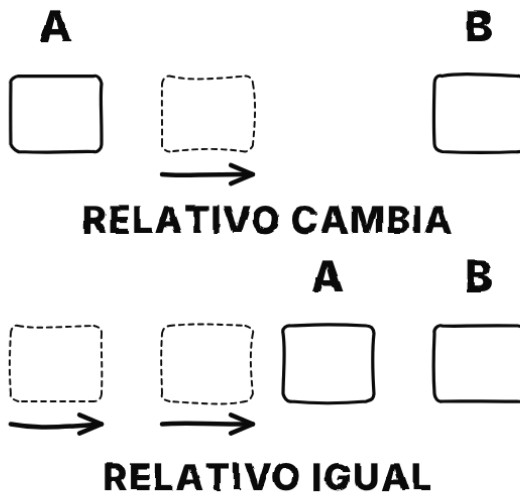


El movimiento verdadero es una suma

Así que los movimientos enteros y verdaderos solo pueden fijarse respecto a lugares inmóviles, y por eso Newton refirió el movimiento verdadero a lugares inmóviles y el relativo a lugares móviles. Y los únicos lugares inmóviles son aquellos que, de infinito a infinito, conservan todas las mismas posiciones unos respecto a otros; juntos forman el espacio inmóvil.

Luego vienen las causas. Lo que separa el movimiento verdadero del relativo es la fuerza impresa sobre un cuerpo. El movimiento verdadero nunca se crea ni se cambia sino por una fuerza aplicada sobre el propio cuerpo. El movimiento relativo puede crearse o cambiarse sin ninguna fuerza sobre el cuerpo: basta con empujar los cuerpos con los que se compara, para que se alejen y la relación

cambie. Y también ocurre al revés: una fuerza sobre el cuerpo siempre cambia su movimiento verdadero, pero su movimiento relativo no tiene por qué cambiar, si se aplica la misma fuerza a los cuerpos con los que se compara, de modo que sus posiciones relativas sigan siendo las mismas. Cuando su autobús frena, el teléfono de su bolsillo y usted frenan juntos; respecto a usted el teléfono no se mueve en absoluto, pero su movimiento verdadero ha cambiado claramente.



Empujar el otro cuerpo

Así que el movimiento relativo puede cambiar mientras el verdadero sigue igual, y seguir igual mientras el verdadero cambia. El movimiento verdadero, concluye Newton, simplemente no consiste en tales relaciones.

Para recordar

Las partes del tiempo y del espacio conservan su orden para siempre, y salir de esos lugares verdaderos es el único movimiento verdadero. Como no podemos ver las partes del espacio, medimos desde cuerpos que tratamos como quietos, lo cual funciona en la vida diaria pero no puede revelar el reposo verdadero. Las partes participan del movimiento de su todo, como la almendra se mueve con su cáscara, y el movimiento verdadero es la suma de movimientos anidados hasta un lugar inmóvil. Una fuerza sobre un cuerpo siempre cambia su movimiento verdadero, mientras que su movimiento relativo puede cambiar sin ninguna fuerza sobre él, o seguir igual a pesar de una. Así que el movimiento verdadero no consiste en relaciones con otros cuerpos.

Preguntas

1. ¿Por qué el reposo verdadero no puede hallarse a partir de las posiciones de los cuerpos cercanos?
 - a. Porque los cuerpos cercanos siempre se mueven
 - b. Porque un cuerpo de verdad en reposo podría estar mucho más allá de las estrellas, y las posiciones cercanas no pueden mostrar si los cuerpos se mantienen quietos respecto a él
 - c. Porque las posiciones no pueden medirse
 - d. Porque el reposo no existe

2. ¿Qué muestra la imagen de la cáscara y la almendra de Newton?
- a. Que la almendra solo se mueve si sale de la cáscara
 - b. Que las partes que mantienen posiciones fijas dentro de un todo participan del movimiento del todo
 - c. Que las cáscaras se mueven más rápido que las almendras
 - d. Que solo la cáscara tiene un movimiento verdadero
3. Usando $v_{\text{verd}} = v_1 + v_2 + v_3 + \dots$, una taza se desliza a 1 m/s sobre una bandeja, el camarero camina a 1 m/s por un tren y el tren corre a 20 m/s. ¿Cuál es la velocidad de la taza sobre el suelo?
- a. 20 metros por segundo
 - b. 21 metros por segundo
 - c. 22 metros por segundo
 - d. 2 metros por segundo
4. ¿Cómo puede cambiar el movimiento relativo de un cuerpo sin ninguna fuerza aplicada sobre él?
- a. No puede: el movimiento relativo necesita una fuerza sobre el cuerpo
 - b. Empujando los cuerpos con los que se compara, de modo que la relación cambie
 - c. Por el paso del tiempo absoluto
 - d. Por la propia inercia del cuerpo

Respuestas

1. **b)** Podría haber un cuerpo de verdad en reposo entre las lejanas estrellas fijas o más allá, pero a partir de las posiciones de los cuerpos de nuestra

parte del mundo nunca podremos saber si alguno mantiene una posición fija respecto a él.

2. b) Si la cáscara se mueve, la almendra también se mueve, como parte del todo, sin alejarse nunca de la cáscara.

3. c) Cada movimiento se mide desde el lugar que lo lleva, y los movimientos anidados se suman: $1 + 1 + 20 = 22$ metros por segundo.

4. b) El movimiento relativo puede crearse o cambiarse sin ninguna fuerza sobre el cuerpo: basta con empujar los cuerpos con los que se compara, para que se alejen y la relación cambie.

Ejemplos resueltos

Movimientos anidados en un tren Una taza de café se desliza hacia delante sobre una bandeja a 1 metro por segundo, el camarero camina hacia delante por el tren a 1 metro por segundo y el tren corre sobre el suelo a 20 metros por segundo. Halle la velocidad de la taza sobre el suelo.

El movimiento verdadero se construye con movimientos anidados, cada uno medido desde el lugar que lo lleva.

Súmelos: $v = 1 + 1 + 20$.

El resultado es 22 metros por segundo sobre el suelo; el movimiento del propio suelo todavía queda fuera.

Respuesta: 22 metros por segundo respecto al suelo

Ejercicios

1. Ahora el camarero camina hacia atrás por el tren a 1 metro por segundo mientras la taza sigue deslizándose hacia delante sobre la bandeja a 1 metro por segundo; el tren corre a 20 metros por segundo. ¿Cuál es la velocidad de la taza sobre el suelo?

Pista: Cuente hacia delante como positivo y sume los tres movimientos anidados.

Respuesta: 20 metros por segundo: $1 - 1 + 20 = 20$.

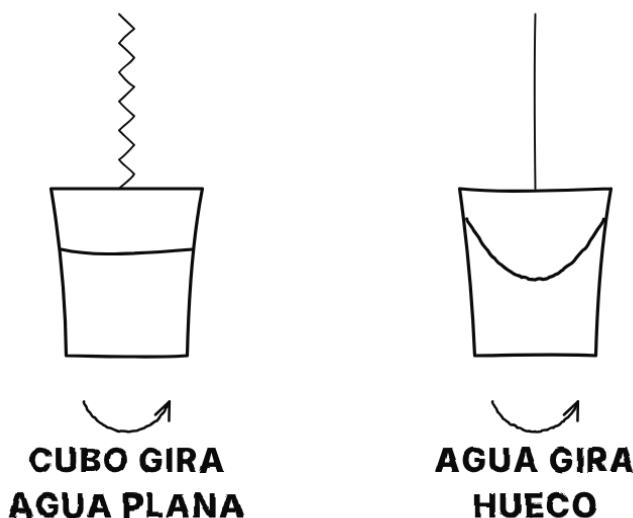
2. Explique por qué una fuerza sobre un cuerpo siempre cambia su movimiento verdadero pero no tiene por qué cambiar su movimiento relativo.

Pista: Piense en qué pasa si los cuerpos con los que se compara se empujan del mismo modo.

Respuesta: El movimiento verdadero solo cambia por una fuerza sobre el propio cuerpo, así que una fuerza sobre él siempre lo cambia. Pero si las mismas fuerzas actúan sobre los cuerpos con los que se compara, sus posiciones relativas siguen siendo las mismas, así que el movimiento relativo no cambia.

El cubo, los dos globos y el propósito del libro

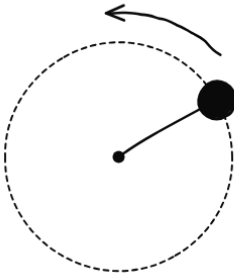
Cuelgue un cubo pequeño con agua de una cuerda larga, retuerza la cuerda muchas veces, sujete el cubo quieto y luego suéltelo. Mientras la cuerda se desenrolla, el cubo gira cada vez más rápido, pero durante un rato el agua de dentro se mantiene plana. Luego, poco a poco, el agua empieza a girar, su centro se hunde y sube por las paredes formando un hueco, hasta que agua y cubo giran juntos. Newton hizo este experimento él mismo, y es el efecto que por fin separa el movimiento verdadero del relativo.



Los efectos que distinguen el movimiento absoluto del relativo, dice, son las fuerzas de alejarse del eje del movimiento circular, el empuje hacia fuera de todo lo que gira. Un giro puramente relativo no produce tal empuje; un giro verdadero produce más o menos, según cuánto movimiento circular haya. Hoy describimos ese empuje con una fórmula para la fuerza necesaria para mantener una masa m moviéndose a velocidad v en un círculo de radio r : $F = mv^2/r$. En palabras: cuanto más rápido gira algo, y más cerrado es su círculo, con más fuerza tira hacia fuera, creciendo con el cuadrado de la velocidad. La intuición es la honda que vimos al principio: haga girar la piedra el doble de rápido y la honda tira cuatro veces más fuerte. Un cálculo: una bola de 1 kilogramo que gira a 2 metros por segundo en una cuerda de 1 metro tira con $1 \times 2^2 / 1 = 4$ newtons; a 4 metros por segundo tira con $1 \times 4^2 / 1 = 16$ newtons.

$$F = \frac{m v^2}{r}$$

F: TIRÓN, M: MASA
V: VELOC., R: RADIO



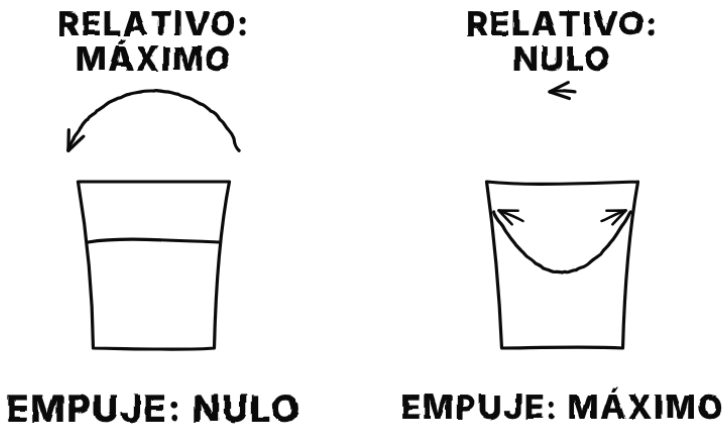
$$V = 2: F = 4 \text{ N}$$

$$V = 4: F = 16 \text{ N}$$

El tirón hacia fuera: $F = mv^2/r$

Ahora lea el cubo con eso en mente. Al principio el agua se movía lo más rápido posible respecto al cubo, ya que el cubo giraba alrededor de agua quieta, pero su superficie se mantenía plana: ningún empuje hacia fuera, así que todavía no había giro verdadero. Más tarde, a medida que el agua alcanzaba al cubo y su movimiento respecto a él disminuía, subía por las paredes, y subía más alto justo cuando giraba junto con el cubo y estaba en reposo respecto a él. La subida del agua sigue a su giro verdadero, que aquí va justo en sentido opuesto a su movimiento relativo, y el empuje puede incluso usarse para medirlo. Para un líquido que gira como una sola pieza, la fórmula actual para la subida en el borde sobre el centro es $h = \omega^2 r^2 / (2g)$, donde ω , la letra griega omega, es la velocidad de giro en radianes por segundo y g es el 9,8 de la gravedad. Girando a 2 vueltas por segundo, ω es de unos

12,6, así que en un cubo de radio 0,1 metros el borde sube unos $12,6^2 \times 0,1^2 / (2 \times 9,8) \approx 0,08$ metros, unos 8 centímetros.



El empuje sigue al giro verdadero

Así que el empuje no depende de ningún movimiento del agua respecto a las cosas que la rodean, y el movimiento circular verdadero no puede definirse por tal movimiento. Cada cuerpo que gira tiene un solo movimiento circular verdadero, al que corresponde un solo empuje hacia fuera, su efecto propio. Pero tiene innumerables movimientos relativos, uno por cada cuerpo con el que pueda compararse, y como simples relaciones no tienen ningún efecto real, salvo en la medida en que participan de aquel único movimiento verdadero. Esto zanja una vieja imagen de los cielos, en la que los planetas reposan dentro de esferas que giran bajo las estrellas fijas y

son llevados por ellas: esos planetas se moverían igualmente de verdad, ya que cambian sus posiciones unos respecto a otros, cosa que nunca hacen los cuerpos de verdad en reposo, y como partes de un todo que gira se esfuerzan por alejarse de su eje. El centrifugado de una lavadora muestra el empuje con toda su fuerza: el giro verdadero del tambor aprieta la ropa tan fuerte contra la pared que el agua sale despedida por los agujeros.

Pruébalo

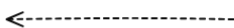
Remueva con fuerza una taza de té y saque la cucharilla.

Mientras el té gira, su superficie se hunde en el centro y sube en el borde. Mírelo desde su silla y luego desde el otro lado de la mesa: el hueco se ve exactamente igual desde los dos sitios, porque pertenece al giro verdadero del té y no a su punto de vista.

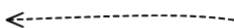
De todo esto Newton saca una lección sobre las palabras. Las cantidades relativas no son las cantidades cuyos nombres llevan, sino sus medidas visibles, exactas o no, que la gente usa comúnmente en su lugar. Si las palabras significan lo que el uso común les hace significar, entonces tiempo, espacio, lugar y movimiento deben entenderse como esas medidas, y usarlas para las cantidades verdaderas es inusual y puramente matemático. Así que quienes leen las cantidades verdaderas en las Sagradas Escrituras las fuerzan, y quienes mezclan las cantidades reales con sus relaciones y medidas comunes estropean la pureza de la verdad matemática y filosófica.

CANTIDADES $\neq$ MEDIDAS

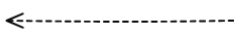
TIEMPO



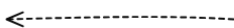
ESPACIO



LUGAR



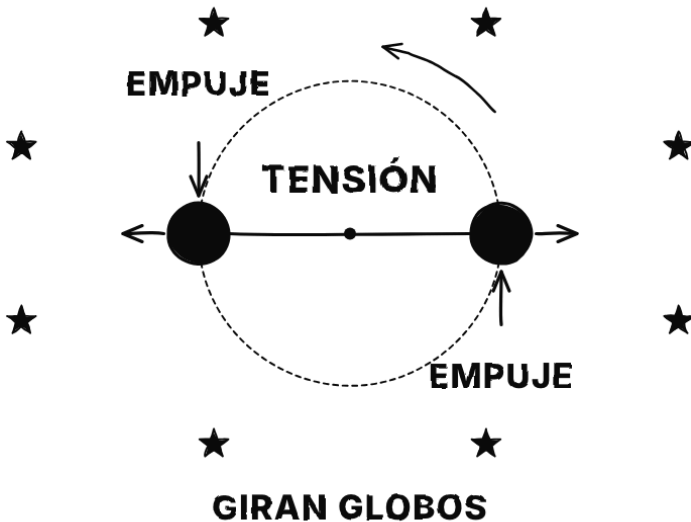
MOVIMIENTO



Cantidades y sus medidas

Hallar los movimientos verdaderos de cuerpos concretos es muy difícil, reconoce Newton, porque las partes del espacio inmóvil nunca pueden verse. Pero no es imposible, porque hay dos tipos de pista: los movimientos aparentes, que son las diferencias entre movimientos verdaderos, y las fuerzas, que son sus causas y efectos. Su ejemplo es un experimento mental. Dos globos, atados con una cuerda y mantenidos a una distancia fija, giran alrededor de su centro de gravedad común en un vasto espacio vacío. Por la tensión de la cuerda podemos hallar su empuje hacia fuera y, a partir de él, cuánto movimiento circular tienen. Con $F = mv^2/r$ en la mano: si cada globo tiene 1 kilogramo, está a 1 metro del centro y la cuerda tira con 4 newtons, entonces $v^2 = Fr/m = 4$, así que cada globo se mueve a 2 metros por segundo, hallado sin mirar nada exterior.

ESTRELLAS FIJAS



Dos globos unidos por una cuerda

Después, aplique fuerzas iguales en el mismo instante sobre caras correspondientes de los dos globos. Si la cuerda se tensa más, esas fuerzas aceleraron los globos; si se afloja, los frenaron. Eso nos dice qué caras van detrás en el giro, y por tanto qué caras van delante, y así en qué sentido giran los globos. Así que tanto la cantidad como la dirección del movimiento circular pueden hallarse incluso en un inmenso espacio vacío sin nada con que comparar los globos.

Ahora añada algunos cuerpos lejanos que mantengan siempre las mismas posiciones unos respecto a otros, como hacen las estrellas fijas. Viendo moverse los globos respecto a ellos, no podríamos saber si giraban los globos o los cuerpos lejanos. Pero si la tensión de la cuerda es justo la que requiere el movimiento de los globos, podemos

concluir que se mueven los globos y que los cuerpos están en reposo, y entonces, por el paso de los globos entre los cuerpos, podemos hallar la dirección de su movimiento. El giroscopio de un teléfono funciona con este espíritu: detecta su propio giro verdadero a partir de fuerzas dentro del chip, sin mirar nada exterior, y así sabe su pantalla que la ha girado en una habitación a oscuras.

Cómo obtener los movimientos verdaderos a partir de sus causas, efectos y diferencias aparentes y, a la inversa, cómo conocer las causas y los efectos a partir de los movimientos, verdaderos o aparentes, es lo que explica el resto del libro. Con ese propósito, dice Newton, lo escribí. Con estas definiciones y este escolio, el escenario está listo: la materia, el movimiento y la fuerza están medidos, el movimiento verdadero está separado del que solo aparece, y las leyes del movimiento pueden empezar.

Para recordar

El movimiento circular verdadero se delata por un empuje hacia fuera, que crece como mv^2/r , mientras que un giro meramente relativo no tiene ninguno. En el cubo de Newton el agua sube por las paredes solo a medida que crece su giro verdadero, al máximo cuando está en reposo respecto al cubo, así que la rotación verdadera no es una relación con los cuerpos que la rodean. Las palabras cotidianas como tiempo y movimiento nombran nuestras medidas, y las cantidades reales no deben confundirse con esas medidas. Dos globos unidos por una cuerda muestran cómo las fuerzas revelan el movimiento: la tensión de la cuerda da la cantidad de giro y los empujones adicionales dan su dirección, incluso sin nada exterior con que comparar. Hallar los movimientos verdaderos a partir de causas, efectos y apariencias, y las causas a partir de los movimientos, es el propósito de todo el libro.

Preguntas

1. Usando $F = mv^2/r$, ¿qué le pasa al tirón de una bola que gira cuando su velocidad se duplica con la misma cuerda?
 - a. Se duplica
 - b. Sigue igual
 - c. Se hace cuatro veces mayor
 - d. Se reduce a la mitad

2. ¿Por qué, según Newton, las palabras cotidianas como tiempo y movimiento significan propiamente sus medidas?
 - a. Porque las cantidades verdaderas no existen
 - b. Porque el significado de las palabras lo fija su uso común
 - c. Porque las medidas son siempre exactas
 - d. Porque las Escrituras las definen así
3. Dos globos unidos por una cuerda giran en el espacio vacío. Empujones iguales sobre caras correspondientes tensan más la cuerda. ¿Qué nos dice eso?
 - a. Los empujones frenaron los globos
 - b. Los empujones aceleraron los globos, así que esas caras van detrás en el giro
 - c. Los globos dejaron de girar
 - d. Nada, sin estrellas con que comparar
4. Con cuerpos lejanos alrededor, ¿cómo podemos decidir que se mueven los globos y no los cuerpos?
 - a. Viendo pasar los globos entre los cuerpos
 - b. Comprobando que la tensión de la cuerda es justo la que requiere el movimiento de los globos
 - c. Pesando los cuerpos lejanos
 - d. Nunca puede decidirse

Respuestas

1. c) El tirón crece con el cuadrado de la velocidad: el doble de velocidad da cuatro veces el tirón, como los 4 newtons a 2 metros por segundo pasan a ser 16 a 4.

2. b) Si las palabras significan lo que el uso común les hace significar, entonces tiempo, espacio, lugar y movimiento deben entenderse como sus medidas.

3. b) Si la cuerda se tensa más, esas fuerzas aceleraron los globos, lo que nos dice qué caras van detrás y por tanto en qué sentido giran los globos.

4. b) Si la tensión de la cuerda es justo la que requiere el movimiento de los globos, podemos concluir que se mueven los globos y que los cuerpos están en reposo.

Ejemplos resueltos

La velocidad de los globos a partir de la cuerda Dos globos de 1 kilogramo cada uno giran a 1 metro de su centro común, y la cuerda tira de cada uno con 4 newtons. ¿A qué velocidad se mueve cada globo?

La cuerda aporta la fuerza hacia dentro $F = mv^2/r$ que mantiene girando cada globo.

Despeje la velocidad: $v^2 = Fr/m = 4 \times 1 / 1 = 4$.

Saque la raíz cuadrada: $v = 2$.

Respuesta: 2 metros por segundo

Ejercicios

1. Usando $F = mv^2/r$, ¿con qué fuerza tira una bola de 1 kilogramo de una cuerda de 1 metro cuando gira a 3 metros por segundo?

Pista: Eleve la velocidad al cuadrado, multiplíquela por la masa y divida por el radio.

Respuesta: 9 newtons: $1 \times 3^2 / 1 = 9$.

2. En el experimento de los globos, la cuerda tira ahora con 9 newtons de cada globo de 1 kilogramo a 1 metro del centro. ¿A qué velocidad se

mueve cada globo?

Pista: Use $v^2 = Fr/m$ y saque la raíz cuadrada.

Respuesta: 3 metros por segundo: $v^2 = 9 \times 1 / 1 = 9$, así que $v = 3$.

3. Explique por qué el agua del cubo de Newton sube por las paredes solo cuando gira de verdad.

Pista: Compare la superficie plana del principio con el hueco del final.

Respuesta: Al principio el agua se mueve lo más rápido posible respecto al cubo pero se mantiene plana, así que no tiene empuje hacia fuera y aún no gira de verdad. A medida que crece su propio giro verdadero, crece el empuje y sube, al máximo cuando está en reposo respecto al cubo.