

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

Materia, movimiento y el tirón hacia un centro

Un tirón, tres medidas y el tiempo mismo

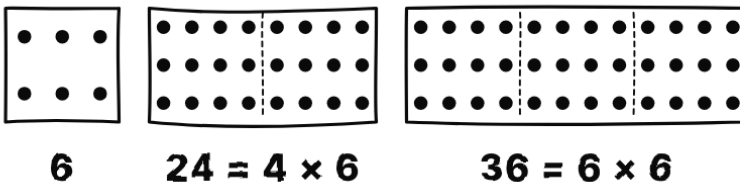
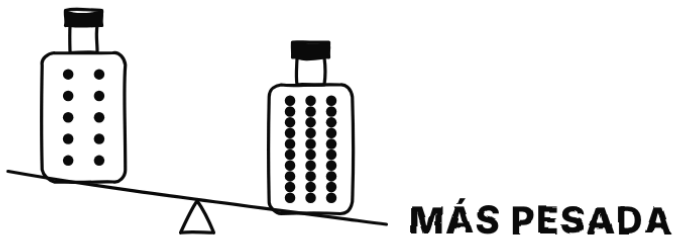
Lugares, un marinero, y por qué el reposo no puede verse

La almendra, la cáscara y el cubo que gira

Dos globos en un cielo vacío

Materia, movimiento y el tirón hacia un centro

Tome dos botellas de plástico idénticas. Deje una con aire a presión normal y el tapón puesto; llene la otra de aire con una bomba de bicicleta hasta que quede dura. Ocupan el mismo sitio, pero la dura contiene más aire, y una báscula de cocina sensible incluso la marca un poco más pesada. Así que el tamaño de una cosa no dice cuánta materia hay en ella. Esa es la primerísima pregunta que Newton responde en su gran libro, antes de enunciar ninguna ley del movimiento.

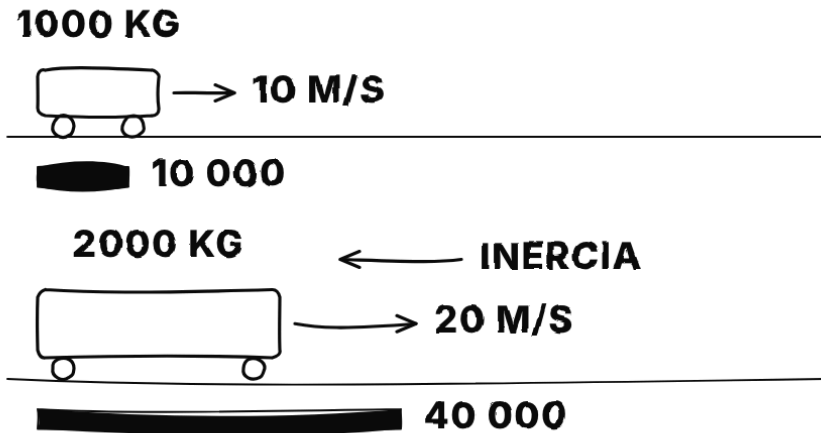


Su respuesta es que la cantidad de materia se mide por lo apretada que está la materia y por cuánto sitio ocupa, las dos cosas multiplicadas. El apretamiento y el sitio se multiplican porque cada uno cuenta por sí mismo: piense en una multitud, donde el doble de personas en cada metro cuadrado, sobre el doble de metros cuadrados, da una multitud cuatro veces mayor. El ejemplo de Newton es el aire: un aire el doble de denso, que llena el doble de espacio, es cuatro veces más aire, y el mismo aire denso en el triple de espacio es seis veces más. La nieve prensada hasta hacerse hielo, o el polvo comprimido en una pastilla, cambia de tamaño y de apretamiento, pero no de cantidad de materia. Esta cantidad es lo que llama, a partir de entonces, cuerpo o masa.

Newton deja de lado, a propósito, cualquier medio sutil que pudiera fluir entre las partes de los cuerpos; solo cuenta la materia del propio cuerpo. Luego hace una afirmación nada evidente: la masa de un cuerpo es proporcional a su peso. Lo descubrió con experimentos muy cuidadosos con péndulos, que promete describir más adelante: péndulos de la misma longitud oscilan en el mismo tiempo sea cual sea el material de su masa, y eso solo puede ocurrir si el peso crece exactamente al mismo paso que la masa. Por eso la báscula de su baño, que en realidad siente un tirón, puede mostrar honradamente su masa en kilogramos.

La segunda definición se apoya en la primera: la cantidad de movimiento es la masa y la velocidad multiplicadas; hoy se llama momento lineal. La razón es que el movimiento de un cuerpo entero no es más que el movimiento de sus partes sumado, así que el doble de materia moviéndose a la misma velocidad es el doble de movimiento. Las cifras de Newton: un cuerpo con el doble de materia a la misma velocidad tiene el doble de movimiento, y si además va el

doble de rápido, tiene cuatro veces el movimiento. Un coche pequeño de mil kilogramos a diez metros por segundo lleva diez mil unidades de movimiento; una furgoneta de dos mil kilogramos a veinte metros por segundo lleva cuarenta mil, cuatro veces más, y necesita mucha más carretera para detenerse.



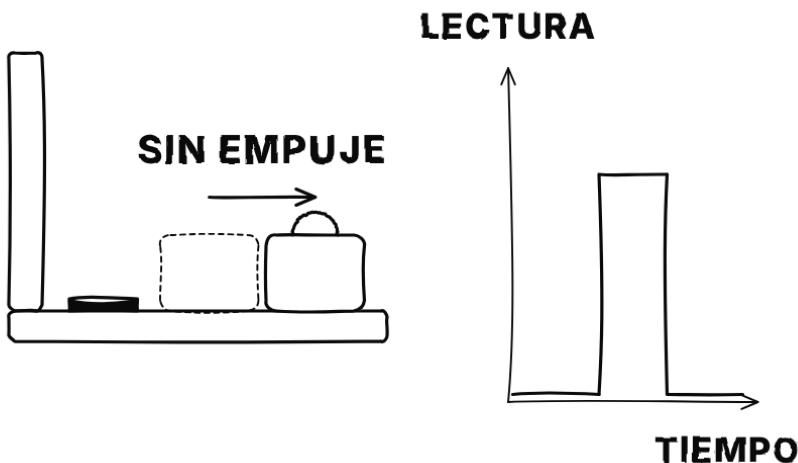
Masa por velocidad

La tercera definición nombra algo que todo el mundo siente: la fuerza nacida en la propia materia, que Newton llama en latín vis insita. Es un poder de resistir por el cual todo cuerpo, en la medida en que puede, sigue haciendo lo que hace, quedándose en reposo o avanzando recto a velocidad constante. Este poder es proporcional a la cantidad de materia, y no es más que la pereza de la materia vista desde otro lado; el nombre más acertado que le da Newton es fuerza

de inactividad, *vis inertiae*, de donde viene la palabra inercia. Un cuerpo la muestra solo cuando algo intenta cambiar su estado: desde el lado del cuerpo empujado, parece resistencia; desde el lado de un cuerpo en movimiento que empuja contra otro, parece impulso. Y Newton añade una advertencia que importará más adelante: el reposo y el movimiento, tal como se suelen pensar, solo se distinguen en relación con otras cosas, y 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 inercia.

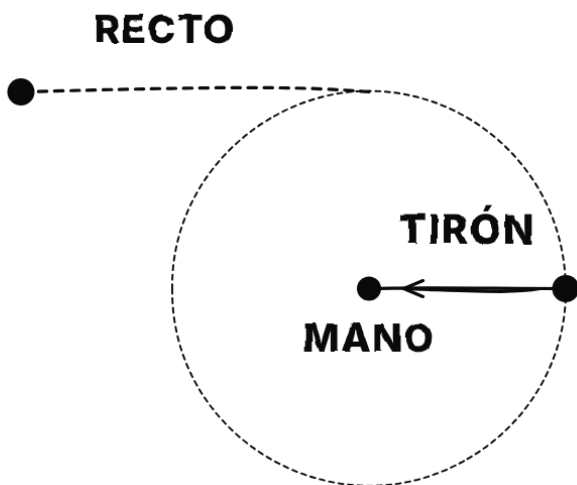


La bolsa sigue adelante

La cuarta definición: una fuerza impresa es una acción sobre un cuerpo que cambia su estado de reposo o de movimiento recto y constante. Existe solo mientras dura la acción; nada de ella queda después en el cuerpo, porque el cuerpo mantiene su nuevo estado solo por inercia. Estas fuerzas vienen de golpes, de la presión y de la fuerza centrípeta. Los frenos 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 introduce la fuerza de la que trata todo el libro: una fuerza centrípeta, la que atrae 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 un

imán; y también lo es la fuerza, sea cual sea, que curva a los planetas desde las líneas rectas hacia órbitas curvas. La imagen de Newton es una piedra que se hace girar en una honda: tira para escapar y tensa la honda, más cuanto más rápido va, y en el momento en que se suelta sale volando en línea recta. El tirón de la honda, siempre dirigido de vuelta a la mano en el centro, es la fuerza centrípeta, la fuerza que busca el centro, y todo cuerpo que gira en cualquier órbita necesita una, o se iría en línea recta.



El tirón hacia el centro

Luego viene la imagen más famosa de todas: un cañón en la cima de una montaña que dispara una bala de plomo a ras del suelo. Sin gravedad y sin aire, la bala seguiría recta para siempre; la gravedad curva su trayectoria hacia abajo, 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 cuatro millas y diez veces la velocidad, a veinte millas. La razón es que la bala tarda el mismo tiempo en caer la misma altura sea cual sea su velocidad, así que la distancia que recorre antes de caer crece exactamente con la velocidad. Hágala cada vez más rápida y la trayectoria se aplana, hasta que la bala cae a un cuarto de la vuelta a la Tierra, o la rodea entera antes de caer, o no baja nunca y sigue viajando hacia el cielo. Ese último caso es real: 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 y nunca llega a ella.

La Luna se sostiene exactamente así. Si el tirón hacia la Tierra fuera demasiado débil, la Luna se alejaría en línea recta; si fuera demasiado fuerte, la Luna sería arrastrada fuera de su órbita hacia abajo. El tirón tiene que ser justo el adecuado para la velocidad que tiene la Luna, y Newton nombra los dos problemas que su libro resolverá: a partir de una órbita y una velocidad dadas, hallar la fuerza; y a partir de una fuerza, un lugar y una velocidad dados, hallar el camino curvo. Los ingenieros que ponen un satélite en órbita resuelven exactamente estos dos problemas antes de cada lanzamiento.

Para recordar

La cantidad de materia es apretamiento por sitio, así que un aire el doble de denso en el doble de espacio es cuatro veces más, y esa cantidad, que Newton llama masa, es proporcional al peso. La cantidad de movimiento es masa por velocidad, así que el doble de masa al doble de velocidad es cuatro veces el movimiento. La inercia es la tendencia de un cuerpo a seguir haciendo lo que hace, 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 y cada satélite. Hallar la fuerza a partir de la órbita, y la órbita a partir de la fuerza, es la tarea que Newton fija para el resto del libro.

Preguntas

1. El aire se hace tres veces más denso y ocupa el doble de sitio. ¿Cuánto aire más hay?
 - a. Cinco veces más
 - b. Seis veces más
 - c. Tres veces más
 - d. El doble
2. ¿Qué le dicen a Newton los péndulos de la misma longitud que oscilan en el mismo tiempo, sea cual sea el material de su masa?

- a. Que el peso crece exactamente al mismo paso que la masa
 - b. Que todos los materiales tienen la misma densidad
 - c. Que la gravedad no afecta a los péndulos
 - d. Que los cuerpos más pesados caen más rápido
3. Una vez que los frenos han reducido la velocidad del coche y se suelta el pedal, ¿qué mantiene al coche a su nueva velocidad?
- a. Parte de la fuerza de frenado almacenada en el coche
 - b. El motor, que toma el relevo de los frenos
 - c. Un tirón hacia el centro de la Tierra
 - d. Solo su inercia
4. ¿Por qué una bala de cañón disparada el doble de rápido, sin aire, cae el doble de lejos?
- a. La gravedad atrae más débilmente a una bala más rápida
 - b. Una bala más rápida tiene más inercia y cae más despacio
 - c. Tarda el mismo tiempo en caer la misma altura, así que en ese tiempo recorre el doble
 - d. Una bala más rápida sube antes de caer

Respuestas

- 1. b)** El apretamiento y el sitio se multiplican, cada uno contando por sí mismo, así que tres veces el apretamiento sobre el doble de sitio es seis veces la materia.
- 2. a)** Los péndulos de la misma longitud oscilan en el mismo tiempo sea cual sea el material de su masa, y eso solo puede ocurrir si el peso crece exactamente al mismo paso que la masa.
- 3. d)** Una fuerza impresa existe solo mientras actúa; nada de ella queda en el cuerpo, que mantiene su nuevo estado solo por inercia.

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

Ejemplos resueltos

Aire el doble de denso Un aire el doble de denso llena el doble de espacio. En un segundo caso, el mismo aire más denso llena el triple de espacio. ¿Cuántas veces la cantidad de materia original es cada uno?

La cantidad de materia es lo apretada que está por cuánto sitio ocupa.

El doble de apretamiento en el doble de sitio: dos por dos, cuatro veces más.

El doble de apretamiento en el triple de sitio: dos por tres, seis veces más.

Respuesta: cuatro veces y seis veces

El alcance de la bala de cañón Una bala de plomo disparada a ras del suelo desde la cima de 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 sea cual sea su velocidad.

Así que la distancia que recorre antes de caer crece exactamente con la velocidad.

El doble de velocidad da dos veces dos millas, cuatro millas; diez veces la velocidad da diez veces dos millas, veinte millas.

Respuesta: cuatro millas y veinte millas

Ejercicios

1. Un cuerpo tiene el doble de materia que otro y se mueve el doble de rápido. ¿Cuántas veces la cantidad de movimiento lleva?

Pista: La cantidad de movimiento es masa por velocidad: multiplique los dos factores.

Respuesta: Cuatro veces: el doble de materia duplica el movimiento, y el doble de velocidad lo duplica de nuevo.

2. Un coche de mil kilogramos se mueve a diez metros por segundo; una furgoneta de dos mil kilogramos se mueve a veinte metros por segundo. ¿Cuántas veces la cantidad de movimiento del coche lleva la furgoneta?

Pista: Calcule masa por velocidad para cada uno.

Respuesta: Cuatro veces: el coche lleva diez mil unidades, la furgoneta cuarenta mil.

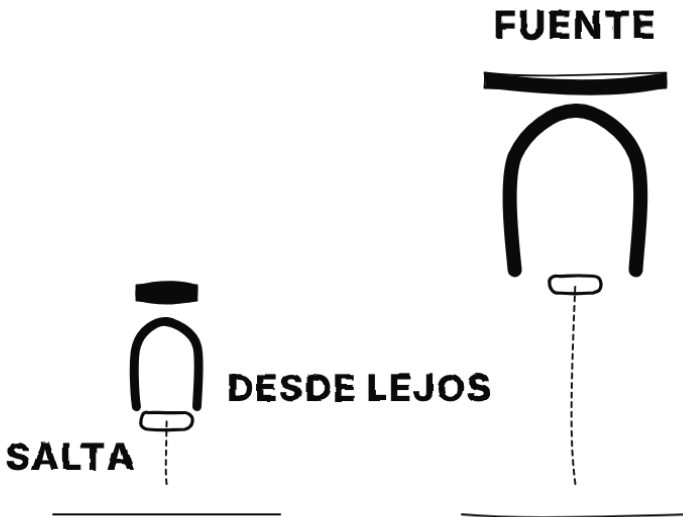
3. Sin aire, la bala que cae a dos millas se dispara tres veces más rápido. ¿Hasta dónde llega?

Pista: Su caída sigue durando lo mismo, así que la distancia crece con la velocidad.

Respuesta: Seis millas: tres veces la velocidad la lleva tres veces las dos millas.

Un tirón, tres medidas y el tiempo mismo

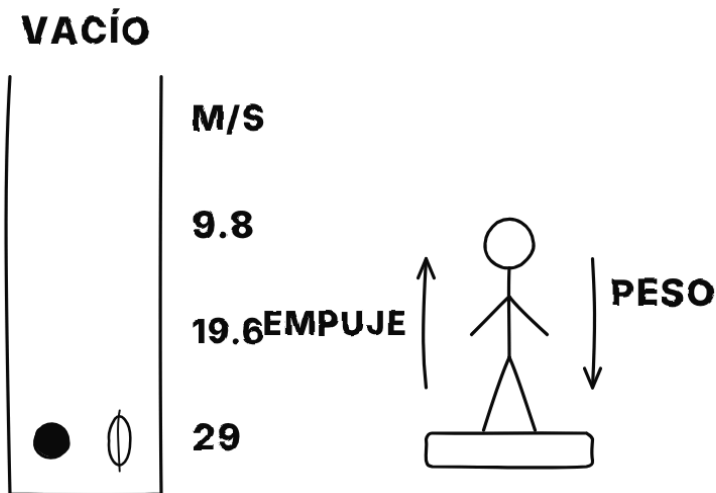
Sostenga un imán pequeño de nevera sobre un clip y bájelo despacio hasta que el clip salte y se pegue. Ahora haga lo mismo con un imán grande y fuerte: el clip salta desde mucho más lejos. Y con cualquiera de los dos imanes, cuanto más cerca está, con más fuerza salta el clip. Así que la fuerza de un tirón tiene más de una respuesta honrada, y Newton mantiene separadas tres de ellas.



Imán pequeño, imán grande

La primera medida mira la fuente. Newton la llama cantidad absoluta de una fuerza centrípeta: lo poderosa que es la causa que envía el tirón desde el centro al espacio de alrededor. Un imán grande y fuerte simplemente tiene más que uno pequeño y débil, sea lo que sea lo que se le acerque. El propio magnetismo de la Tierra, que orienta la brújula de su teléfono, es una fuente enorme, aunque tan repartida que la aguja apenas lo siente.

La segunda medida mira un lugar. La cantidad aceleradora es cuánta velocidad añade allí el tirón a un cuerpo en un tiempo dado, lo que hoy llamamos aceleración. El mismo imán acelera más las cosas de cerca que de lejos; la gravedad es un poco más fuerte en un valle que en una montaña muy alta, y más débil todavía lejos de la Tierra. Sin embargo, a la misma distancia de la Tierra acelera igual a todo cuerpo que cae, pesado o ligero, grande o pequeño, una vez descontado el aire. Un cálculo en palabras: una piedra soltada cerca del suelo gana unos nueve coma ocho metros por segundo de velocidad cada segundo, así que a los tres segundos cae a unos veintinueve metros por segundo, y una pluma en un tubo al que se le ha sacado el aire le sigue exactamente el paso. El acelerómetro de su teléfono, quieto sobre una mesa, muestra ese mismo nueve coma ocho tanto si el teléfono está desnudo como si va dentro de una funda pesada.



Velocidad ganada cada segundo

La tercera medida mira el cuerpo entero. La cantidad motriz es la cantidad de movimiento que el tirón produce en el cuerpo en un tiempo dado, y Newton dice claramente que es el peso del cuerpo, su tendencia total hacia el centro. Se mide siempre por el empuje igual y opuesto que basta justo para impedir que el cuerpo caiga. Eso es exactamente lo que hace la báscula de su baño: 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.

Newton da a cada medida su sitio. El peso pertenece al cuerpo, como la suma de los tirones sobre todas sus partes; la aceleración pertenece al lugar, como un 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: un imán, la Tierra o algo aún desconocido. Insiste en que solo da una idea matemática de estas fuerzas, sin decir qué las causa físicamente.



TIRÓN ½ UN CUARTO

TIRÓN ½ UN SEXTO



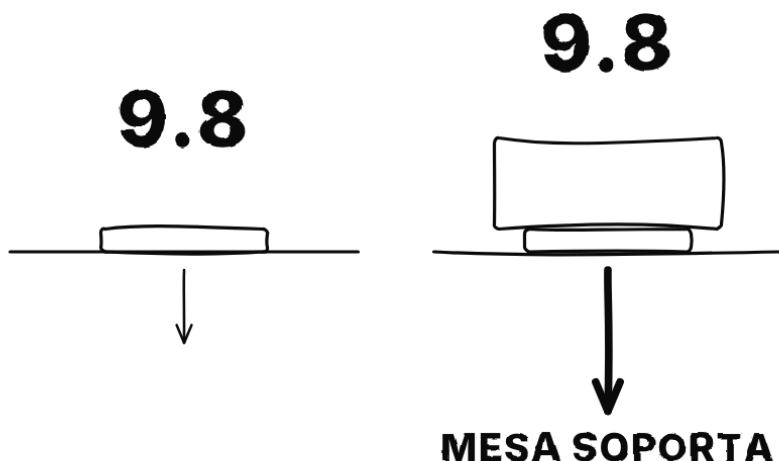
Mitad de tirón, cuerpos menores

Luego une el peso y la aceleración del mismo modo que el movimiento se une a la velocidad. El movimiento es la velocidad multiplicada por la cantidad de materia; del mismo modo, el peso es la aceleración multiplicada por la cantidad de materia, porque el tirón sobre el cuerpo entero es el tirón sobre cada pequeña parte, sumado. Así que cerca de la Tierra, donde la aceleración es la misma para todo, el peso es simplemente proporcional a la cantidad de materia. Su propio cálculo sube alto: en una región donde la aceleración de la gravedad

es solo la mitad, un cuerpo la mitad de grande pesa un cuarto de lo que pesa aquí el cuerpo grande, cuatro veces menos, y un cuerpo un tercio de grande pesa un sexto, seis veces menos. A la altura de los satélites GPS, muy por encima del aire, la aceleración de la gravedad es solo una pequeña fracción de la del suelo, así que un satélite allí pesa mucho menos que en la plataforma de lanzamiento, aunque su cantidad de materia no ha cambiado en absoluto.

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 nueve coma ocho. Ponga un libro pesado sobre el teléfono y mire de nuevo: la lectura no cambia. La aceleración pertenece al lugar, no a lo que hay en él; el libro cambió lo que soporta la mesa, no la aceleración que da la gravedad en ese punto.



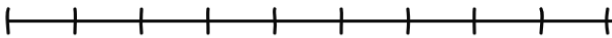
El libro no lo cambia

Newton añade una advertencia sobre sus palabras: usa atracción, impulso y tendencia hacia un centro de forma intercambiable, y nunca pretende decir qué son realmente estas fuerzas, ni que un centro, un simple punto matemático, atraiga de verdad. Luego terminan las definiciones y empieza una larga nota explicativa, el escolio. El tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento, dice, no necesitan definición, porque todo el mundo los conoce; pero la gente solo piensa en ellos a través de las cosas que ve, y esto engendra prejuicios. Para despejarlos separa cada uno en absoluto y relativo, verdadero y aparente, matemático y común.

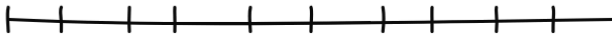
Primero viene el tiempo. El tiempo verdadero y absoluto fluye uniformemente por sí mismo, sin relación con nada externo, y su otro

nombre es duración. El tiempo relativo y común es cualquier medida visible de esa duración hecha por algún movimiento, exacto o no, como una hora, un día, un mes o un año. El reloj de su teléfono es tiempo relativo exactamente en este sentido: una medida hecha contando las vibraciones de un diminuto cristal, contrastada con los relojes de los satélites, y nunca el fluir del tiempo mismo.

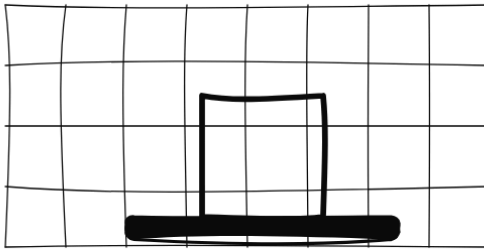
TIEMPO REAL



RELOJES



AIRE



**ESPACIO
REAL**

TIERRA

Tiempo y espacio verdaderos y comunes

Después viene el espacio. El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación con nada externo, sigue siempre igual y nunca se mueve. El espacio relativo es cualquier medida móvil de él que nuestros sentidos fijan por su posición entre los cuerpos, como el espacio de una cueva, del aire o de los cielos, medido 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 se queda quieto a nuestro alrededor está, en sentido absoluto, pasando por una parte del espacio tras otra, cambiando sin cesar.

Para recordar

Un tirón hacia un centro tiene tres medidas: el poder de su fuente, lo rápido que acelera las cosas en un lugar y el peso que da a un cuerpo entero. El peso es la aceleración por la cantidad de materia, igual que el movimiento es la velocidad por la cantidad de materia, así que donde la aceleración de la gravedad se reduce a la mitad, un cuerpo la mitad o un tercio de grande pesa un cuarto o un sexto. A la misma altura la gravedad acelera todo por igual, como muestra el acelerómetro de un teléfono con o sin un libro encima. El tiempo verdadero fluye uniformemente por sí mismo, mientras que las horas, los días y los relojes de nuestros teléfonos son solo movimientos que se usan para medirlo. El espacio verdadero nunca se mueve, mientras que el espacio que medimos desde la Tierra puede estar moviéndose a través de él.

Preguntas

1. Poner un libro pesado sobre un teléfono no cambia la lectura de su acelerómetro. ¿Qué muestra eso?
 - a. La aceleración pertenece al lugar, no a lo que hay en él
 - b. Las cosas pesadas no son atraídas por la gravedad

- c. El teléfono mide el peso del libro
 - d. La gravedad es más débil bajo los objetos pesados
2. ¿Por qué cerca de la Tierra el peso es simplemente proporcional a la cantidad de materia?
- a. Porque allí todos los cuerpos tienen el mismo tamaño
 - b. Porque allí la aceleración es la misma para todo
 - c. Porque el peso no depende en absoluto del tirón
 - d. Porque los cuerpos más pesados aceleran más rápido
3. Según el escolio de Newton, ¿qué es un día o una hora?
- a. El tiempo verdadero mismo
 - b. Una medida visible de la duración hecha por algún movimiento
 - c. Una parte del espacio absoluto
 - d. La duración de un solo movimiento de las estrellas
4. ¿Qué es cierto del espacio absoluto, a diferencia del espacio que medimos desde la Tierra?
- a. Se mueve junto con la Tierra
 - b. Tiene una forma distinta de la del espacio relativo
 - c. Sigue igual y nunca se mueve
 - d. Solo existe cerca de las estrellas

Respuestas

- 1. a)** La aceleración pertenece al lugar, no a lo que hay en él; el libro cambió lo que soporta la mesa, no la aceleración que da la gravedad en ese punto.
- 2. b)** El peso es la aceleración por la cantidad de materia, y cerca de la Tierra la aceleración es la misma para todo, así que el peso sigue solo a la

cantidad de materia.

3. b) El tiempo relativo y común es cualquier medida visible de la duración hecha por algún movimiento, como una hora, un día, un mes o un año.

4. c) El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación con nada externo, sigue siempre igual y nunca se mueve.

Ejemplos resueltos

El peso donde la gravedad se reduce a la mitad En una región donde la aceleración de la gravedad es la mitad de la de aquí, ¿cuánto pesan cuerpos la mitad y un tercio de grandes, comparados con el cuerpo mayor aquí?

El peso es la aceleración multiplicada por la cantidad de materia.

La mitad de la aceleración por la mitad de la materia es un cuarto: cuatro veces menos.

La mitad de la aceleración por un tercio de la materia es un sexto: seis veces menos.

Respuesta: cuatro veces menos y seis veces menos

Ejercicios

1. Una piedra cerca del suelo gana unos nueve coma ocho metros por segundo de velocidad cada segundo. Sin contar el aire, ¿a qué velocidad cae a los dos segundos?

Pista: La aceleración es la velocidad añadida cada segundo; multiplíquela por el número de segundos.

Respuesta: Unos diecinueve coma seis metros por segundo: nueve coma ocho sumado dos veces.

2. Donde la aceleración de la gravedad se reduce a la mitad, un cuerpo es un cuarto de grande que uno de aquí. ¿Cuántas veces menos

pesa?

Pista: Multiplique la parte de la aceleración por la parte de la materia.

Respuesta: Ocho veces menos: un medio por un cuarto es un octavo.

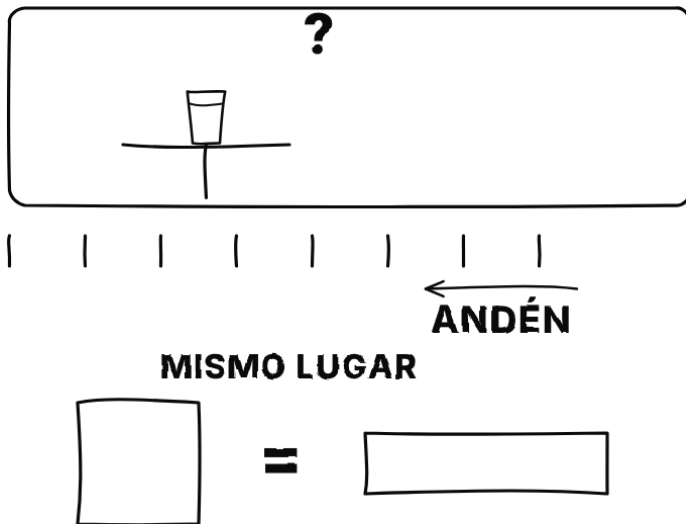
3. Explique con sus propias palabras por qué el reloj de su teléfono muestra tiempo relativo, no tiempo verdadero.

Pista: Pregúntese qué cuenta realmente el reloj.

Respuesta: El reloj cuenta un movimiento, las vibraciones de un diminuto cristal, y usa esa cuenta como medida de lo que duran las cosas. El tiempo verdadero fluye uniformemente por sí mismo; cualquier reloj es solo un movimiento que se usa para medirlo, exacto o no.

Lugares, un marinero, y por qué el reposo no puede verse

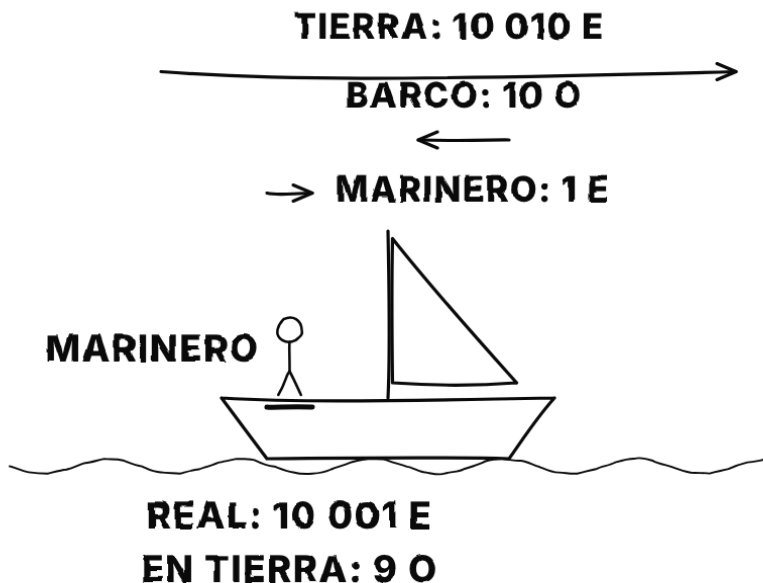
Llene un vaso de agua hasta el borde y póngalo en la mesa de un tren que espera en un andén. Cuando el tren arranca suavemente, el agua apenas tiembla, y desde su asiento el vaso, la mesa y usted parecen perfectamente quietos. Sin embargo, el andén de fuera se va deslizando. ¿Está usted en reposo o en movimiento, y cómo podría alguien saberlo con certeza?



Quieto en un tren en marcha

Newton parte del lugar. El lugar de un cuerpo es la parte del espacio que llena, verdadero o relativo según lo sea el espacio; no su posición, ni su piel exterior. Dos bloques sólidos del mismo volumen llenan siempre lugares iguales, aunque sus formas, y por tanto sus superficies, sean distintas. Y como el movimiento de un todo es el de todas sus partes juntas, el lugar de un todo es el de todas sus partes juntas, dentro del cuerpo.

El movimiento se divide entonces en dos. El movimiento verdadero es el paso de un cuerpo de un lugar del espacio verdadero a otro; el movimiento relativo es su paso de un lugar a otro entre las cosas que lo rodean. En un barco a vela, un pasajero sentado en un camarote se mantiene en la misma parte del barco, y por tanto está en reposo respecto al barco. El reposo verdadero significaría quedarse en la misma parte del espacio inmóvil, por el que es llevado el barco entero. Así que si la Tierra estuviera de verdad quieta, el pasajero sentado se movería de verdad con la velocidad del barco; y si la Tierra también se mueve, el movimiento verdadero del pasajero es el movimiento de la Tierra, el del barco sobre la Tierra y lo que camine por cubierta, todo junto.



El movimiento verdadero del marinero

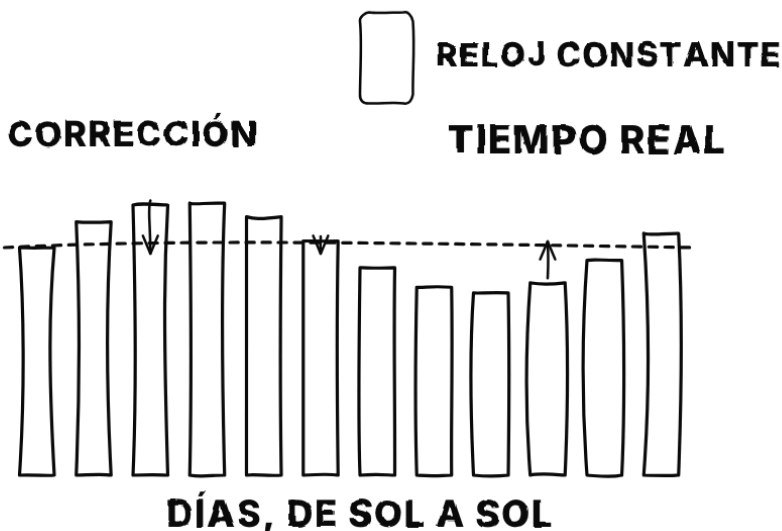
Las cifras de Newton lo hacen concreto. Que el trozo de Tierra bajo el barco se mueva de verdad hacia el este con diez mil diez partes de velocidad, que el barco navegue hacia el oeste con diez partes y que un marinero pasee hacia el este por cubierta con una parte. Las velocidades a lo largo de una línea se suman, cada una medida desde lo que la lleva: diez mil diez, menos diez, más uno, da diez mil una partes hacia el este, el movimiento verdadero del marinero. Respecto a la Tierra, la parte de la Tierra desaparece: las diez del barco hacia el oeste frente a la una del marinero hacia el este dejan nueve partes hacia el oeste. El 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 su teléfono solo informa del segundo tipo de cifra, su velocidad sobre el suelo, nunca del movimiento de la propia Tierra.

Pruébalo

En un tren en marcha, abra una aplicación de velocidad GPS y camine por el pasillo hacia delante y luego hacia atrás.

Caminando hacia delante, la aplicación muestra la velocidad del tren más su paso; caminando hacia atrás, la velocidad del tren menos su paso. Está sumando velocidades a lo largo de una línea exactamente como hace Newton con el marinero, y se detiene en el suelo.

El tiempo necesita el mismo cuidado. Los días naturales, de mediodía a mediodía según el Sol, no duran todos lo mismo, aunque todo el mundo los trata como iguales; los astrónomos lo corrigen para calcular los movimientos de los cielos. Quizá ningún movimiento sea perfectamente uniforme, así que el tiempo nunca puede medirse con exactitud; pero el tiempo verdadero sigue fluyendo sin cambio, y la duración de las cosas es la misma tanto si sus movimientos son rápidos como lentos o no hay ninguno. Los relojes de péndulo y los eclipses de las lunas de Júpiter muestran que la corrección es necesaria. El mediodía de un reloj de sol se desplaza un cuarto de hora en un sentido u otro frente al reloj constante de su teléfono a lo largo del año, y esa es la misma desigualdad de los días.

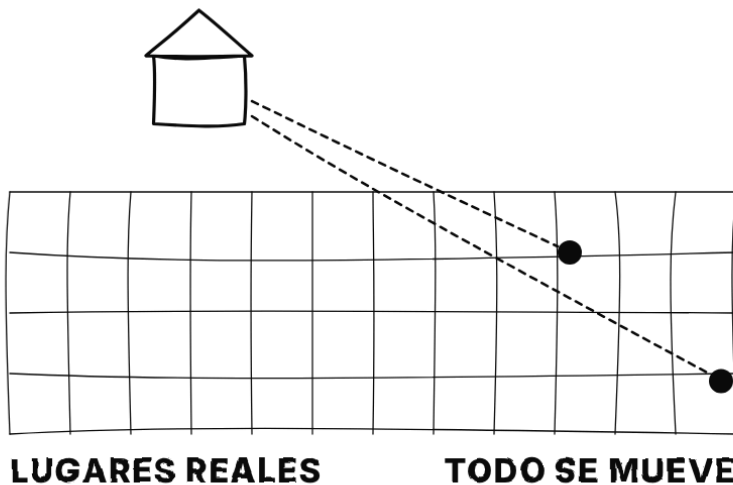


Los días naturales son desiguales

Las partes del tiempo conservan su orden para siempre, y también las partes del espacio. Mover una parte del espacio fuera de su lugar sería moverla fuera de sí misma, ya que los tiempos y los espacios son los lugares tanto de sí mismos como 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 los pasos fuera de ellos son los únicos movimientos verdaderos.

Pero no podemos ver las partes del espacio ni distinguirlas, así que en su lugar usamos medidas que sí podemos ver. Elegimos algún cuerpo que tratamos como inmóvil, definimos cada lugar por su distancia y dirección desde ese cuerpo, y juzgamos cada movimiento respecto a esos lugares. Eso no causa problemas en la vida diaria, pero en la

filosofía natural 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.



Lugares medidos desde un cuerpo

Newton promete entonces distinguir el movimiento verdadero del relativo por tres cosas: sus propiedades, sus causas y sus efectos. La primera propiedad: los cuerpos de verdad en reposo están en reposo unos respecto a otros. En algún lugar entre las lejanas estrellas fijas, o más allá, podría haber un cuerpo de verdad en reposo; pero nada en cómo se sitúan unos respecto a otros los cuerpos que nos rodean puede decir si mantienen la misma posición respecto a ese cuerpo lejano. Así que el reposo verdadero nunca puede hallarse a partir de las posiciones de los cuerpos de nuestra parte del mundo. Como el

agua del vaso en el tren que avanza suave, todo lo que nos rodea puede parecer perfectamente quieto mientras todo se mueve a la vez.

Para recordar

Un lugar es la parte del espacio que llena un cuerpo, y el lugar de un todo es el de sus partes juntas. El movimiento verdadero es el paso por el espacio verdadero; el movimiento relativo se mide respecto a las cosas que rodean, y un pasajero en reposo en un barco a vela se mueve de verdad. El marinero de Newton se mueve de verdad diez mil una partes hacia el este y nueve partes hacia el oeste respecto a la Tierra, porque las velocidades a lo largo de una línea se suman. El tiempo verdadero fluye sin cambio mientras los días y los relojes solo lo miden, y los astrónomos corrigen los días desiguales. Como solo podemos medir desde cuerpos que tratamos como quietos, y puede que ninguno lo esté de verdad, el reposo verdadero no puede hallarse a partir de las posiciones de los cuerpos que nos rodean.

Preguntas

1. Un pasajero está sentado quieto en el camarote de un barco a vela. ¿Respecto a qué está en reposo?
 - a. Respecto al espacio inmóvil
 - b. Respecto al barco, cuya parte conserva
 - c. Respecto a las estrellas
 - d. Respecto al centro de la Tierra

2. ¿Por qué desaparece el movimiento de la Tierra al hallar el movimiento del marinero respecto a la Tierra?
 - a. Porque la Tierra no se mueve
 - b. Porque el movimiento respecto a la Tierra se mide desde la Tierra, así que su propia parte no se cuenta
 - c. Porque la Tierra se mueve demasiado despacio para importar
 - d. Porque solo cuenta el movimiento del barco
3. ¿Por qué usamos medidas que podemos ver en lugar de los lugares verdaderos?
 - a. Porque los lugares verdaderos se mueven siempre
 - b. Porque no podemos ver las partes del espacio ni distinguirlas
 - c. Porque los lugares verdaderos están demasiado lejos
 - d. Porque los lugares medidos son más exactos
4. ¿Por qué el reposo verdadero nunca puede hallarse a partir de las posiciones de los cuerpos que nos rodean?
 - a. Porque nada en el universo está en reposo
 - b. Porque un cuerpo de verdad en reposo podría estar lejos, y las posiciones de nuestros cuerpos entre sí no pueden mostrar si mantienen su posición respecto a él
 - c. Porque las posiciones no pueden medirse
 - d. Porque el reposo es lo mismo que el movimiento

Respuestas

1. b) Un pasajero sentado en un camarote se mantiene en la misma parte del barco, y por tanto está en reposo respecto al barco; el reposo verdadero significaría quedarse en la misma parte del espacio inmóvil.

2. b) Respecto a la Tierra, la parte de la Tierra desaparece, y quedan las diez del barco hacia el oeste frente a la una del marinero hacia el este: nueve hacia el oeste.

3. b) No podemos ver las partes del espacio ni distinguirlas, así que en su lugar usamos medidas que sí podemos ver, tomadas desde algún cuerpo tratado como inmóvil.

4. b) Podría haber un cuerpo de verdad en reposo entre las estrellas fijas o más allá, pero nada en cómo se sitúan unos respecto a otros los cuerpos que nos rodean puede decir si mantienen la misma posición respecto a él.

Ejemplos resueltos

El movimiento verdadero y relativo del marinero La Tierra bajo el barco se mueve hacia el este con diez mil diez partes de velocidad, el barco navega hacia el oeste con diez y un marinero camina hacia el este por cubierta con una. Halle el movimiento verdadero del marinero y su movimiento respecto a la Tierra.

Las velocidades a lo largo de una línea se suman, cada una medida desde lo que la lleva.

Movimiento verdadero: diez mil diez, menos diez, más uno, da diez mil una partes hacia el este.

Respecto a la Tierra, deje fuera la parte de la Tierra: diez hacia el oeste frente a una hacia el este dejan nueve partes hacia el oeste.

Respuesta: diez mil una partes hacia el este de verdad; nueve partes hacia el oeste respecto a la Tierra

Ejercicios

1. Mantenga las diez mil diez partes de la Tierra hacia el este y las diez del barco hacia el oeste, pero deje que el marinero camine hacia el

oeste con una parte. ¿Cuáles son sus movimientos verdadero y relativo?

Pista: Sume las velocidades a lo largo de la línea, contando el este hacia delante y el oeste hacia atrás.

Respuesta: De verdad, diez mil diez menos diez menos uno, nueve mil novecientas noventa y nueve partes hacia el este; respecto a la Tierra, diez hacia el oeste y una más hacia el oeste, once partes hacia el oeste.

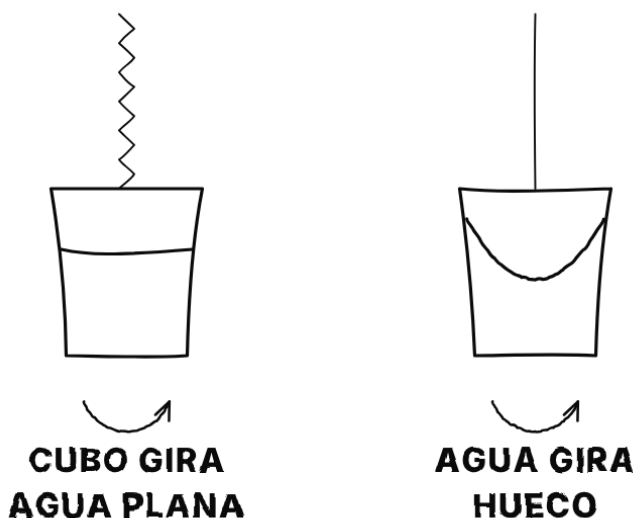
2. Con sus propias palabras, ¿por qué un vaso de agua en un tren que avanza suave no le dice si usted se mueve?

Pista: Piense en con qué compara el vaso.

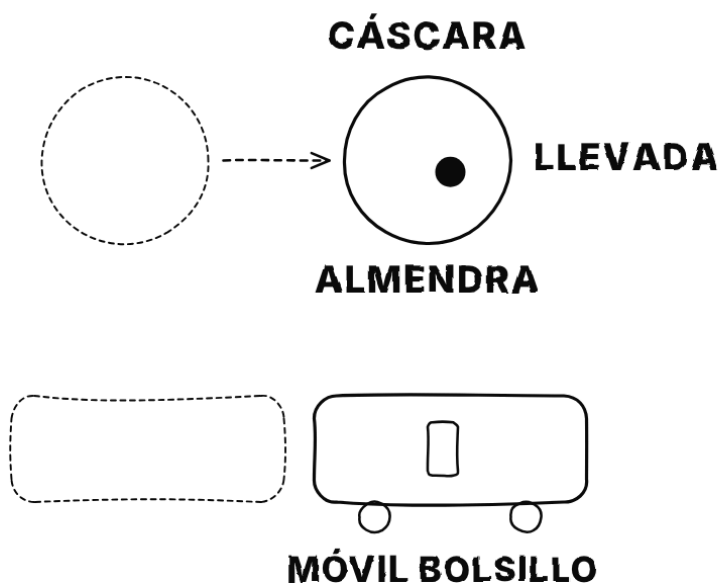
Respuesta: El vaso, la mesa y usted se mueven juntos, así que unos respecto a otros están todos en reposo. Comparar cuerpos que se mueven juntos no puede revelar su movimiento común, igual que las posiciones de los cuerpos que nos rodean no pueden revelar el reposo verdadero.

La almendra, la cáscara y el cubo que gira

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. Al principio el agua de dentro se mantiene plana y en calma mientras el cubo gira a su alrededor. Luego, poco a poco, el agua empieza a girar con el cubo, 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 la clave de todo en esta parte.



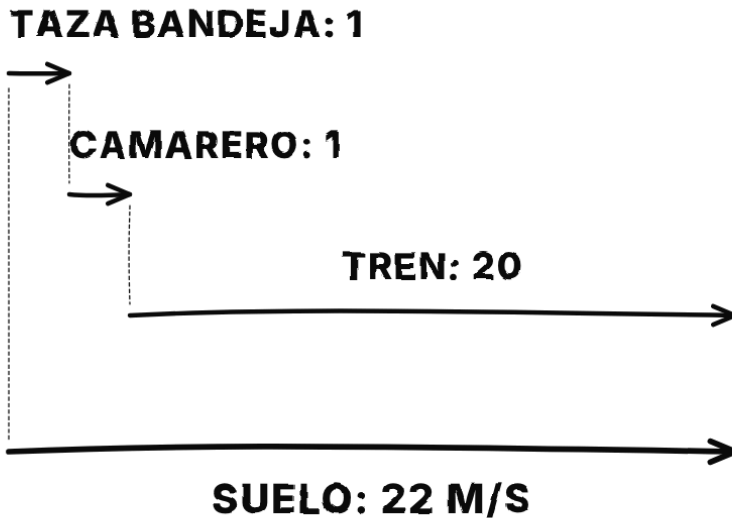
Pero primero, una propiedad del movimiento: las partes que mantienen posiciones fijas dentro de un todo participan del movimiento del todo. Cada parte de un cuerpo que gira se esfuerza hacia fuera, alejándose del eje, y el empuje hacia delante de un cuerpo en movimiento son todos los empujes de sus partes juntos. Así que si las cosas que rodean a un cuerpo se mueven, el cuerpo que reposa entre ellas se mueve con ellas. Por eso el movimiento verdadero no puede hallarse observando un cuerpo respecto a cosas que solo parecen estar en reposo: 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, sin alejarse nunca de la cáscara. Un teléfono quieto en su bolsillo en un autobús en marcha es la almendra: nunca se desplaza dentro del bolsillo, pero cruza la ciudad con el autobús.



Si la cáscara se mueve, la almendra se mueve

Una pariente cercana de esta propiedad: si un lugar se mueve, todo lo que hay en él se mueve con él. Así que cualquier movimiento medido desde un lugar en movimiento es solo parte del movimiento verdadero. El movimiento verdadero se construye paso a paso: el movimiento del cuerpo en su lugar, más el movimiento de ese lugar en su propio lugar, y así sucesivamente, hasta llegar a un lugar inmóvil, como con el marinero cuyo movimiento verdadero sumaba el de la Tierra, el del barco y el suyo. Un cálculo en palabras: una taza se desliza hacia delante sobre una bandeja a un metro por segundo, el camarero camina hacia delante a un metro por segundo por el tren, y el tren corre a veinte metros por segundo, así que la taza se mueve a veintidós metros por segundo sobre el suelo, e incluso ese no es su movimiento verdadero, porque el suelo también es llevado. Así que

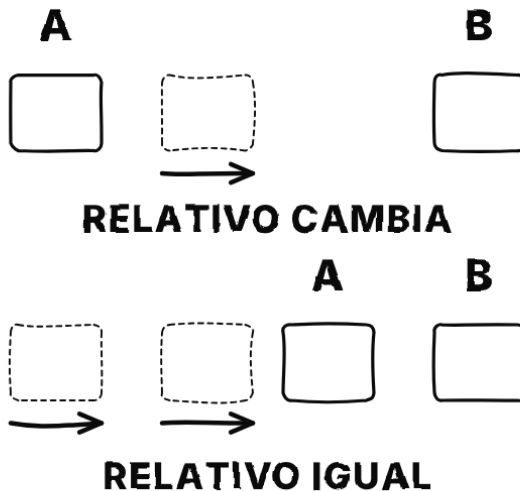
los movimientos enteros y verdaderos solo pueden fijarse respecto a lugares inmóviles, y los únicos lugares inmóviles son los que, de infinito a infinito, conservan las mismas posiciones unos respecto a otros, y juntos forman el espacio inmóvil.



Movimientos sumados

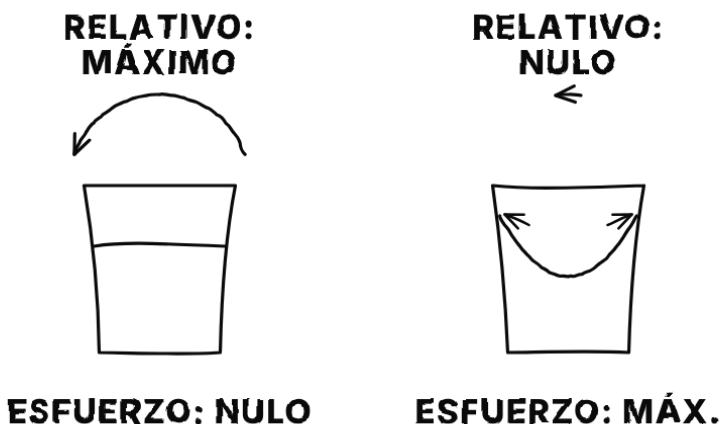
Después, las causas. El movimiento verdadero nunca se crea ni se cambia sino por una fuerza aplicada sobre el propio cuerpo. El movimiento relativo puede cambiar sin ninguna fuerza sobre el cuerpo: empuje en su lugar las cosas con las que se compara, y la relación cambia. Y una fuerza sobre el cuerpo siempre cambia su movimiento verdadero, mientras que su movimiento relativo puede seguir igual, si las cosas con las que se compara se empujan por igual y mantienen sus posiciones. Cuando el autobús frena, usted y el

teléfono de su bolsillo frenan juntos: respecto a usted el teléfono no se mueve, pero su movimiento verdadero ha cambiado. Así que el movimiento relativo puede cambiar mientras el verdadero sigue igual, y seguir igual mientras el verdadero cambia; el movimiento verdadero no consiste en tales relaciones.



Empujar el otro cuerpo

Luego los efectos, y aquí vuelve el cubo. Lo que distingue el movimiento circular verdadero del meramente relativo es el esfuerzo por alejarse del eje. Un giro puramente relativo no produce tal esfuerzo; un giro verdadero produce más o menos, según cuánto movimiento circular haya.



El esfuerzo sigue al giro verdadero

Mire otra vez el cubo. Al principio, el agua se mueve lo más rápido posible respecto al cubo, ya que el cubo gira alrededor de agua quieta; pero la superficie se mantiene plana, sin ningún esfuerzo hacia fuera. Así que el giro verdadero del agua todavía no había empezado. Más tarde, a medida que el agua alcanza al cubo y su movimiento respecto a él disminuye, sube por las paredes, mostrando su esfuerzo hacia fuera, y ese esfuerzo crece hasta que el agua gira junto con el cubo y está en reposo respecto a él, el momento en que sube más alto. El esfuerzo sigue al giro verdadero, no al movimiento respecto al cubo que la rodea, así que el movimiento circular verdadero no puede definirse por tales relaciones.

Pruébalo

Remueva con fuerza una taza de té con una cucharilla y luego saque la cucharilla. Mientras el té gira, su superficie se hunde en el centro y sube en el borde, y las hojas de té o las migas se juntan hacia el centro en el fondo. La superficie hundida es el esfuerzo por alejarse del eje, la señal de un giro verdadero, exactamente como en el cubo de Newton.

Cada cuerpo que gira tiene un solo movimiento circular verdadero, al que corresponde un solo esfuerzo por alejarse de su eje, su efecto propio. Pero tiene innumerables movimientos relativos, uno por cada cuerpo con el que pueda compararse, y estos, como cualquier relación, no tienen ningún efecto real propio. Eso zanja una vieja imagen de los cielos, en la que los planetas son llevados por esferas que giran mientras reposan dentro de ellas: esos planetas se moverían de verdad, porque 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 mismo esfuerzo: el giro verdadero del tambor aprieta la ropa hacia fuera contra la pared, haga lo que haga la habitación que lo rodea.

Para recordar

Las partes participan del movimiento de su todo, como una almendra se mueve con su cáscara o un teléfono con un autobús, así que reposar entre cosas que se mueven no es reposo verdadero. El movimiento verdadero se construye con movimientos anidados hasta el espacio inmóvil, y solo una fuerza sobre el propio cuerpo lo cambia. El movimiento relativo puede cambiar sin ninguna fuerza sobre el cuerpo, o seguir igual a pesar de una, así que el movimiento verdadero no es una relación con otros cuerpos. El efecto que revela el giro verdadero es el esfuerzo por alejarse del eje: en el cubo de Newton el agua sube por las paredes solo cuando gira de verdad, no cuando solo se mueve respecto al cubo. Cada cuerpo que gira tiene un movimiento circular verdadero e innumerables relativos, y solo el verdadero tiene un efecto real.

Preguntas

1. Al principio del experimento del cubo, el agua se mueve lo más rápido posible respecto al cubo, pero su superficie se mantiene plana. ¿Qué muestra eso?
 - a. Que el cubo no gira de verdad
 - b. Que el giro verdadero del agua todavía no ha empezado
 - c. Que el agua no puede girar
 - d. Que la cuerda no está retorcida

2. ¿Cuándo sube más alto el agua por las paredes del cubo?
 - a. Cuando se mueve lo más rápido posible respecto al cubo
 - b. Cuando gira junto con el cubo y está en reposo respecto a él
 - c. Justo después de soltar el cubo
 - d. Cuando el cubo se detiene
3. Una taza se desliza hacia delante a un metro por segundo sobre una bandeja, el camarero camina hacia delante a un metro por segundo por el tren y el tren corre a veinte. ¿A qué velocidad se mueve la taza sobre el suelo?
 - a. Veinte metros por segundo
 - b. Veintiún metros por segundo
 - c. Veintidós metros por segundo
 - d. Dos metros por segundo
4. ¿Por qué no puede decirse que un teléfono que reposa en su bolsillo en un autobús en marcha esté de verdad en reposo?
 - a. Porque vibra
 - b. Porque las partes que mantienen sus posiciones dentro de un todo participan del movimiento del todo
 - c. Porque los bolsillos no son lugares
 - d. Porque es demasiado pequeño para estar en reposo

Respuestas

1. **b)** Un giro puramente relativo no produce ningún esfuerzo por alejarse del eje; la superficie plana muestra que el giro verdadero del agua todavía no había empezado.

- 2. b)** A medida que el agua alcanza al cubo, sube cada vez más por las paredes, hasta que gira junto con el cubo y está en reposo respecto a él, el momento en que sube más alto.
- 3. c)** El movimiento verdadero se construye paso a paso con movimientos anidados: uno más uno más veinte da veintidós metros por segundo sobre el suelo.
- 4. b)** Las partes que mantienen posiciones fijas dentro de un todo participan del movimiento del todo; el teléfono es la almendra y el autobús, la cáscara.

Ejemplos resueltos

Movimientos anidados en un tren Una taza se desliza hacia delante sobre una bandeja a un metro por segundo, el camarero camina hacia delante por el tren a un metro por segundo y el tren corre a veinte metros por segundo sobre el suelo. ¿A qué velocidad se mueve la taza sobre el suelo?

Cada movimiento se mide desde el lugar que lo lleva.

El movimiento de la taza en la bandeja, el del camarero por el tren y el del tren sobre el suelo apuntan todos hacia delante, así que se suman.

Uno más uno más veinte da veintidós.

Respuesta: veintidós metros por segundo sobre el suelo

Ejercicios

1. Ahora el camarero camina hacia atrás por el tren a un metro por segundo mientras la taza sigue deslizándose hacia delante a uno. El tren corre a veinte. ¿A qué velocidad se mueve la taza sobre el suelo?

Pista: Los movimientos hacia delante se suman, los de hacia atrás se restan.

Respuesta: Veinte metros por segundo: uno hacia delante y uno hacia atrás se anulan, y quedan los veinte del tren.

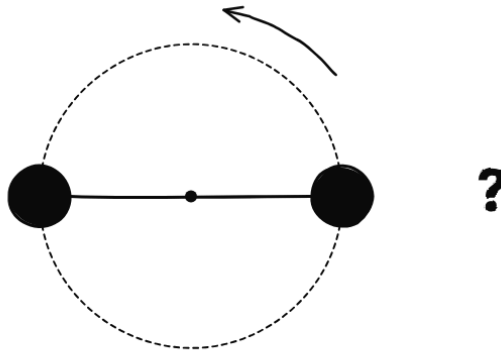
2. Con sus propias palabras, ¿por qué la superficie hundida del té removido muestra un giro verdadero y no uno relativo?

Pista: Pregúntese si el hueco depende de con qué compare el té.

Respuesta: El hueco es el esfuerzo por alejarse del eje, que solo produce un giro verdadero; un giro meramente relativo no tiene tal efecto. Aparece tanto si se mira desde la mesa como desde un tren en marcha, así que no depende de ninguna comparación.

Dos globos en un cielo vacío

Imagine dos bolas pesadas atadas con una cuerda fuerte, girando alrededor de su centro común muy lejos en el espacio vacío, sin nada más que mirar en ninguna parte. ¿Podría alguien saber que están girando? Newton dice que sí, y esta última parte muestra cómo.



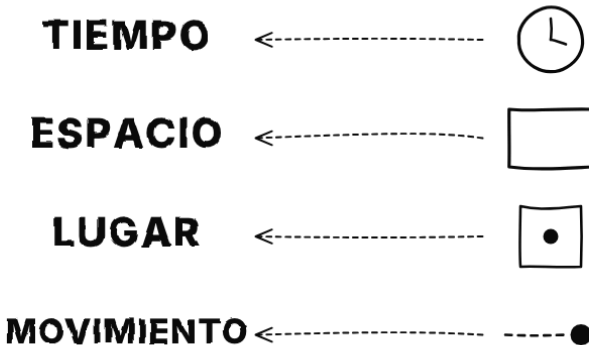
ESPACIO VACÍO

Dos globos en el espacio vacío

Primero, una observación sobre las palabras. Las cantidades relativas, nuestras horas, nuestros lugares medidos, nuestras velocidades respecto al suelo, no son las cantidades verdaderas de las que toman el nombre, sino las medidas visibles que usamos comúnmente en su

lugar, exactas o no. Si las palabras significan lo que el uso cotidiano les hace significar, entonces tiempo, espacio, lugar y movimiento nombran esas medidas, y usarlas para las cantidades verdaderas es inusual y puramente matemático. Newton advierte que confundir las cantidades reales con sus relaciones y medidas cotidianas estropea la pureza de la verdad matemática y filosófica, y que leer las cantidades verdaderas en las Escrituras las fuerza.

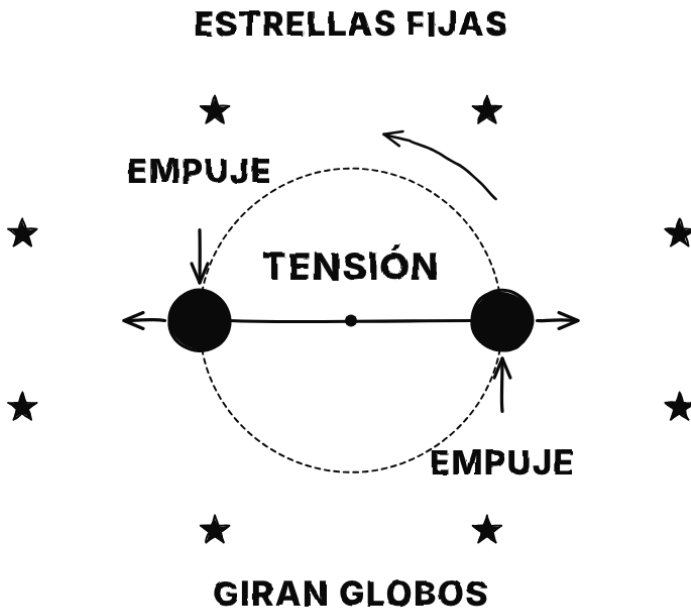
CANTIDADES $\neq$ MEDIDAS



Cantidades y sus medidas

Hallar los movimientos verdaderos de cuerpos concretos es muy difícil, reconoce, 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.

Volvamos a las dos bolas. La cuerda entre ellas se tensa por su esfuerzo hacia fuera, el esfuerzo de todo lo que gira de verdad por alejarse de su eje. Así que por lo tensa que está la cuerda podemos saber cuánto giran las bolas. Ahora aplique empujones iguales en el mismo instante sobre caras correspondientes de las dos bolas: si la cuerda se tensa más, esos empujones aceleraron las bolas; si se afloja, las frenaron. Eso dice qué caras van detrás y cuáles delante, y por tanto en qué sentido giran las bolas, incluso en un inmenso espacio vacío sin nada con que compararlas. El giroscopio de un teléfono hace algo parecido: detecta su propio giro verdadero a partir de fuerzas dentro del chip, y así sabe su pantalla que la ha girado, incluso en una habitación a oscuras.



Tensión, empujones y las estrellas

Ahora coloque a su alrededor algunos cuerpos lejanos que mantengan siempre las mismas posiciones unos respecto a otros, como hacen las estrellas fijas. Viendo moverse las bolas respecto a esos cuerpos, no podríamos saber si giraban las bolas o si los cuerpos lejanos daban vueltas a su alrededor. Pero si la tensión de la cuerda es justo la que requiere el giro de las bolas, podemos concluir que se mueven las bolas y que los cuerpos lejanos están en reposo; y entonces, por el paso de las bolas entre ellos, podemos hallar en qué sentido giran.

Cómo obtener los movimientos verdaderos a partir de sus causas, efectos y diferencias aparentes, y cómo, a la inversa, conocer las causas y los efectos a partir de los movimientos, es lo que explica el resto del libro; para eso, dice Newton, lo escribí. Con la materia, el movimiento y la fuerza definidos, y el movimiento verdadero separado de la apariencia, las leyes del movimiento pueden empezar.

Para recordar

Nuestras horas, lugares y velocidades cotidianos son medidas, no las cantidades verdaderas de las que toman el nombre, y no deben confundirse. Los movimientos verdaderos son difíciles de hallar, porque el espacio inmóvil no puede verse, pero los movimientos aparentes y las fuerzas dan pistas. Dos bolas unidas por una cuerda en el espacio vacío revelan su giro por la tensión de la cuerda, y los empujones adicionales revelan su sentido. Hallar los movimientos verdaderos a partir de causas y efectos, y las causas a partir de los movimientos, es el propósito de todo el libro.

Preguntas

1. ¿Cómo puede detectarse el giro de dos bolas unidas por una cuerda en un cielo vacío?
 - a. Viéndolas pasar ante las estrellas
 - b. Por lo tensa que está la cuerda, de la que tira su esfuerzo hacia fuera
 - c. Por el sonido que hacen
 - d. No puede detectarse
2. Si empujones iguales sobre caras correspondientes de las dos bolas aflojan la cuerda, ¿qué hicieron los empujones?
 - a. Aceleraron las bolas
 - b. Frenaron las bolas
 - c. Impidieron que la cuerda girara
 - d. Nada en absoluto
3. Según Newton, ¿qué son nuestras horas y lugares medidos cotidianos?
 - a. Las cantidades verdaderas mismas
 - b. Medidas visibles que se usan en lugar de las cantidades verdaderas
 - c. Partes del espacio inmóvil
 - d. Fuerzas que actúan sobre los cuerpos

Respuestas

1. b) La cuerda se tensa por el esfuerzo hacia fuera de las bolas, así que por lo tensa que está podemos saber cuánto giran.

2. b) Si la cuerda se tensa más, los empujones aceleraron las bolas; si se afloja, las frenaron.

3. b) Las cantidades relativas no son las cantidades verdaderas de las que toman el nombre, sino las medidas visibles que usamos comúnmente en su lugar.

Ejercicios

1. Con sus propias palabras, ¿cómo podrían los empujones sobre las dos bolas revelar en qué sentido giran?

Pista: Piense en qué caras, al empujarlas, tensan más la cuerda.

Respuesta: Los empujones que aceleran las bolas tensan más la cuerda.

Hallar las caras en las que un empujón tensa la cuerda muestra qué caras van detrás en el giro y cuáles delante, y eso da el sentido del giro.

2. ¿Por qué observar solo las bolas respecto a las estrellas fijas no permitiría saber si se mueven las bolas o las estrellas?

Pista: Piense en lo que muestra un cambio de posición relativa.

Respuesta: Un cambio de posición relativa se ve igual tanto si giran las bolas como si las estrellas dan vueltas a su alrededor. Solo la tensión de la cuerda, que coincide con lo que requiere el giro de las bolas, muestra que se mueven las bolas y que las estrellas reposan.