

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

Definiciones

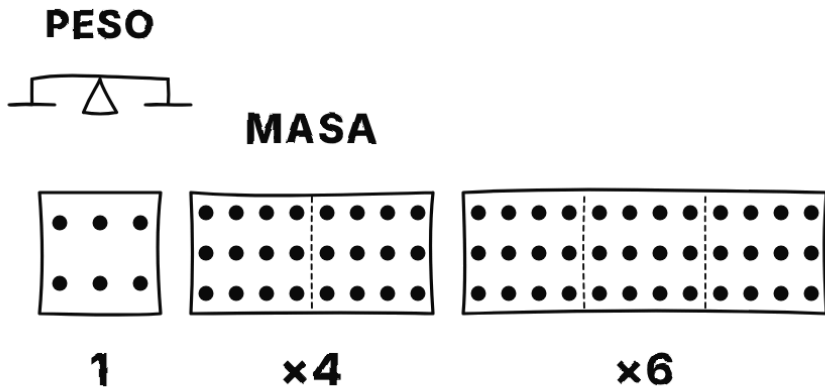
Definiciones VII y VIII, y el escolio sobre el tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento

Tiempo, lugar y movimiento verdaderos y relativos; el recipiente que gira

Medidas y cantidades; los dos globos

Definiciones

Definición I.



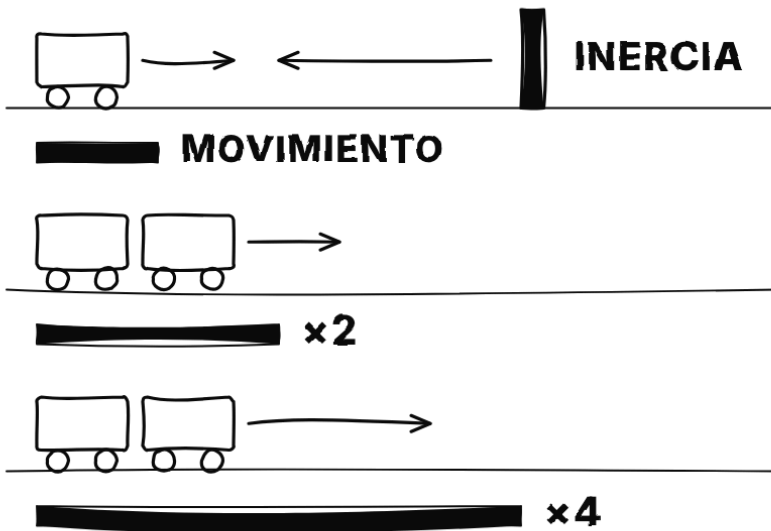
Densidad por volumen

La cantidad de materia es la medida de la misma, que surge de su densidad y de su volumen tomados conjuntamente.

Así, un aire de densidad doble, en un espacio doble, es cuádruple en cantidad; en un espacio triple, séxtuple en cantidad. Lo mismo ha de entenderse de la nieve y del polvo o los polvos finos que se condensan por compresión o por licuefacción, y de todos los cuerpos que, por cualesquiera causas, se condensan de modo distinto. No tengo en

cuenta aquí ningún medio, si es que existe alguno, que penetre libremente los intersticios entre las partes de los cuerpos. Es esta cantidad la que en adelante entiendo en todas partes con el nombre de cuerpo o masa. Y se conoce por el peso de cada cuerpo, pues es proporcional al peso, como he comprobado mediante experimentos con péndulos, realizados con gran exactitud, que se mostrarán más adelante.

Definición II.



Cantidad de movimiento

La cantidad de movimiento es la medida del mismo, que surge de la velocidad y de la cantidad de materia tomadas conjuntamente.

El movimiento del todo es la suma de los movimientos de todas las partes; y por tanto, en un cuerpo de doble cantidad, con igual velocidad, el movimiento es doble; con doble velocidad, es cuádruple.

Definición III.

La vis insita, o fuerza innata de la materia, es un poder de resistir por el cual todo cuerpo, en cuanto de él depende, se esfuerza por perseverar en su estado presente, sea de reposo o de movimiento uniforme hacia delante en línea recta.

Esta fuerza es siempre proporcional al cuerpo cuya fuerza es, y no se diferencia en nada de la inactividad de la masa, salvo en nuestro modo de concebirla. Un cuerpo, por la inactividad de la materia, no sale sin dificultad de su estado de reposo o de movimiento. Por esta razón, esta vis insita puede llamarse, con un nombre muy significativo, vis inertiae, o fuerza de inactividad. Pero un cuerpo ejerce esta fuerza solo cuando otra fuerza, impresa sobre él, se esfuerza por cambiar su condición; y el ejercicio de esta fuerza puede considerarse a la vez como resistencia y como impulso. Es resistencia en cuanto el cuerpo, para mantener su estado presente, se opone a la fuerza impresa; es impulso en cuanto el cuerpo, al no ceder fácilmente a la fuerza impresa de otro, se esfuerza por cambiar el estado de ese otro. La resistencia suele atribuirse a los cuerpos en reposo, y el impulso a los que están en movimiento; pero el movimiento y el reposo, tal como se conciben comúnmente, solo se distinguen de manera relativa; y no siempre están verdaderamente en reposo los cuerpos que comúnmente se toman por tales.

Definición IV.

Una fuerza impresa es una acción ejercida sobre un cuerpo para cambiar su estado, sea de reposo o de movimiento uniforme hacia delante en línea recta.

Esta fuerza consiste solo en la acción, y no permanece en el cuerpo una vez terminada la acción. Pues un cuerpo mantiene cada nuevo estado que adquiere solo por su vis inertiae. Las fuerzas impresas son de distintos orígenes: de la percusión, de la presión, de la fuerza centrípeta.

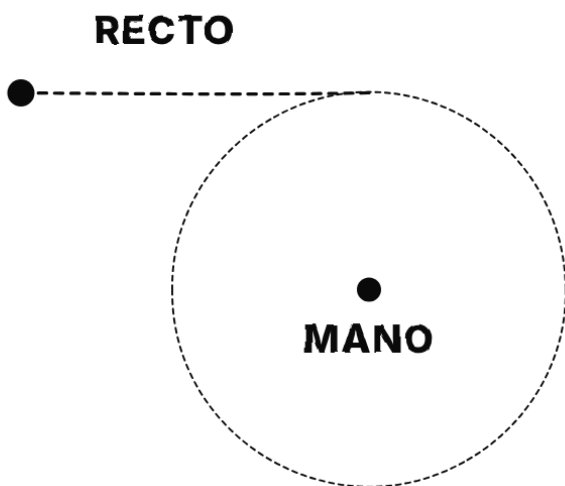
Definición V.

Una fuerza centrípeta es aquella por la cual los cuerpos son atraídos o impelidos, o tienden de cualquier modo, hacia un punto como hacia un centro.

De este tipo es la gravedad, por la cual los cuerpos tienden al centro de la Tierra; el magnetismo, por el cual el hierro tiende al imán; y aquella fuerza, sea cual sea, por la cual los planetas se apartan continuamente de los movimientos rectilíneos que de otro modo seguirían, y se ven obligados a girar en órbitas curvas. Una piedra que se hace girar en una honda se esfuerza por alejarse de la mano que la hace girar, y con ese esfuerzo tensa la honda, con tanta más fuerza cuanto mayor es la velocidad con que gira; y en cuanto se la suelta, sale volando. A la fuerza que se opone a este esfuerzo, y por la cual la honda atrae continuamente la piedra hacia la mano y la retiene en su órbita, puesto que se dirige a la mano como centro de la órbita, la llamo fuerza centrípeta. Y lo mismo ha de entenderse de todos los cuerpos que giran en cualesquiera órbitas. Todos se esfuerzan por alejarse de los centros de sus órbitas; y si no fuera por la oposición de una fuerza contraria que los sujeta y los retiene en sus órbitas, que por eso llamo centrípeta, saldrían despedidos en líneas rectas con un

movimiento uniforme. Un proyectil, si no fuera por la fuerza de la gravedad, no se desviaría hacia la Tierra, sino que se alejaría de ella en línea recta, y con movimiento uniforme, si se suprimiera la resistencia del aire. Es por su gravedad por lo que se aparta continuamente de su curso rectilíneo y se ve obligado a desviarse hacia la Tierra, más o menos, según la fuerza de su gravedad y la velocidad de su movimiento. Cuanto menor sea su gravedad para la cantidad de su materia, o mayor la velocidad con que se lanza, menos se desviará de un curso rectilíneo y más lejos llegará. Si una bala de plomo, lanzada desde la cima de una montaña por la fuerza de la pólvora con una velocidad dada y en dirección paralela al horizonte, recorre una línea curva hasta una distancia de dos millas antes de caer al suelo, la misma bala, si se suprimiera la resistencia del aire, con una velocidad doble o diez veces mayor, volaría dos o diez veces más lejos. Y aumentando la velocidad, podemos aumentar a voluntad la distancia a la que podría lanzarse y disminuir la curvatura de la línea que describiría, hasta que por fin cayera a una distancia de 10, 30 o 90 grados, o incluso diera la vuelta a toda la Tierra antes de caer; o, por último, de modo que nunca cayera a la Tierra, sino que avanzara hacia los espacios celestes y prosiguiera su movimiento in infinitum. Y del mismo modo que un proyectil, por la fuerza de la gravedad, puede hacerse girar en una órbita y dar la vuelta a toda la Tierra, también la Luna, sea por la fuerza de la gravedad, si está dotada de gravedad, sea por cualquier otra fuerza que la impulse hacia la Tierra, puede ser apartada continuamente hacia la Tierra del camino rectilíneo que seguiría por su fuerza innata, y obligada a girar en la órbita que ahora describe; y sin una fuerza así la Luna no podría mantenerse en su órbita. Si esta fuerza fuera demasiado pequeña, no desviaría suficientemente a la Luna de un curso rectilíneo; si fuera demasiado grande, la desviaría en exceso y haría bajar la Luna de su órbita hacia

la Tierra. Es necesario que la fuerza tenga una cantidad justa, y corresponde a los matemáticos hallar la fuerza que sirva exactamente para retener un cuerpo en una órbita dada con una velocidad dada; y, a la inversa, determinar el camino curvo hacia el cual un cuerpo lanzado desde un lugar dado, con una velocidad dada, puede desviarse de su camino rectilíneo natural por medio de una fuerza dada.



La piedra en la honda

La cantidad de cualquier fuerza centrípeta puede considerarse de tres clases: absoluta, aceleradora y motriz.

Definición VI.

La cantidad absoluta de una fuerza centrípeta es la medida de la misma, proporcional a la eficacia de la causa que la propaga desde el centro por los espacios de alrededor.

Preguntas

1. Dos cuerpos ocupan exactamente el mismo espacio, pero uno es el doble de denso que el otro. ¿Cómo se comparan sus cantidades de materia?
 - a. Son iguales, porque el espacio es el mismo
 - b. El más denso tiene el doble de cantidad de materia
 - c. El más denso tiene cuatro veces la cantidad de materia
 - d. No puede decirse sin pesarlos en agua
2. Una vez que una fuerza impresa ha dejado de actuar, ¿por qué conserva el cuerpo su nuevo estado de movimiento?
 - a. Parte de la fuerza queda almacenada dentro del cuerpo
 - b. El medio entre sus partes lo sigue empujando
 - c. Su fuerza centrípeta toma el relevo de la impresa
 - d. Mantiene el nuevo estado solo por su vis inertiae
3. Según el pasaje, ¿qué le pasaría a la Luna si la fuerza que la atrae hacia la Tierra fuera demasiado grande?
 - a. Sería arrastrada fuera de su órbita hacia la Tierra
 - b. Saldría despedida en línea recta
 - c. Mantendría la misma órbita pero se movería más rápido
 - d. Se quedaría en reposo en su lugar actual

4. ¿Por qué un proyectil disparado desde la montaña con mayor velocidad llega más lejos antes de caer?
- a. La gravedad actúa sobre él solo al final de su vuelo
 - b. Su vis inertiae crece con su velocidad y anula la gravedad
 - c. Se desvía menos de su curso rectilíneo, así que llega más lejos
 - d. Su cantidad de materia crece con su velocidad

Respuestas

- 1. b)** La cantidad de materia surge de la densidad y el volumen tomados conjuntamente; con el mismo volumen, duplicar la densidad duplica la cantidad.
- 2. d)** La fuerza impresa consiste solo en la acción y no permanece en el cuerpo; el cuerpo mantiene cada nuevo estado solo por su vis inertiae.
- 3. a)** Si la fuerza fuera demasiado grande, desviaría la Luna en exceso y la haría bajar de su órbita hacia la Tierra; si fuera demasiado pequeña, la Luna no se apartaría lo suficiente de una línea recta.
- 4. c)** Cuanto mayor es la velocidad con que se lanza, menos se desvía de un curso rectilíneo y más lejos llega.

Ejemplos resueltos

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

La cantidad de materia surge de la densidad y el volumen tomados conjuntamente, así que los dos factores se multiplican.

Densidad doble en espacio doble: dos por dos da cuatro veces la cantidad.

Densidad doble en espacio triple: dos por tres da seis veces la cantidad.

Respuesta: cuádruple en un espacio doble, séxtuple en un espacio triple

La bala de plomo desde la montaña Una bala de plomo disparada en horizontal desde una montaña cae a dos millas. Suprimida la resistencia del aire, ¿hasta dónde vuela con el doble y con diez veces la velocidad?

El pasaje dice que, sin la resistencia del aire, la distancia recorrida crece en la misma proporción que la velocidad.

Velocidad doble: dos veces dos millas, cuatro millas.

Diez veces la velocidad: diez veces dos millas, veinte millas.

Respuesta: 4 millas y 20 millas

Ejercicios

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

Pista: La cantidad de movimiento surge de la velocidad y la cantidad de materia tomadas conjuntamente: multiplique los dos factores.

Respuesta: Cuatro veces: el doble de materia duplica el movimiento, y el doble de velocidad lo duplica de nuevo; como dice el pasaje, cuádruple.

2. Un cuerpo es tres veces más denso que otro y ocupa el doble de espacio. ¿Cómo se comparan sus cantidades de materia?

Pista: La densidad y el volumen se toman conjuntamente, así que multiplíquelos.

Respuesta: Seis veces más: tres veces la densidad por el doble del volumen.

3. La misma bala de plomo que cae a dos millas se dispara, suprimido el aire, con tres veces la velocidad. ¿Hasta dónde vuela?

Pista: Sin el aire, la distancia crece en proporción a la velocidad.

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

Definiciones VII y VIII, y el escolio sobre el tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento

Así, la fuerza magnética es mayor en un imán y menor en otro, según su tamaño y la intensidad de su fuerza.

Definición VII.

La cantidad aceleradora de una fuerza centrípeta es la medida de la misma, proporcional a la velocidad que genera en un tiempo dado.

Así, la fuerza de un mismo imán es mayor a menor distancia y menor a mayor distancia; también la fuerza de la gravedad es mayor en los valles, menor en las cimas de montañas muy altas, y menor todavía, como se mostrará más adelante, a mayores distancias del cuerpo de la Tierra. Pero a distancias iguales es la misma en todas partes, porque, suprimida o descontada la resistencia del aire, acelera por igual a todos los cuerpos que caen, sean pesados o ligeros, grandes o pequeños.

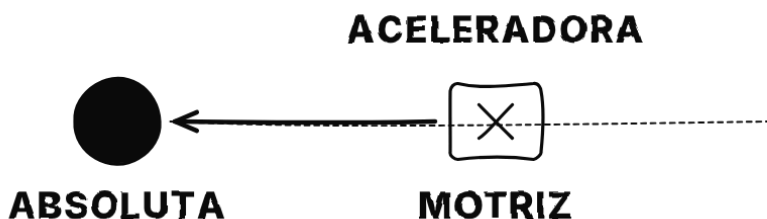
Definición VIII.

La cantidad motriz de una fuerza centrípeta es la medida de la misma, proporcional al movimiento que genera en un tiempo dado.

Así, el peso es mayor en un cuerpo mayor y menor en un cuerpo menor; y, en el mismo cuerpo, es mayor cerca de la Tierra y menor a distancias más remotas. Este tipo de cantidad es la centripetencia, o propensión del cuerpo entero hacia el centro, o, por así decir, su peso;

y se conoce siempre por la cantidad de una fuerza igual y contraria que baste justo para impedir el descenso del cuerpo.

Estas cantidades de fuerzas podemos llamarlas, para abreviar, fuerzas motrices, aceleradoras y absolutas; y, para distinguirlas, considerarlas en relación con los cuerpos que tienden al centro, con los lugares de esos cuerpos y con el centro de fuerza hacia el que tienden. Es decir, refiero la fuerza motriz al cuerpo, como un esfuerzo y una propensión del todo hacia un centro, que surge de las propensiones de las distintas partes tomadas juntas; la fuerza aceleradora, al lugar del cuerpo, como un cierto poder o energía difundido desde el centro a todos los lugares de alrededor para mover los cuerpos que hay en ellos; y la fuerza absoluta, al centro, como dotado de alguna causa sin la cual esas fuerzas motrices no se propagarían por los espacios de alrededor. Esa causa puede ser algún cuerpo central, como lo es el imán en el centro de la fuerza magnética, o la Tierra en el centro de la fuerza de gravitación, o cualquier otra cosa que todavía no se manifiesta. Pues aquí solo me propongo dar una noción matemática de esas fuerzas, sin considerar sus causas y sedes físicas.



$$\boxed{\text{MOTRIZ}} = \boxed{\text{ACEL.}} \times \boxed{\text{MATERIA}}$$

ACEL. $\frac{1}{2}$: CUERPO $\frac{1}{2}$ → PESO $\frac{1}{4}$

ACEL. $\frac{1}{2}$: CUERPO $\frac{1}{3}$ → PESO $\frac{1}{6}$

Tres medidas de una fuerza

Por tanto, la fuerza aceleradora guardará con la motriz la misma relación que la celeridad con el movimiento. Pues la cantidad de movimiento surge de la celeridad multiplicada por la cantidad de materia; y la fuerza motriz surge de la fuerza aceleradora multiplicada por la misma cantidad de materia. Pues la suma de las acciones de la fuerza aceleradora sobre las distintas partículas del cuerpo es la fuerza motriz del todo. De ahí que, cerca de la superficie de la Tierra, donde la gravedad aceleradora, o fuerza que produce la gravedad, es la misma en todos los cuerpos, la gravedad motriz, o el peso, sea como el cuerpo. Pero si subiéramos a regiones más altas, donde la gravedad aceleradora es menor, el peso disminuiría en la misma medida, y sería siempre como el producto del cuerpo por la gravedad aceleradora. Así, en aquellas regiones donde la gravedad aceleradora se reduce a la

mitad, el peso de un cuerpo dos o tres veces menor será cuatro o seis veces menor.

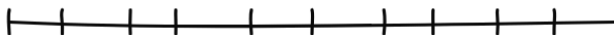
Del mismo modo llamo a las atracciones y a los impulsos, en el mismo sentido, aceleradores y motrices; y uso las palabras atracción, impulso o propensión de cualquier clase hacia un centro de forma indistinta, una por otra, considerando esas fuerzas no física sino matemáticamente. Por tanto, el lector no debe imaginar que con esas palabras pretendo en ningún lugar definir la clase o la manera de alguna acción, sus causas o su razón física, ni que atribuyo fuerzas, en un sentido verdadero y físico, a ciertos centros, que son solo puntos matemáticos, cuando en algún momento hablo de centros que atraen o que están dotados de poderes atractivos.

Escolio.

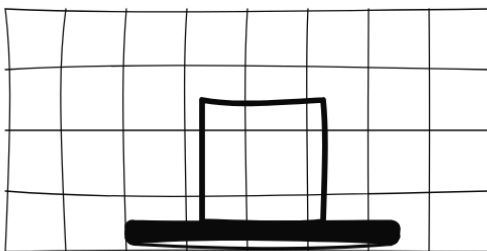
TIEMPO ABSOLUTO



TIEMPO COMÚN



AIRE



**ESPACIO
ABSOLUTO**

TIERRA

Tiempo y espacio verdaderos y comunes

Hasta aquí he expuesto las definiciones de las palabras menos conocidas y he explicado el sentido en que quiero que se entiendan en el discurso que sigue. No defino el tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento, por ser bien conocidos de todos. Solo debo observar que el común de la gente no concibe esas cantidades bajo otras nociones que las que surgen de su relación con los objetos sensibles. Y de ahí nacen ciertos prejuicios, para eliminar los cuales convendrá distinguirlas en absolutas y relativas, verdaderas y aparentes, matemáticas y comunes.

Primero: el tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin relación con nada externo, y con otro nombre se llama duración. El tiempo relativo,

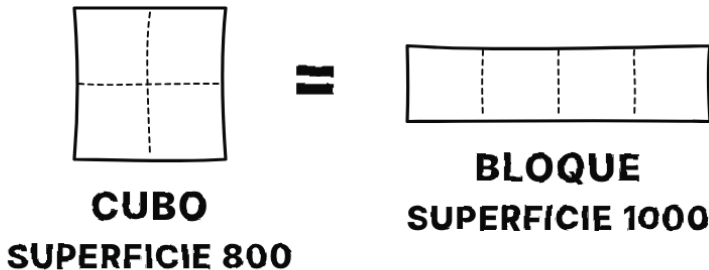
aparente y común es alguna medida sensible y externa de la duración por medio del movimiento, sea exacta o desigual, que se usa comúnmente en lugar del tiempo verdadero, como una hora, un día, un mes, un año.

Segundo: el espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin relación con nada externo, permanece siempre semejante e inmóvil. El espacio relativo es alguna dimensión o medida móvil de los espacios absolutos, que nuestros sentidos determinan por su posición respecto a los cuerpos, y que comúnmente se toma por espacio inmóvil; así es la dimensión de un espacio subterráneo, aéreo o celeste, determinada por su posición respecto a la Tierra. El espacio absoluto y el relativo son iguales en figura y magnitud, pero no siempre siguen siendo numéricamente el mismo. Pues si la Tierra, por ejemplo, se mueve, un espacio de nuestro aire que relativamente, respecto a la Tierra, sigue siendo siempre el mismo, será en un momento una parte del espacio absoluto por el que pasa el aire, y en otro momento otra parte del mismo; y así, entendido de manera absoluta, estará cambiando continuamente.

Tercero: el lugar es una parte del espacio que ocupa un cuerpo, y es, según el espacio, absoluto o relativo. Digo una parte del espacio; no la situación, ni la superficie exterior del cuerpo. Pues los lugares de sólidos iguales son siempre iguales, pero sus superficies, por sus figuras distintas, a menudo son desiguales. Las posiciones propiamente no tienen cantidad, ni son tanto los lugares mismos como propiedades de los lugares. El movimiento del todo es lo mismo que la suma de los movimientos de las partes; es decir, el traslado del todo fuera de su lugar es lo mismo que la suma de los traslados de las partes fuera de sus lugares. Y por tanto el lugar del todo es lo mismo

que la suma de los lugares de las partes, y por esa razón es interno, y está en todo el cuerpo.

MISMO LUGAR

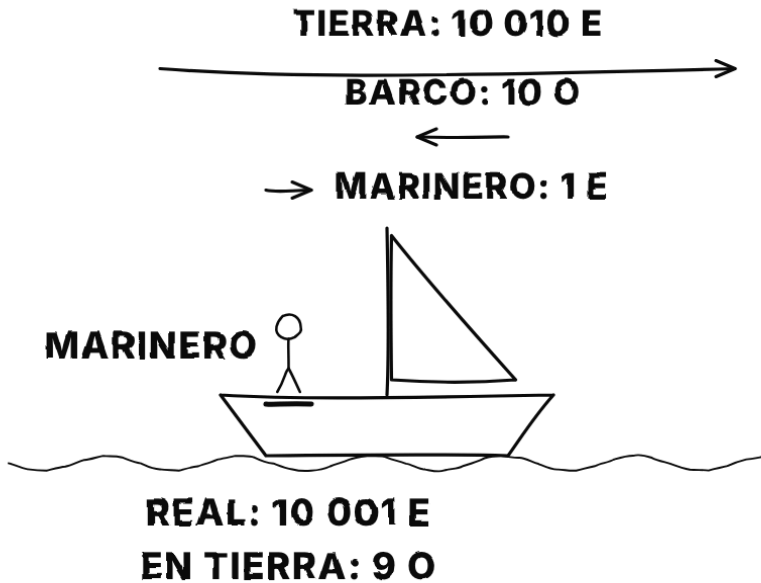


4 PARTES CADA

El lugar es una parte del espacio

Cuarto: el movimiento absoluto es el traslado de un cuerpo de un lugar absoluto a otro, y el movimiento relativo, el traslado de un lugar relativo a otro. Así, en un barco a vela, el lugar relativo de un cuerpo es aquella parte del barco que el cuerpo ocupa, o aquella parte de su cavidad que el cuerpo llena, y que por tanto se mueve junto con el barco; y el reposo relativo es la permanencia del cuerpo en la misma parte del barco, o de su cavidad. Pero el reposo real y absoluto es la permanencia del cuerpo en la misma parte de aquel espacio inmóvil en el que se mueven el barco mismo, su cavidad y todo lo que contiene. Por tanto, si la Tierra está realmente en reposo, el cuerpo

que reposa relativamente en el barco se moverá real y absolutamente con la misma velocidad que tiene el barco sobre la Tierra. Pero si la Tierra también se mueve, el movimiento verdadero y absoluto del cuerpo surgirá en parte del movimiento verdadero de la Tierra en el espacio inmóvil y en parte del movimiento relativo del barco sobre la Tierra. Y si el cuerpo se mueve también relativamente en el barco, su movimiento verdadero surgirá en parte del movimiento verdadero de la Tierra en el espacio inmóvil y en parte de los movimientos relativos tanto del barco sobre la Tierra como del cuerpo en el barco; y de estos movimientos relativos surgirá el movimiento relativo del cuerpo sobre la Tierra. Como si aquella parte de la Tierra donde está el barco se moviera de verdad hacia el este con una velocidad de 10 010 partes, mientras el barco, con viento fresco y las velas llenas, es llevado hacia el oeste con una velocidad expresada por 10 de esas partes, y un marinero camina por el barco hacia el este con 1 parte de dicha velocidad. Entonces el marinero se moverá de verdad, en el espacio inmóvil, hacia el este con una velocidad de 10 001 partes, y relativamente sobre la Tierra hacia el oeste con una velocidad de 9 de esas partes.



El movimiento verdadero del marinero

Preguntas

1. Cerca de la superficie de la Tierra la gravedad aceleradora es la misma en todos los cuerpos. ¿Qué se sigue para sus pesos?
 - a. Todos los cuerpos tienen el mismo peso
 - b. El peso de cada cuerpo es como el cuerpo, su cantidad de materia
 - c. El peso depende solo de la velocidad del cuerpo
 - d. Los cuerpos más pesados se aceleran más

2. ¿A cuál de estas cosas refiere Newton la fuerza aceleradora?
 - a. Al cuerpo, como la propensión del todo
 - b. Al centro, como la causa
 - c. Al lugar del cuerpo, como un poder repartido desde el centro
 - d. Al observador que la mide
3. En el escolio, ¿cómo se describe mejor el tiempo relativo?
 - a. Un tiempo que fluye uniformemente por sí mismo
 - b. Una medida sensible de la duración por medio del movimiento, como una hora o un día
 - c. La duración tal como sería sin ningún movimiento en ninguna parte
 - d. El tiempo medido solo por las estrellas fijas
4. Un cuerpo reposa en una parte de un barco a vela. Si la Tierra está realmente en reposo, ¿cuál es su movimiento absoluto?
 - a. Está absolutamente en reposo, como la parte del barco que llena
 - b. Se mueve con la velocidad que tiene el barco sobre la Tierra
 - c. Se mueve con la velocidad del viento
 - d. Su movimiento no puede determinarse en absoluto

Respuestas

1. **b)** La fuerza motriz surge de la fuerza aceleradora multiplicada por la cantidad de materia; donde la gravedad aceleradora es la misma, el peso es como el cuerpo.
2. **c)** Refiere la fuerza aceleradora al lugar del cuerpo, como un poder o energía difundido desde el centro a todos los lugares de alrededor.

3. b) El tiempo relativo, aparente y común es alguna medida sensible y externa de la duración por medio del movimiento, como una hora, un día, un mes, un año.

4. b) Si la Tierra está realmente en reposo, el cuerpo que reposa relativamente en el barco se moverá real y absolutamente con la misma velocidad que tiene el barco sobre la Tierra.

Ejemplos resueltos

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

El peso es siempre como el producto del cuerpo por la gravedad aceleradora.

La mitad de la gravedad por la mitad del cuerpo: un cuarto, así que cuatro veces menos.

La mitad de la gravedad por un tercio del cuerpo: un sexto, así que seis veces menos.

Respuesta: cuatro veces menos y seis veces menos

El marinero sobre la Tierra en movimiento La parte de la Tierra donde está 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 el movimiento verdadero del marinero y su movimiento respecto a la Tierra.

Respecto a la Tierra, el barco va al oeste 10 y el marinero al este 1, así que el marinero va al oeste $10 - 1 = 9$ partes.

En el espacio inmóvil, las 10 010 partes de la Tierra hacia el este llevan al marinero, menos sus 9 hacia el oeste respecto a la Tierra.

$10\ 010 - 9 = 10\ 001$ partes hacia el este.

Respuesta: de verdad 10 001 partes hacia el este; relativamente 9 partes hacia el oeste sobre la Tierra

Ejercicios

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

Pista: El peso es como el cuerpo multiplicado por la gravedad aceleradora.

Respuesta: Ocho veces menos: la mitad de la gravedad por un cuarto del cuerpo es un octavo.

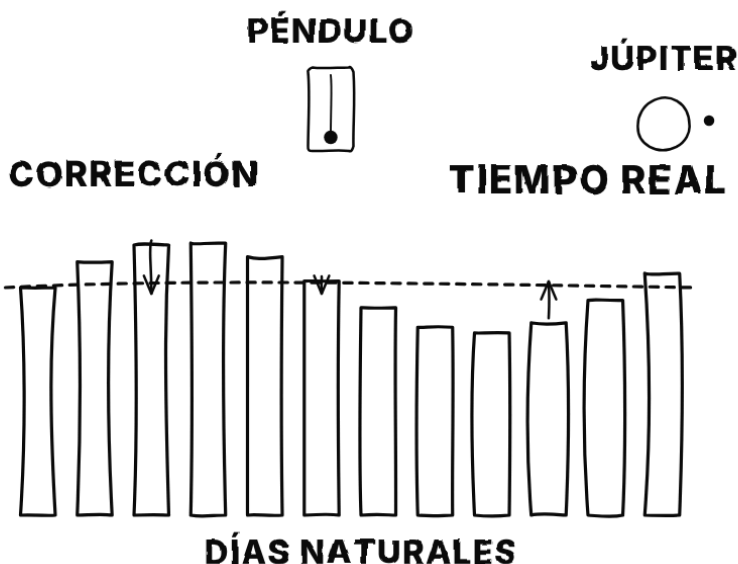
2. Mantenga la Tierra moviéndose hacia el este a 10 010 partes y el barco navegando hacia el oeste a 10 partes, pero deje que el marinero camine hacia el oeste con 1 parte. ¿Cuáles son sus movimientos verdadero y relativo?

Pista: Halle primero su movimiento respecto a la Tierra: el del barco y el suyo se suman cuando apuntan en el mismo sentido.

Respuesta: Respecto a la Tierra va hacia el oeste 11 partes; de verdad va hacia el este $10\,010 - 11 = 9\,999$ partes.

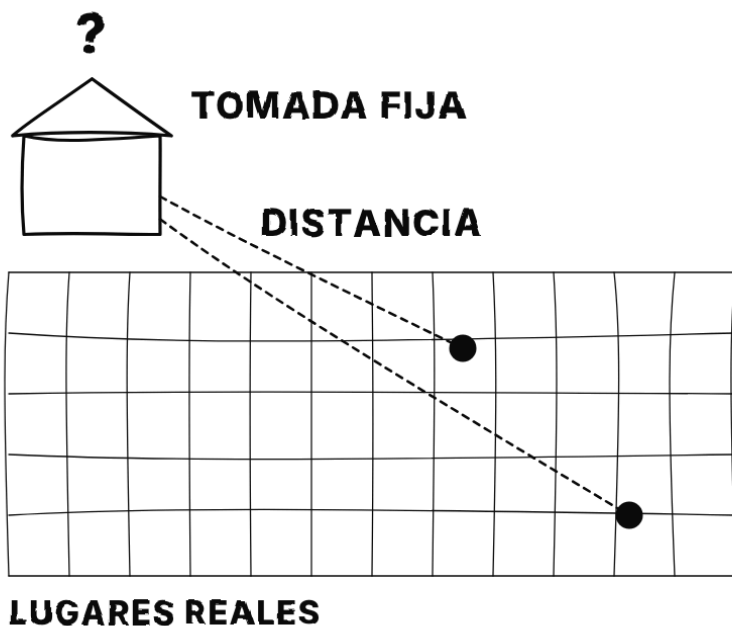
Tiempo, lugar y movimiento verdaderos y relativos; el recipiente que gira

El tiempo absoluto, en astronomía, se distingue del relativo por la ecuación, o corrección, del tiempo común. Pues los días naturales son en verdad desiguales, aunque comúnmente se consideran iguales y se usan como medida del tiempo; los astrónomos corrigen esta desigualdad para deducir con más exactitud los movimientos celestes. Puede ser que no exista ningún movimiento uniforme con el que medir el tiempo con exactitud. Todos los movimientos pueden acelerarse y retardarse, pero el curso verdadero, o uniforme, del tiempo absoluto no está sujeto a ningún cambio. La duración o perseverancia de la existencia de las cosas sigue siendo la misma, sean los movimientos rápidos o lentos, o no haya ninguno; y por tanto debe distinguirse de lo que son solo medidas sensibles de ella, a partir de las cuales la obtenemos mediante la ecuación astronómica. La necesidad de esta ecuación, para determinar los tiempos de un fenómeno, se muestra tanto por los experimentos con el reloj de péndulo como por los eclipses de los satélites de Júpiter.



Los días naturales son desiguales

Así como el orden de las partes del tiempo es inmutable, también lo es el orden de las partes del espacio. Supongamos que esas partes se movieran de sus lugares; se moverían, si se permite la expresión, fuera de sí mismas. Pues los tiempos y los espacios son, por así decir, los lugares tanto de sí mismos como de todas las demás cosas. Todas las cosas están situadas en el tiempo en cuanto al orden de sucesión, y en el espacio en cuanto al orden de situación. Es por su esencia o naturaleza por lo que son lugares; y que los lugares primarios de las cosas fueran móviles es absurdo. Estos son, por tanto, los lugares absolutos, y los traslados fuera de esos lugares son los únicos movimientos absolutos.



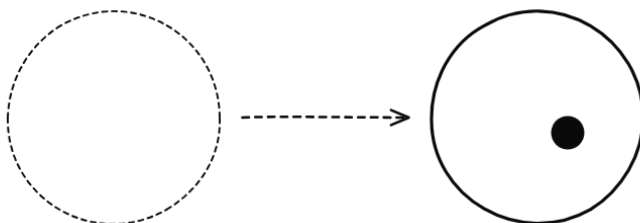
Lugares medidos desde un cuerpo

Pero como las partes del espacio no pueden verse ni distinguirse unas de otras por nuestros sentidos, en su lugar usamos medidas sensibles de ellas. Pues a partir de las posiciones y distancias de las cosas respecto a algún cuerpo considerado inmóvil, definimos todos los lugares; y luego, respecto a esos lugares, estimamos todos los movimientos, considerando los cuerpos como trasladados de unos de esos lugares a otros. Y así, en lugar de lugares y movimientos absolutos, usamos los relativos, y eso sin ningún inconveniente en los asuntos corrientes; pero en las investigaciones filosóficas debemos abstraernos de nuestros sentidos y considerar las cosas mismas, distintas de lo que son solo medidas sensibles de ellas. Pues puede ser que no haya ningún cuerpo realmente en reposo al que puedan referirse los lugares y movimientos de los demás.

Pero podemos distinguir el reposo y el movimiento, absolutos y relativos, unos de otros por sus propiedades, causas y efectos. Es propiedad del reposo que los cuerpos realmente en reposo reposan unos respecto a otros. Y por tanto, como es posible que en las regiones remotas de las estrellas fijas, o quizá mucho más allá, haya algún cuerpo absolutamente en reposo, pero imposible saber, por la posición de los cuerpos entre sí en nuestras regiones, si alguno de ellos mantiene la misma posición respecto a ese cuerpo remoto, se sigue que el reposo absoluto no puede determinarse por la posición de los cuerpos en nuestras regiones.

Es propiedad del movimiento que las partes que conservan posiciones dadas respecto a sus todos participan de los movimientos de esos todos. Pues todas las partes de los cuerpos que giran se esfuerzan por alejarse del eje del movimiento, y el ímpetu de los cuerpos que avanzan surge del ímpetu conjunto de todas las partes. Por tanto, si los cuerpos que los rodean se mueven, los que están relativamente en reposo dentro de ellos participarán de su movimiento. Por esta razón, el movimiento verdadero y absoluto de un cuerpo no puede determinarse por su traslado respecto a los que solo parecen estar en reposo; pues los cuerpos externos no solo deben parecer en reposo, sino estarlo de verdad. Pues de otro modo todos los cuerpos contenidos, además de su traslado respecto a los que los rodean, participan también de los movimientos verdaderos de estos; y aunque ese traslado no se produjera, no estarían realmente en reposo, sino que solo lo parecerían. Pues los cuerpos que rodean guardan con los rodeados la misma relación que la parte exterior de un todo con la interior, o que la cáscara con la almendra; pero si la cáscara se mueve, la almendra también se moverá, como parte del todo, sin alejarse de la cáscara.

**LUGAR SE MUEVE
CUERPO SE MUEVE**



LLEVADA



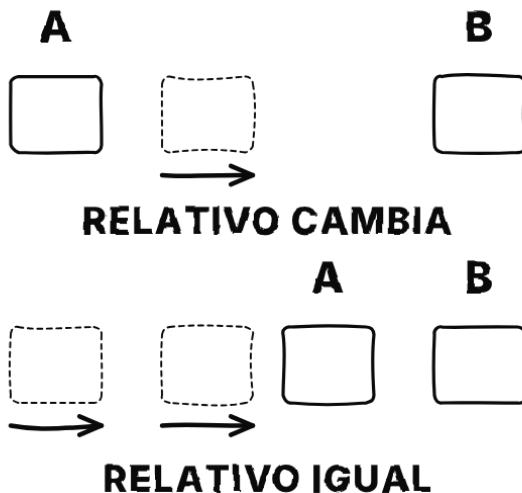
ESPACIO INMÓVIL

Si la cáscara se mueve, la almendra se mueve

Una propiedad muy cercana a la anterior es esta: que si un lugar se mueve, lo que está situado en él se mueve con él; y por tanto un cuerpo que se mueve desde un lugar en movimiento participa también del movimiento de su lugar. Por esta razón, todos los movimientos desde lugares en movimiento no son sino partes de movimientos enteros y absolutos; y todo movimiento entero se compone del movimiento del cuerpo fuera de su primer lugar, y del movimiento de este lugar fuera de su lugar, y así sucesivamente, hasta llegar a algún lugar inmóvil, como en el ejemplo del marinero mencionado antes. Por tanto, los movimientos enteros y absolutos no pueden determinarse de otro modo que por lugares inmóviles; y por eso antes referí esos movimientos absolutos a lugares inmóviles, y los relativos a lugares móviles. Ahora bien, no hay más lugares inmóviles que

aquellos que, de infinito a infinito, conservan todos la misma posición dada unos respecto a otros; y por esta razón deben permanecer siempre inmóviles, y constituyen así el espacio inmóvil.

Las causas por las que se distinguen el movimiento verdadero y el relativo son las fuerzas impresas sobre los cuerpos para generar movimiento. El movimiento verdadero no se genera ni se altera sino por alguna fuerza impresa sobre el cuerpo movido; pero el movimiento relativo puede generarse o alterarse sin ninguna fuerza impresa sobre el cuerpo. Pues basta con imprimir alguna fuerza sobre otros cuerpos con los que se compara el primero, para que, al ceder estos, cambie la relación en que consistía el reposo o el movimiento relativo de ese otro cuerpo. A su vez, el movimiento verdadero sufre siempre algún cambio por cualquier fuerza impresa sobre el cuerpo en movimiento; pero el movimiento relativo no sufre necesariamente ningún cambio por esas fuerzas. Pues si las mismas fuerzas se imprimen también sobre los otros cuerpos con los que se hace la comparación, de modo que se conserve la posición relativa, entonces se conservará la condición en que consiste el movimiento relativo. Y por tanto cualquier movimiento relativo puede cambiar cuando el verdadero permanece inalterado, y el relativo puede conservarse cuando el verdadero sufre algún cambio. Por estas razones, el movimiento verdadero no consiste en absoluto en tales relaciones.

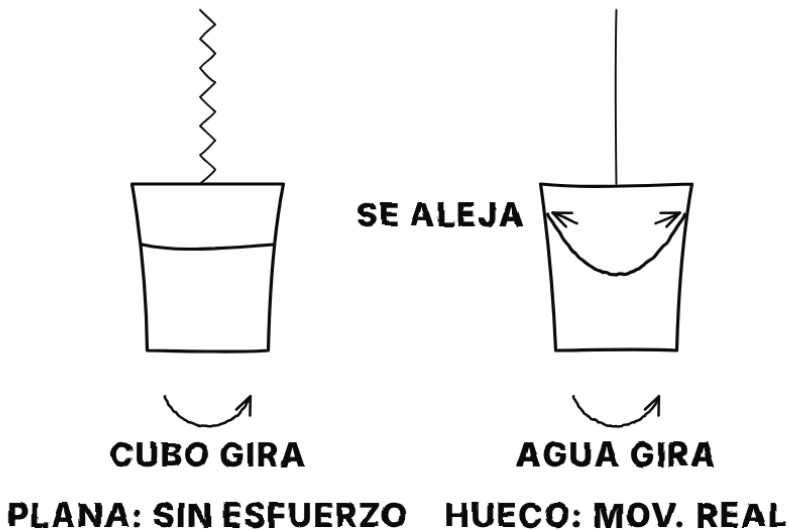


Empujar el otro cuerpo

Los efectos que distinguen el movimiento absoluto del relativo son las fuerzas de alejarse del eje del movimiento circular. Pues en un movimiento circular puramente relativo no hay tales fuerzas; pero en un movimiento circular verdadero y absoluto son mayores o menores según la cantidad del movimiento. Si un recipiente, colgado de una cuerda larga, se hace girar tantas veces que la cuerda quede muy retorcida, luego se llena de agua y se mantiene en reposo junto con el agua, y después, por la acción repentina de otra fuerza, se le hace girar en sentido contrario, y mientras la cuerda se desenrolla el recipiente continúa un tiempo en este movimiento, entonces la superficie del agua estará al principio plana, como antes de que el recipiente empezara a moverse. Pero el recipiente, al comunicar poco a poco su movimiento al agua, hará que esta empiece a girar de forma

perceptible, que se aleje poco a poco del centro y suba por las paredes del recipiente, formando una figura cóncava, como yo mismo he comprobado; y cuanto más rápido se hace el movimiento, más sube el agua, hasta que por fin, dando sus vueltas en los mismos tiempos que el recipiente, queda relativamente en reposo en él. Esta subida del agua muestra su esfuerzo por alejarse del eje de su movimiento; y el movimiento circular verdadero y absoluto del agua, que aquí es directamente contrario al relativo, se descubre y puede medirse por este esfuerzo. Al principio, cuando el movimiento relativo del agua en el recipiente era máximo, no producía ningún esfuerzo por alejarse del eje; el agua no mostraba tendencia hacia la circunferencia ni subida alguna hacia las paredes del recipiente, sino que mantenía una superficie plana, y por tanto su movimiento circular verdadero aún no había empezado. Pero después, cuando el movimiento relativo del agua había disminuido, su subida hacia las paredes del recipiente probó su esfuerzo por alejarse del eje; y este esfuerzo mostraba el movimiento circular real del agua aumentando sin cesar, hasta alcanzar su mayor cantidad cuando el agua reposaba relativamente en el recipiente. Y por tanto este esfuerzo no depende de ningún traslado del agua respecto a los cuerpos que la rodean, ni el movimiento circular verdadero puede definirse por tal traslado. Solo hay un movimiento circular real de un cuerpo que gira, que corresponde a un solo poder de esforzarse por alejarse de su eje de movimiento, como su efecto propio y adecuado; pero los movimientos relativos en un mismo cuerpo son innumerables, según las diversas relaciones que guarda con los cuerpos externos, y, como otras relaciones, carecen por completo de efecto real, salvo en la medida en que quizá participen de aquel único movimiento verdadero. Y por tanto, en el sistema de quienes suponen que nuestros cielos, al girar por debajo de la esfera de las estrellas fijas, llevan consigo a los planetas, las distintas partes

de esos cielos, y los planetas, que en efecto están relativamente en reposo en sus cielos, en realidad se mueven. Pues cambian su posición unos respecto a otros, cosa que nunca ocurre a los cuerpos verdaderamente en reposo; y, llevados junto con sus cielos, participan de sus movimientos y, como partes de todos que giran, se esfuerzan por alejarse del eje de sus movimientos.



El cubo que gira

Preguntas

1. ¿Por qué aplican los astrónomos una ecuación, o corrección, al tiempo común?

- a. Porque los relojes siempre adelantan
 - b. Porque los días naturales son en verdad desiguales, aunque se tratan como iguales
 - c. Porque el tiempo absoluto se acelera y se frena
 - d. Porque las estrellas fijas se mueven de forma desigual
2. ¿Por qué el reposo absoluto no puede determinarse a partir de las posiciones de los cuerpos en nuestras regiones?
- a. Porque todo cuerpo cercano a nosotros está de hecho en reposo
 - b. Porque un cuerpo de verdad en reposo podría estar lejos, entre las estrellas fijas o más allá, y las posiciones mutuas de nuestros cuerpos no pueden mostrar si mantienen la misma posición respecto a él
 - c. Porque las posiciones no pueden medirse en absoluto
 - d. Porque el reposo y el movimiento son lo mismo
3. ¿Qué cambio puede alterar el movimiento relativo de un cuerpo sin ninguna fuerza impresa sobre el propio cuerpo?
- a. Ninguno: el movimiento relativo necesita una fuerza sobre el cuerpo
 - b. Una fuerza impresa sobre los otros cuerpos con los que se compara
 - c. Un cambio en el tiempo absoluto
 - d. Su propia vis inertiae
4. En el recipiente que gira, ¿cuándo sube el agua por las paredes?
- a. Al principio, cuando su movimiento respecto al recipiente es máximo

- b. Solo cuando el recipiente se mantiene en reposo
- c. A medida que crece su propio movimiento circular verdadero, máximo cuando reposa relativamente en el recipiente
- d. Nunca, ya que la superficie se mantiene plana todo el tiempo

Respuestas

1. **b)** Los días naturales son en verdad desiguales, aunque comúnmente se consideran iguales; los astrónomos corrigen esta desigualdad para deducir con más exactitud los movimientos celestes.
2. **b)** Es imposible saber, por la posición de los cuerpos entre sí en nuestras regiones, si alguno de ellos mantiene la misma posición respecto a algún cuerpo remoto en reposo; de ahí que el reposo absoluto no pueda determinarse a partir de ellos.
3. **b)** Basta con imprimir alguna fuerza sobre los otros cuerpos con los que se compara: al ceder estos, cambia la relación en que consistía su reposo o movimiento relativo.
4. **c)** Al principio el movimiento relativo era máximo y la superficie se mantenía plana; después, la subida del agua mostró su movimiento circular real en aumento, máximo cuando reposaba relativamente en el recipiente.

Ejercicios

1. Explique por qué, en el experimento del recipiente, el movimiento del agua respecto al recipiente no puede ser su movimiento circular verdadero.

Pista: Compare cuándo es máximo el movimiento relativo con cuándo sube el agua por las paredes.

Respuesta: Al principio el agua es la que más se mueve respecto al recipiente, pero su superficie se mantiene plana y no muestra ningún

esfuerzo por alejarse del eje. Más tarde, cuando reposa relativamente en el recipiente, sube al máximo. El efecto sigue al movimiento circular verdadero, no al relativo, así que el movimiento verdadero no puede consistir en la relación con el recipiente.

2. Un cuerpo está quieto dentro de una caja cerrada que se mueve.
¿Por qué dice el pasaje que no está realmente en reposo?

Pista: Piense en la cáscara y la almendra.

Respuesta: Las partes que conservan sus posiciones en un todo participan del movimiento del todo. La caja que lo rodea es al cuerpo lo que la cáscara a la almendra: si la cáscara se mueve, la almendra también se mueve, sin alejarse de la cáscara, así que el cuerpo solo parece estar en reposo.

3. ¿Por qué, según el pasaje, el movimiento verdadero solo puede determinarse por lugares inmóviles?

Pista: Pregúntese de qué se compone un movimiento desde un lugar que se mueve.

Respuesta: Un movimiento desde un lugar que a su vez se mueve es solo parte del movimiento entero, que incluye también el movimiento de ese lugar, y el de su lugar, y así sucesivamente. La cadena solo termina en un lugar inmóvil, así que los movimientos enteros y absolutos solo pueden determinarse por lugares inmóviles.

Medidas y cantidades; los dos globos

Por tanto, las cantidades relativas no son las cantidades mismas cuyos nombres llevan, sino aquellas medidas sensibles de ellas, exactas o inexactas, que se usan comúnmente en lugar de las cantidades medidas mismas. Y si el significado de las palabras ha de determinarse por su uso, entonces por los nombres de tiempo, espacio, lugar y movimiento han de entenderse propiamente sus medidas; y la expresión será inusual, y puramente matemática, si se quiere decir las cantidades medidas mismas. Por esta razón, fuerzan las Sagradas Escrituras quienes interpretan allí esas palabras como las cantidades medidas. Y no menos manchan la pureza de las verdades matemáticas y filosóficas quienes confunden las cantidades reales mismas con sus relaciones y medidas comunes.

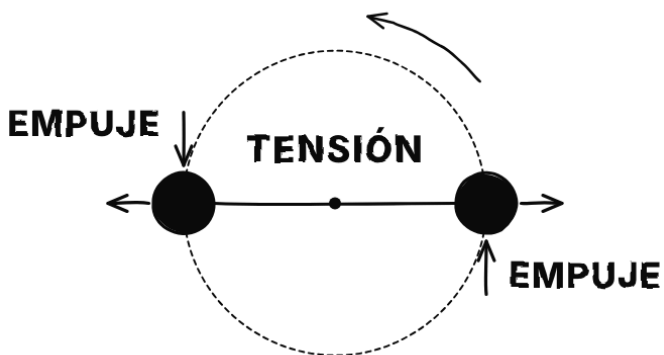
CANTIDADES $\neq$ MEDIDAS



Cantidades y sus medidas

Es en verdad cosa de gran dificultad descubrir, y distinguir de manera efectiva, los movimientos verdaderos de los cuerpos particulares de los aparentes, porque las partes de aquel espacio inmóvil en el que se realizan esos movimientos no caen en absoluto bajo la observación de nuestros sentidos. Sin embargo, la cosa no es del todo desesperada; pues tenemos algunos argumentos que nos guían, en parte a partir de los movimientos aparentes, que son las diferencias de los movimientos verdaderos, y en parte a partir de las fuerzas, que son las causas y efectos de los movimientos verdaderos. Por ejemplo, si dos globos, mantenidos a una distancia dada uno del otro mediante una cuerda que los une, giraran alrededor de su centro de gravedad común, podríamos, por la tensión de la cuerda, descubrir el esfuerzo de los globos por alejarse del eje de su movimiento, y a partir de ahí

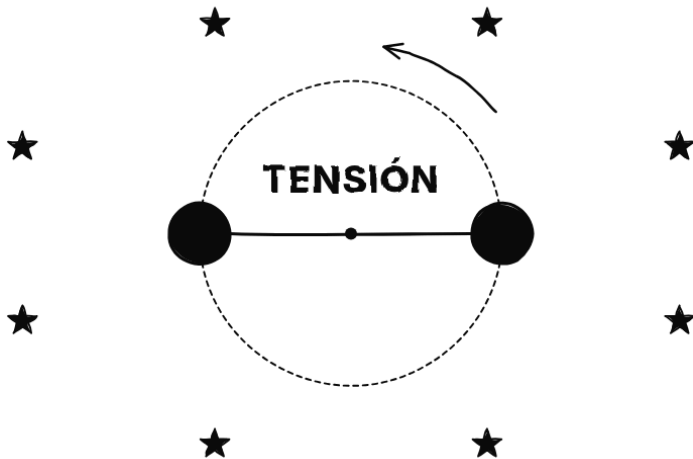
podríamos calcular la cantidad de sus movimientos circulares. Y luego, si se imprimieran a la vez fuerzas iguales sobre las caras alternas de los globos para aumentar o disminuir sus movimientos circulares, por el aumento o la disminución de la tensión de la cuerda podríamos inferir el incremento o el decremento de sus movimientos. Y de ahí se hallaría sobre qué caras deberían imprimirse esas fuerzas para que los movimientos de los globos aumentaran al máximo; es decir, podríamos descubrir sus caras traseras, o las que, en el movimiento circular, van detrás. Pero conocidas las caras que van detrás, y por tanto las opuestas que van delante, conoceríamos también la dirección de sus movimientos. Y así podríamos hallar tanto la cantidad como la dirección de este movimiento circular, incluso en un vacío inmenso, donde no hubiera nada externo ni sensible con que comparar los globos. Pero ahora, si en ese espacio se colocaran algunos cuerpos remotos que mantuvieran siempre una posición dada unos respecto a otros, como hacen las estrellas fijas en nuestras regiones, no podríamos en efecto determinar, por el traslado relativo de los globos entre esos cuerpos, si el movimiento pertenecía a los globos o a los cuerpos. Pero si observáramos la cuerda, y halláramos que su tensión era justo la tensión que requerían los movimientos de los globos, podríamos concluir que el movimiento está en los globos y que los cuerpos están en reposo; y entonces, por último, a partir del traslado de los globos entre los cuerpos, hallaríamos la dirección de sus movimientos. Pero cómo hemos de obtener los movimientos verdaderos a partir de sus causas, efectos y diferencias aparentes y, a la inversa, cómo a partir de los movimientos, verdaderos o aparentes, podemos llegar al conocimiento de sus causas y efectos, se explicará con más detalle en el tratado que sigue. Pues con este fin lo compuse.



ESPACIO VACÍO

Dos globos unidos por una cuerda

ESTRELLAS FIJAS



GIRAN GLOBOS

Globos entre las estrellas

Preguntas

1. Según el pasaje, ¿qué son las cantidades relativas?
 - a. Las cantidades verdaderas mismas
 - b. Medidas sensibles, exactas o no, que se usan en lugar de las cantidades mismas
 - c. Cantidades que solo existen en los cielos
 - d. Cantidades medidas sin ningún instrumento

2. En un vacío inmenso sin nada con que compararlos, ¿cómo podría hallarse el movimiento circular de dos globos unidos por una cuerda?
 - a. No podría hallarse en absoluto
 - b. Por la tensión de la cuerda, que muestra su esfuerzo por alejarse del eje
 - c. Por la luz que reflejan
 - d. Por su peso hacia el centro de la Tierra
3. Si se añadieran cuerpos remotos como las estrellas fijas, ¿qué nos permitiría decidir la tensión de la cuerda que su traslado relativo por sí solo no podría?
 - a. Si el movimiento pertenece a los globos o a los cuerpos remotos
 - b. A qué distancia están los cuerpos remotos
 - c. Cuánto pesan los globos
 - d. Si la cuerda se romperá

Respuestas

1. **b)** Las cantidades relativas no son las cantidades mismas cuyos nombres llevan, sino sus medidas sensibles, exactas o inexactas, que se usan comúnmente en su lugar.
2. **b)** Por la tensión de la cuerda se descubre el esfuerzo de los globos por alejarse del eje de su movimiento, y a partir de ahí se calcula la cantidad de su movimiento circular.
3. **a)** Por el traslado relativo solo no podría saberse si el movimiento pertenecía a los globos o a los cuerpos; pero si la tensión de la cuerda es la que requieren los movimientos de los globos, el movimiento está en los globos.

Ejercicios

1. Explique cómo fuerzas iguales aplicadas sobre las caras alternas de los dos globos revelarían en qué sentido giran.

Pista: Pregúntese qué le pasa a la tensión de la cuerda cuando las fuerzas aceleran los globos.

Respuesta: Las fuerzas sobre unas caras aumentan el movimiento circular y elevan la tensión de la cuerda; sobre las caras opuestas lo disminuyen. Las caras en las que las fuerzas más aumentan el movimiento son las traseras, las que van detrás; conocerlas, y por tanto las caras que van delante, da la dirección del movimiento.

2. ¿Por qué, según Newton, es un error confundir las cantidades reales con sus medidas comunes?

Pista: Piense en qué nombran en el uso cotidiano palabras como tiempo y movimiento.

Respuesta: En el uso cotidiano los nombres de tiempo, espacio, lugar y movimiento designan sus medidas sensibles, no las cantidades mismas. Confundir las dos cosas mezcla las cantidades reales con relaciones y medidas comunes, lo que según Newton mancha la pureza de las verdades matemáticas y filosóficas.