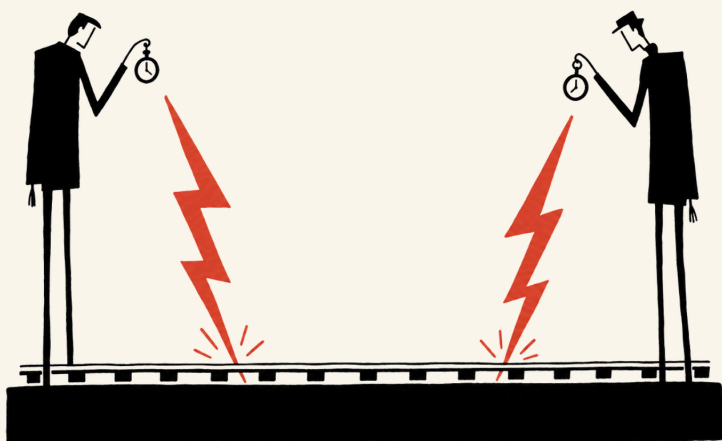


Sobre la teoría de la relatividad especial y general



Albert Einstein · 1917

Audiolecciones ilustradas

Lecturized

Sobre la teoría de la relatividad especial y general

Audiolecciones ilustradas

Albert Einstein · 1917

Contado como lecciones ilustradas por Lecturized
lecturized.com

Del original: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie
(Gemeinverständlich)

Índice

¿Cuándo es verdadero un teorema?

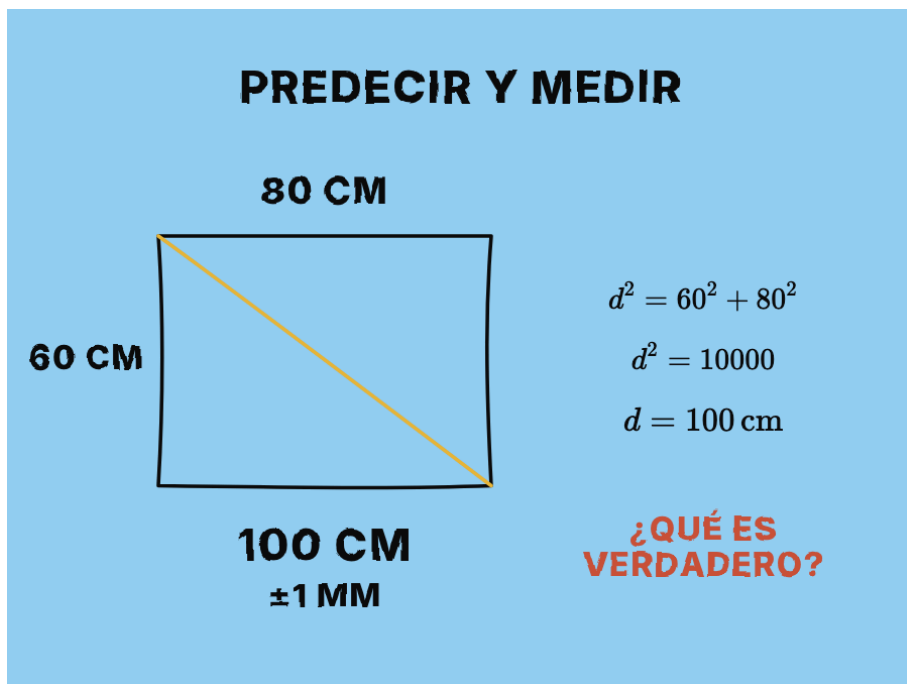
Tres números para un lugar

La piedra que cayó de dos maneras

¿Qué cuerpos de referencia están permitidos?

¿Cuándo es verdadero un teorema?

Lleve una cinta métrica a una mesa rectangular, la de la cocina sirve. Mida el lado corto y el lado largo, y anote los dos números. Ahora tienda la cinta de una esquina a la esquina opuesta, a lo largo de la diagonal, pero antes de leer el número, predígalo con el único teorema que todo el mundo recuerda de la escuela. Suponga que los lados dieron 60 centímetros y 80 centímetros. Sesenta al cuadrado es 3600, ochenta al cuadrado es 6400, la suma es 10 000, y la raíz cuadrada de 10 000 es 100. Mira la cinta, y ahí está: 100 centímetros, milímetro más o menos. ¿Qué ha confirmado exactamente?



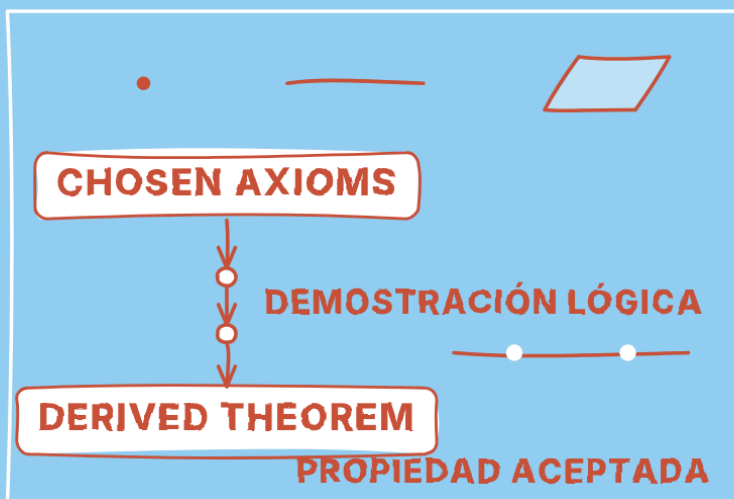
La predicción se encuentra con la medición

La mayoría diría que ha comprobado que Pitágoras tenía razón, que el teorema es verdadero. Albert Einstein abre su pequeño libro deteniéndonos precisamente aquí y preguntando, con cierta malicia, qué queremos decir siquiera cuando llamamos verdadera a una afirmación así. Nos recuerda que la mayoría de nosotros conocimos el orgulloso edificio de la geometría de Euclides de niños, perseguidos por sus altas escaleras por profesores concienzudos, y que lo recordamos con más respeto que cariño. Por lealtad a aquella escuela despreciaríamos a cualquiera que dudase del más humilde de sus teoremas. Y sin embargo, dice, nuestra orgullosa seguridad puede evaporarse en el momento en que alguien pregunte qué se supone que significa «verdadero».

Así es como se construye la geometría. Parte de unas pocas nociones básicas, como plano, punto y recta, que imaginamos con mayor o menor claridad, y de unas pocas afirmaciones simples sobre ellas, los axiomas, que estamos dispuestos a aceptar porque las imágenes los hacen parecer evidentes. Toda otra afirmación se deduce luego de los axiomas por pasos lógicos cuya validez nos sentimos obligados a admitir; esa deducción es lo que llamamos una demostración. Así que dentro de la geometría un teorema es correcto, o «verdadero», cuando se ha deducido correctamente de los axiomas, y nada más. Toda la cuestión de la verdad se traslada así a los propios axiomas. Y ahí muere, porque, como dice Einstein, la pregunta de si un axioma es verdadero no puede responderla la geometría, y peor aún, no tiene ningún sentido.

GEOMETRÍA PURA

?



Dentro de la geometría pura

Pruébalo con el axioma más simple. ¿Es verdad que por dos puntos pasa una sola recta? No puede preguntarlo. Todo lo que puede decir es que la geometría euclidiana trata de ciertos objetos que decide llamar rectas, y que les concede la propiedad de quedar fijados por dos de sus puntos. La palabra «verdadero» no se ajusta a las afirmaciones de la geometría pura, porque cuando decimos «verdadero» queremos decir siempre, en el fondo, concordancia con alguna cosa real, y la geometría pura no trata de cosas reales. Trata solo de las conexiones lógicas entre sus propios conceptos.

¿Por qué, entonces, resulta tan natural llamar verdaderos a los teoremas? Porque los conceptos de la geometría corresponden, con mayor o menor exactitud, a objetos de la naturaleza, y esos objetos

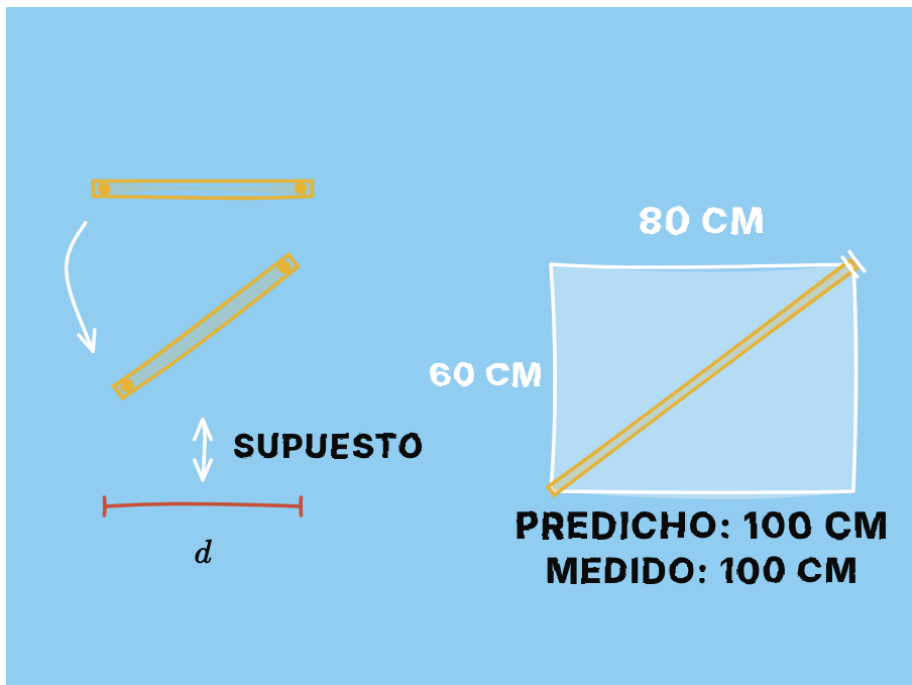
son sin duda la razón por la que los conceptos surgieron en primer lugar. La geometría puede mantener su distancia de la naturaleza para que su estructura sea lógicamente hermética, pero la costumbre de ver un segmento como dos marcas sobre un cuerpo prácticamente rígido está muy arraigada en nuestro pensamiento. También solemos considerar que tres lugares están en línea recta cuando, mirando con un solo ojo desde un punto bien elegido, podemos hacer coincidir sus posiciones aparentes. Eso es una prueba física, hecha con un ojo y un cuerpo, no una prueba lógica.

Pruébalo

Ponga tres lápices de pie en bolitas de plastilina sobre una mesa, más o menos en fila, y mírelos con un ojo cerrado. Mueva la cabeza despacio de un lado a otro. Si están bien alineados hay un punto de vista desde el cual el lápiz más cercano oculta a los otros dos, y las tres formas se funden en una sola silueta estrecha. Acaba de usar su ojo como prueba de rectitud; guarde esta imagen, porque toda la sección descansa en ella.

Ahora Einstein hace el movimiento decisivo, y es una sola frase añadida. A los teoremas de Euclides añadimos una afirmación más: a dos puntos de un cuerpo prácticamente rígido les corresponde siempre la misma distancia, el mismo segmento, cualesquiera que sean los cambios de posición a los que sometamos el cuerpo. Nada en la geometría pura dice eso; es una afirmación sobre reglas de acero y varillas de madera y sobre el comportamiento de la materia real. Una vez añadida, los teoremas de la geometría euclidiana se convierten en afirmaciones sobre la posible disposición relativa de cuerpos

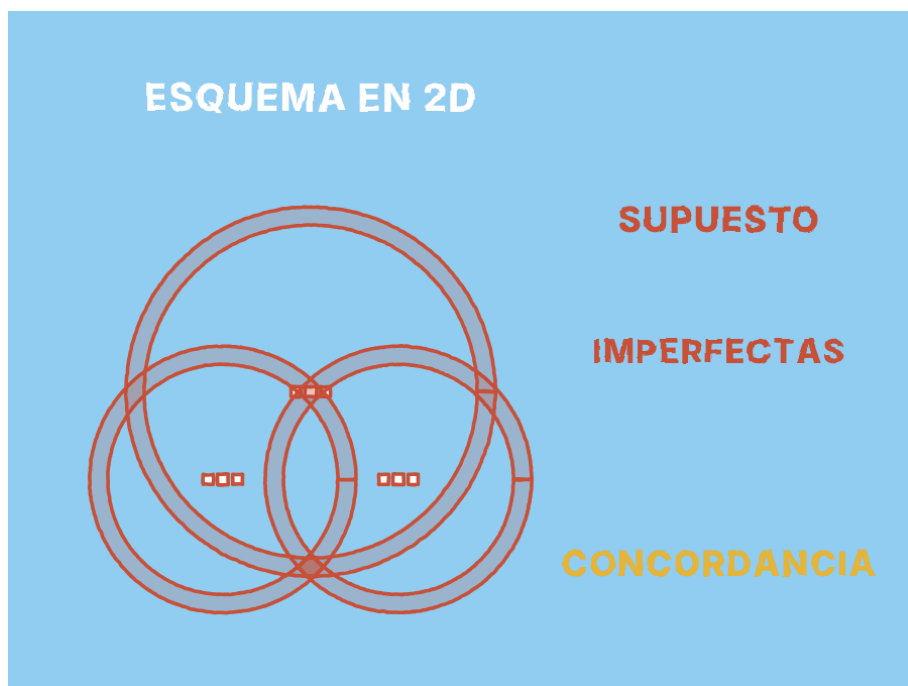
prácticamente rígidos. La geometría así completada debe tratarse como una rama de la física.



El supuesto físico añadido

Y ahora la cuestión de la verdad vuelve a tener entrada, porque ahora tiene algo a lo que agarrarse. Podemos preguntar si esos teoremas se cumplen para las cosas reales que hemos asignado a los conceptos geométricos, las marcas, los bordes, las varillas. Con cierta inexactitud, dice Einstein, podemos entender por «verdad» de un teorema geométrico en este sentido que se cumple en una construcción con compás y regla. Eso es exactamente lo que hizo usted en la mesa de la cocina. El teorema sobre la diagonal era verdadero en el sentido físico porque la cinta, un cuerpo prácticamente rígido, coincidió con la predicción.

El mismo movimiento se hace, a gran escala, cada vez que su teléfono encuentra su posición. Un receptor de navegación por satélite mide su distancia a varios satélites y luego aplica geometría corriente, la misma geometría de segmentos y puntos, para convertir esas distancias en un lugar del mapa. Nadie podía demostrar de antemano que esto funcionaría; funciona porque la geometría aplicada concuerda con la experiencia, con el lugar donde el teléfono resulta estar realmente. La geometría se gana su verdad física como cualquier afirmación física: comprobándose contra el mundo.



Las distancias localizan un receptor

Einstein tiene cuidado de añadir que la convicción de que los teoremas geométricos son verdaderos en este sentido descansa en nada más que una experiencia bastante imperfecta. Una cinta métrica

nunca es perfectamente rígida, un ojo nunca es perfectamente recto. Por el momento, dice, supondremos esa verdad, porque sin ella no podemos describir nada, y en la última parte del libro, al llegar a la teoría de la relatividad general, veremos que tiene límites, y dónde están. Esa promesa es el hilo al que aferrarse: la geometría en la que confió en la mesa se acepta a prueba.

Para recordar

Un teorema de geometría pura es «verdadero» solo en el sentido de que se sigue de los axiomas, y si los axiomas son verdaderos es una pregunta sin sentido dentro de la geometría. Los teoremas parecen verdaderos porque sus conceptos nacieron de objetos reales, y estamos acostumbrados a ver un segmento como dos marcas sobre un cuerpo rígido. Añada una afirmación física, que dos puntos de un cuerpo prácticamente rígido conservan la misma distancia por mucho que se mueva el cuerpo, y la geometría se convierte en una rama de la física sobre la disposición de tales cuerpos. Entonces un teorema es verdadero en el sentido físico cuando una construcción con compás y regla, o una cinta métrica sobre una mesa, o un receptor de satélites, concuerda con él. Esa concordancia descansa en una experiencia imperfecta y se da por supuesta por ahora; sus límites aparecen en la teoría de la relatividad general.

Preguntas

1. Dentro de la geometría pura, ¿qué significa decir que un teorema es verdadero?
 - a. Que concuerda con mediciones hechas sobre objetos reales
 - b. Que se ha deducido correctamente de los axiomas, y nada más
 - c. Que la mayoría de quienes lo piensan con cuidado lo encuentran evidente
2. ¿Por qué dice Einstein que la pregunta de si un axioma es verdadero no tiene sentido dentro de la geometría?
 - a. Porque los axiomas son demasiado simples para dudar de ellos
 - b. Porque un axioma solo puede demostrarse a partir de otros axiomas
 - c. Porque la geometría pura trata solo de las conexiones lógicas entre sus propios conceptos, no de cosas reales
 - d. Porque nadie ha encontrado todavía la manera de ponerlos a prueba
3. ¿Qué única adición convierte la geometría de Euclides en una rama de la física?
 - a. La afirmación de que dos puntos de un cuerpo prácticamente rígido conservan la misma distancia por mucho que se mueva el cuerpo
 - b. La afirmación de que los axiomas son verdaderos porque la experiencia los confirma
 - c. La afirmación de que una recta es el camino más corto entre dos puntos
 - d. La afirmación de que la luz viaja siempre en línea recta

4. Tras esa adición, ¿cuándo es verdadero un teorema geométrico en el sentido físico?
- a. Cuando puede deducirse de los axiomas de la manera aceptada
 - b. Cuando se cumple en una construcción con cuerpos reales, como compás y regla
 - c. Cuando profesores concienzudos lo han aceptado durante mucho tiempo

Respuestas

1. b) Dentro de la geometría un teorema es correcto, o verdadero, solo cuando se ha deducido de los axiomas por pasos lógicos aceptados; la concordancia con cosas reales no es de lo que trata la geometría pura.

2. c) La palabra verdadero significa siempre, en el fondo, concordancia con alguna cosa real, y la geometría pura no trata de cosas reales; trata solo de cómo se conectan lógicamente sus conceptos.

3. a) Una vez que añadimos que a dos puntos de un cuerpo prácticamente rígido les corresponde siempre el mismo segmento hagamos lo que hagamos con el cuerpo, los teoremas se convierten en afirmaciones sobre la posible disposición de tales cuerpos, y eso es física.

4. b) Einstein dice, con cierta inexactitud, que la verdad de un teorema geométrico en este sentido significa que se cumple en una construcción con compás y regla, que es una comprobación contra cosas reales.

Ejercicios

1. Un amigo dice: «El teorema de Pitágoras es verdadero, lo comprobé con una cinta métrica en mi mesa». ¿En qué sentido de la palabra

verdadero tiene razón su amigo, y en qué sentido no ha comprobado nada en absoluto?

Pista: Separe el teorema como afirmación deducida de axiomas del teorema como afirmación sobre una cinta métrica y una mesa.

Respuesta: Su amigo tiene razón en el sentido físico: con la afirmación añadida de que una cinta métrica es un cuerpo prácticamente rígido cuyas marcas conservan su distancia, el teorema se convierte en una afirmación sobre segmentos reales, y la mesa concordó con él. En el sentido de la geometría pura no ha comprobado nada, porque allí el teorema es verdadero solo por deducirse de los axiomas, y ninguna medición puede afectar a eso.

2. ¿Por qué, según Einstein, ni siquiera puede plantearse la pregunta de si por dos puntos pasa una sola recta, mientras que sí puede plantearse si una diagonal medida coincide con la calculada?

Pista: Pregúntese de qué trata cada cuestión: de conceptos o de cosas reales.

Respuesta: La primera es una afirmación de la geometría pura sobre objetos que decide llamar rectas, definidos por tener esa propiedad; preguntar si es verdadera sería pedir concordancia con alguna cosa real, y la geometría pura no trata de cosas reales. La segunda trata de marcas sobre una cinta rígida y una mesa, cosas reales asignadas a los conceptos, así que la concordancia o discordancia con ellas es una pregunta con sentido.

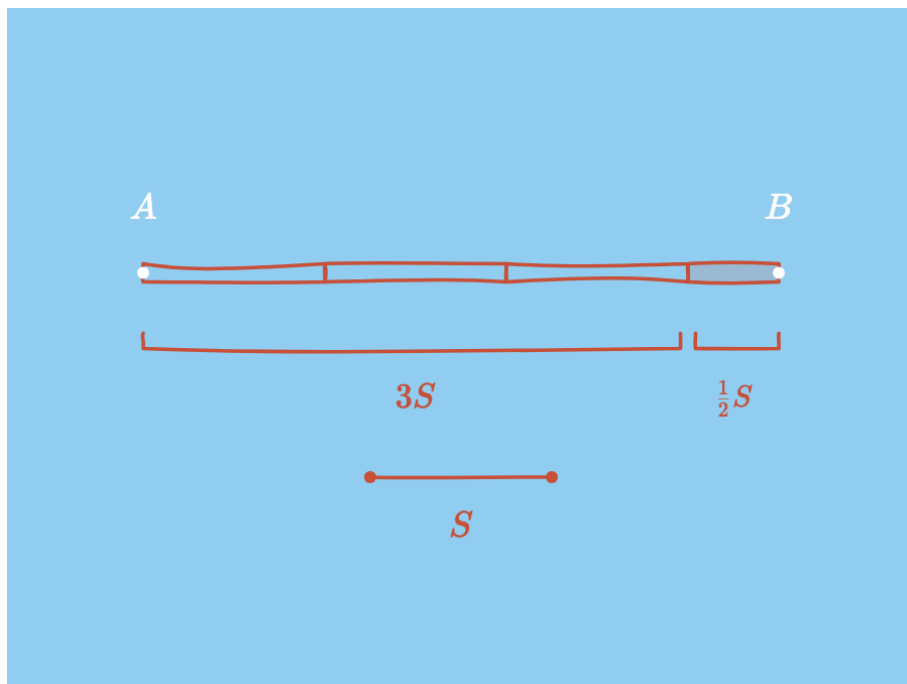
3. Einstein dice que nuestra convicción de que la geometría se cumple en los cuerpos reales descansa en una experiencia bastante imperfecta, y que por ahora la aceptamos. Dé dos razones por las que la experiencia es imperfecta, usando los ejemplos de esta parte, y diga qué promete Einstein al respecto.

Pista: Piense en lo que son realmente una cinta métrica y un ojo que apunta.

Respuesta: Una cinta métrica nunca es perfectamente rígida, así que dos marcas sobre ella no conservan exactamente la misma distancia; y un ojo que alinea tres lápices es una prueba tosca de rectitud, no exacta. Por eso la concordancia entre la geometría y los cuerpos reales es solo aproximada. Einstein promete suponer esa concordancia por ahora y mostrar, en la última parte del libro sobre la teoría de la relatividad general, que tiene límites y dónde están.

Tres números para un lugar

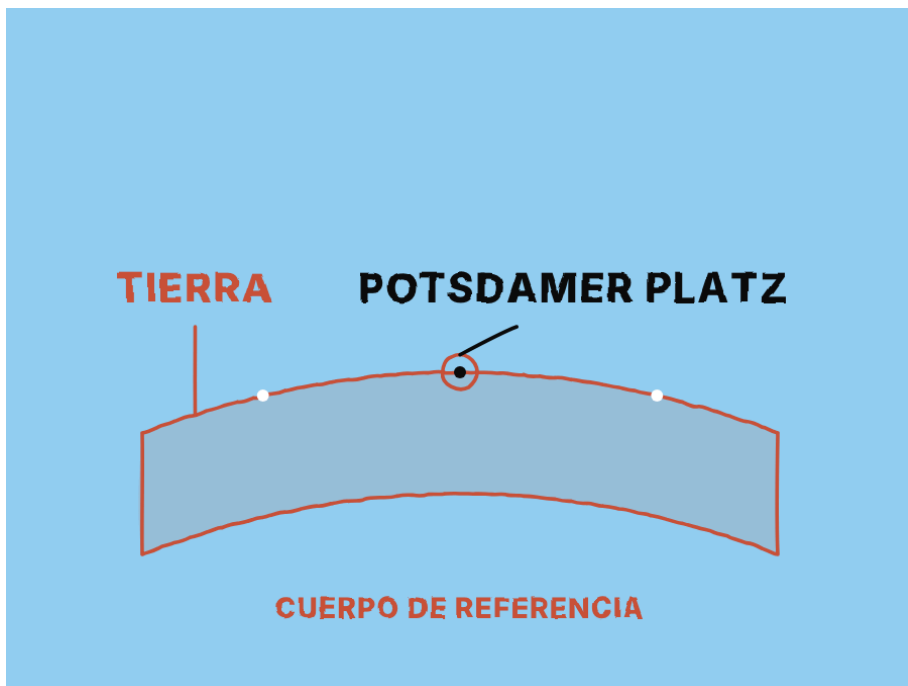
Tome una regla de madera, una corta, y mida con ella el ancho de una puerta. Apoya la regla contra el marco, marca con la punta del dedo dónde termina, la vuelve a apoyar desde la marca y cuenta: una, dos, tres reglas y un poco más. Nadie le enseñó a hacer esto; es lo que es medir. Einstein nos pide mirar de cerca esta acción cotidiana, porque toda afirmación sobre dónde está algo, en la física y en la vida diaria, descansa en ella.



La longitud es una unidad repetida

La última vez acordamos que dos marcas sobre un cuerpo prácticamente rígido son lo que realmente es un segmento. Ahora tome uno de esos segmentos y comprométase a usarlo de una vez por todas: una varilla pequeña, llámela S , la unidad de medida. Si A y B son dos puntos de un cuerpo rígido, la recta que los une puede construirse según las reglas de la geometría, y a lo largo de esa recta coloca la varilla S desde A tantas veces como haga falta para llegar a B . El número de veces que tuvo que colocarla es la medida del segmento AB . Toda medición de longitudes, cada cinta y cada telémetro láser, se reduce a este recuento de una unidad repetida.

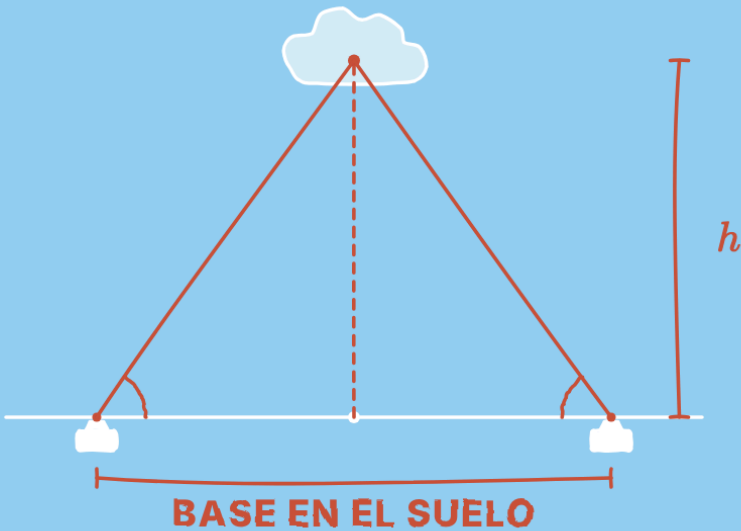
Ahora la cuestión de dónde está una cosa. Toda descripción espacial del lugar de un suceso o de un objeto, dice Einstein, consiste en nombrar el punto de un cuerpo rígido con el que el suceso coincide. Ese cuerpo rígido es el cuerpo de referencia. Esto no vale solo en la ciencia; así funciona el habla cotidiana. Diga «en Berlín, en la Potsdamer Platz». La superficie de la Tierra es el cuerpo rígido al que se refiere la afirmación; sobre ella, «Potsdamer Platz en Berlín» es un punto marcado con un nombre, y el suceso está en ese punto.



Un lugar sobre un cuerpo de referencia

Pero esta manera de indicar un lugar es primitiva en dos sentidos. Conoce solo lugares en la superficie de cuerpos rígidos, y depende de que haya en esa superficie puntos distinguibles y con nombre. Einstein muestra cómo la mente humana se libera de ambas restricciones sin cambiar lo que es una indicación de lugar. Suponga que una nube flota sobre la Potsdamer Platz. Su lugar, respecto a la superficie de la Tierra, puede fijarse levantando en la plaza un poste vertical, lo bastante alto para llegar a la nube. La longitud del poste, medida con la varilla unidad, junto con el lugar del pie del poste, es una indicación completa de dónde está la nube.

NÚMEROS MEDIDOS



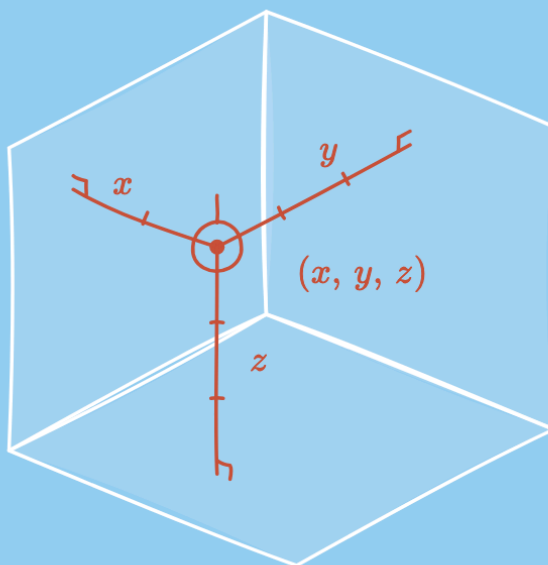
Medir un poste no construido

Mire lo que ha ocurrido en ese ejemplo, porque en él se esconden tres refinamientos de la idea de lugar. Primero, el cuerpo rígido de referencia se ha prolongado, con el poste, hasta alcanzar la cosa que se quiere localizar. Segundo, un número, la longitud medida del poste, ha sustituido a un punto de referencia con nombre para caracterizar el lugar. Tercero, hablamos de la altura de la nube incluso cuando no se ha construido ningún poste que llegue a ella. En ese caso se fotografía la nube desde varios puntos del suelo y, sabiendo cómo viaja la luz, se calcula qué longitud tendría que tener el poste. El poste es imaginario, pero su longitud se mide de todos modos.

De esto Einstein saca la lección: para describir lugares conviene liberarse, usando números medidos, de la necesidad de puntos de

referencia con nombre en el cuerpo de referencia. La física que mide lo hace con el sistema de coordenadas cartesiano. Imagine tres paredes planas rígidas, cada una perpendicular a las otras dos, unidas en un solo cuerpo rígido, como dos paredes y el suelo que se juntan en la esquina de una habitación. El lugar de cualquier suceso respecto a este sistema se describe, en esencia, por las longitudes de las tres perpendiculares que pueden trazarse desde el suceso hasta las tres paredes. Esas tres longitudes son las coordenadas, escritas (x, y, z) . Cada una puede encontrarse mediante una sucesión de manipulaciones con varillas rígidas, realizadas según las leyes y los métodos de la geometría euclidiana.

TRES DISTANCIAS MEDIDAS



Tres distancias fijan un lugar

Pruébalo en su propia habitación. Elija la esquina donde dos paredes se juntan con el suelo. Una lámpara colgada en la habitación está a tanta distancia de una pared, a tanta de la otra y a tanta altura sobre el suelo: tres distancias, tres varillas colocadas y contadas, y el lugar de la lámpara queda fijado sin ningún punto de referencia. Mueva la lámpara, y solo cambian los tres números; las paredes siguen siendo lo que eran.

En la práctica, admite Einstein, las tres paredes rígidas casi nunca se construyen, y las coordenadas casi nunca se encuentran con construcciones de varillas rígidas; se encuentran de manera indirecta. Un receptor de satélites en su bolsillo nunca apoya una varilla en nada; mide cuánto tardaron en llegar las señales de varios satélites y calcula sus tres coordenadas a partir de esos tiempos, igual que la altura de la nube se calculó a partir de fotografías. Y sin embargo el sentido físico de cada indicación de lugar de ese tipo debe buscarse siempre de la manera que acabamos de describir, en varillas apoyadas sobre un cuerpo rígido. De lo contrario, advierte, los resultados de la física y de la astronomía se disuelven en la vaguedad.

Así que aquí es adonde llega la sección. Toda descripción espacial de sucesos se sirve de un cuerpo rígido al que los sucesos se refieren. Esa referencia presupone que las leyes de la geometría euclidiana valen para los segmentos, donde un segmento está representado físicamente por dos marcas sobre un cuerpo rígido. El supuesto que aceptamos a prueba la última vez carga ahora con toda la idea de lugar.

Para recordar

La longitud se mide colocando una varilla unidad elegida a lo largo de la recta entre dos puntos y contando las repeticiones; toda medición de longitud se reduce a esto. Decir dónde está algo significa nombrar el punto de un cuerpo rígido de referencia con el que coincide, como «Potsdamer Platz en Berlín» nombra un punto de la superficie de la Tierra. La idea de lugar se refina prolongando el cuerpo de referencia, sustituyendo los puntos de referencia con nombre por números medidos y hablando de una longitud incluso cuando la varilla es solo imaginaria. El sistema de coordenadas cartesiano lo hace sistemático: tres paredes rígidas perpendiculares entre sí, y las tres distancias perpendiculares de un suceso a ellas son sus coordenadas. Ya se encuentre con varillas o se calcule a partir de señales, una indicación de lugar significa esto, y supone que la geometría euclidiana vale para los segmentos sobre cuerpos rígidos.

Preguntas

1. Según la lección, ¿en qué consiste realmente la medida de un segmento AB?
 - a. En el número de veces que hay que colocar la varilla unidad S a lo largo de la recta de A a B
 - b. En la distancia que una señal necesita recorrer de A a B
 - c. En el número de marcas con nombre que hay entre A y B sobre el cuerpo rígido

2. ¿Qué significa una afirmación como «en Berlín, en la Potsdamer Platz», una vez analizada como lo hace la lección?
 - a. Que el suceso está a cierta distancia del centro de la Tierra
 - b. Que el suceso tiene tres coordenadas medidas desde las paredes de una habitación
 - c. Que el suceso coincide con un punto marcado y con nombre de un cuerpo rígido, la superficie de la Tierra
 - d. Que puede alcanzarse el suceso con un poste levantado en la plaza
3. Una nube flota sobre la plaza. ¿Qué refinamiento de la idea de lugar actúa cuando su altura se calcula a partir de fotografías tomadas en varios puntos del suelo?
 - a. El cuerpo de referencia se prolonga con un poste real hasta la nube
 - b. Un número ocupa el lugar de un punto de referencia con nombre en la superficie de la Tierra
 - c. Se habla de una longitud aunque la varilla que la mediría nunca se construyó
 - d. La nube se trata como un punto del cuerpo rígido de referencia
4. ¿Por qué insiste Einstein en que el sentido físico de una indicación de lugar debe buscarse siempre en varillas apoyadas sobre un cuerpo rígido, incluso cuando las coordenadas se encuentran de manera indirecta?
 - a. Porque los métodos indirectos como las señales nunca son bastante exactos

- b. Porque de lo contrario los resultados de la física y de la astronomía pierden su sentido definido
- c. Porque las tres paredes rígidas del sistema de coordenadas siempre se construyen en la práctica

Respuestas

- 1. a) A lo largo de la recta que une A y B coloca la varilla S desde A tantas veces como haga falta para llegar a B; el número de repeticiones es la medida del segmento, y toda medición de longitudes se reduce a esto.
- 2. c) Toda descripción espacial nombra el punto de un cuerpo rígido de referencia con el que el suceso coincide; aquí la superficie de la Tierra es el cuerpo de referencia y la Potsdamer Platz un punto con nombre sobre ella.
- 3. c) Hablamos de la altura de la nube incluso cuando no existe ningún poste que llegue a ella; a partir de las fotografías y de cómo viaja la luz se calcula qué longitud tendría que tener, así que el poste es imaginario pero su longitud se mide de todos modos.
- 4. b) Las paredes casi nunca se construyen y las coordenadas se encuentran de manera indirecta, pero su sentido debe ser el que dan las varillas y un cuerpo rígido, o los resultados de la física y de la astronomía se disuelven en la vaguedad.

Ejercicios

- 1. Una lámpara cuelga en una habitación. Tomando como sistema de coordenadas la esquina donde dos paredes se juntan con el suelo, explique con sus palabras qué son sus tres coordenadas y cómo se mide cada una, en principio.

Pista: Piense en las tres paredes planas como el cuerpo rígido y pregúntese qué es una perpendicular trazada desde la lámpara hasta cada pared.

Respuesta: Las dos paredes y el suelo son tres planos rígidos perpendiculares entre sí unidos en un solo cuerpo rígido. Desde la lámpara trace una perpendicular hasta cada uno de ellos; las longitudes de esas tres perpendiculares son las coordenadas x , y , z . Cada longitud se encuentra, en principio, colocando la varilla unidad a lo largo de la perpendicular y contando las repeticiones, una construcción regida por la geometría euclidiana.

2. Einstein dice que la manera primitiva de indicar un lugar está sujeta a dos restricciones. Nómbrelas y diga, para cada una, cómo el ejemplo de la nube nos libera de ella sin cambiar lo que es una indicación de lugar.

Pista: Parta de lo que «Potsdamer Platz en Berlín» puede y no puede localizar.

Respuesta: La manera primitiva conoce solo lugares en la superficie de un cuerpo rígido, y necesita puntos distinguibles y con nombre en esa superficie. El poste prolonga el cuerpo rígido hacia arriba, de modo que puede indicarse un lugar fuera de la superficie; y la longitud medida del poste, un número, sustituye a un punto de referencia con nombre. En ambos casos la indicación sigue nombrando un punto de un cuerpo rígido con el que la nube coincide, así que su naturaleza no cambia.

3. Un receptor de satélites calcula su posición a partir de los tiempos de llegada de las señales y nunca toca una varilla. ¿En qué sentido su respuesta sigue siendo una indicación de lugar del tipo que describe la lección, y en qué supuesto sobre la geometría descansa?

Pista: Compárelo con la nube cuya altura se calculó a partir de fotografías.

Respuesta: El receptor encuentra sus coordenadas de manera indirecta, como la altura de la nube se encontró a partir de fotografías, pero su sentido físico sigue siendo las longitudes de tres perpendiculares a un cuerpo rígido de referencia, longitudes que una varilla podría medir en

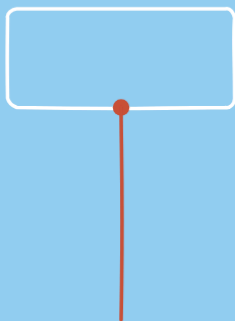
principio. Como toda descripción espacial, supone que la geometría euclidiana vale para los segmentos, siendo un segmento dos marcas sobre un cuerpo rígido.

La piedra que cayó de dos maneras

Siéntese junto a la ventanilla de un tren que avanza suavemente por una vía recta, a velocidad constante, sin sacudidas. Saque una piedra por la ventanilla y simplemente suéltela, sin darle ningún impulso. Mírela. Lo que ve, si ignoramos el aire, es una piedra que cae en línea recta, como si el tren estuviera parado; sale de su mano y cae verticalmente hasta el terraplén de abajo. Ahora póngase en el lugar de un caminante en el sendero junto a la vía, que ve la misma piedra salir de la misma mano. El caminante la ve caer en una curva, una parábola, arrastrada hacia adelante con el tren mientras cae, y aterrizar bastante más allá del lugar donde fue soltada. Dos testigos honrados, una piedra y dos trayectorias distintas.

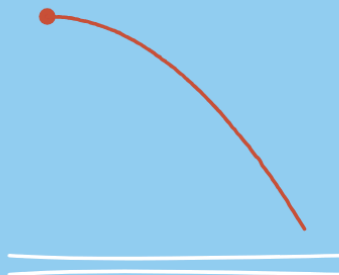
UN PASAJERO, DOS VELOCIDADES

VAGÓN



0 KM/H

SUELO



100 KM/H

Una piedra, dos trayectorias

Einstein abre esta sección con una confesión. Si dice, sin pensarlo más, que la mecánica tiene que describir cómo los cuerpos cambian su lugar en el espacio con el tiempo, comete, en sus propias palabras, varios pecados mortales contra el santo espíritu de la claridad. Los pecados se esconden en dos palabras pequeñas, «lugar» y «espacio», y la piedra que cae es su manera de sacarlos a la luz. Haga la pregunta que parece exigir respuesta: ¿los lugares por los que pasa la piedra están «realmente» sobre una recta o sobre una parábola? ¿Y qué significa siquiera decir que la piedra se mueve «en el espacio»?

La respuesta, dice Einstein, es evidente después de lo que hicimos la última vez, y he aquí por qué. La palabra «espacio», si somos sinceros, es una palabra oscura a la que no podemos asociar ninguna

idea definida en absoluto, así que la dejamos de lado por completo. En su lugar ponemos «movimiento respecto a un cuerpo de referencia prácticamente rígido». Y los lugares respecto a un cuerpo de referencia son exactamente lo que definió la sección anterior, por coincidencia con un punto del cuerpo o por tres perpendiculares medidas. Para la piedra hay dos cuerpos de referencia disponibles: el vagón del tren y el suelo. Respecto al vagón, la piedra pasa por una sucesión de lugares que están uno debajo de otro, sobre una recta. Respecto al suelo, pasa por lugares que están sobre una parábola.

Como el sistema de coordenadas, las tres paredes rígidas, es la forma matemáticamente útil de un cuerpo de referencia, Einstein lo dice así: la piedra describe una recta respecto a un sistema de coordenadas rígidamente unido al vagón, y una parábola respecto a un sistema de coordenadas rígidamente unido al suelo. Ninguna de las descripciones es la real mientras la otra es una ilusión. Digámoslo dos veces, porque toda la relatividad crece de esta semilla: no existe una trayectoria en sí. Solo hay una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado. Quite el cuerpo de referencia de la frase y la frase no dice nada.

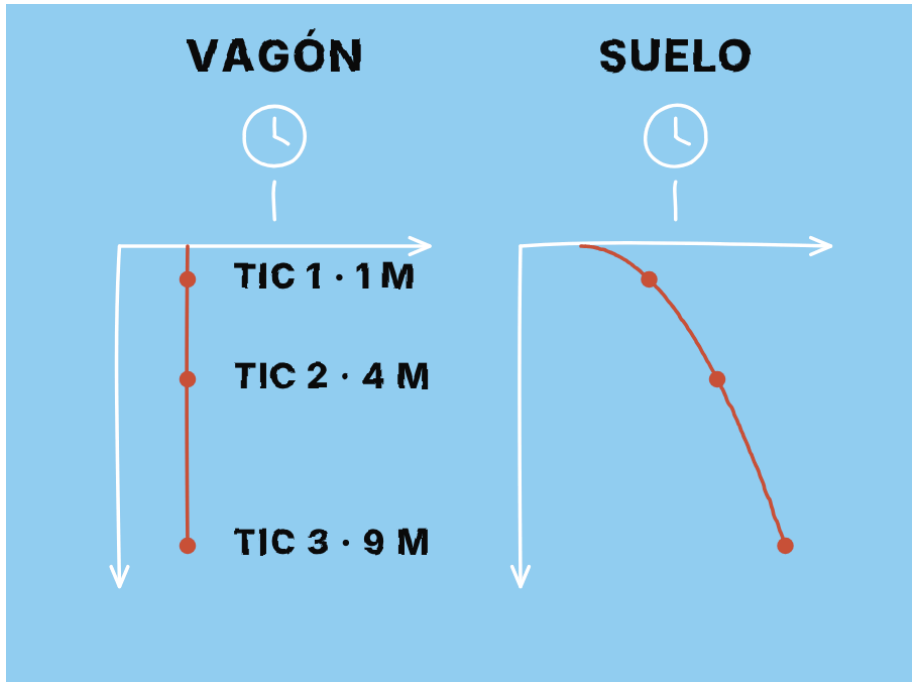
Pruébelo

La próxima vez que viaje de pasajero en un coche por una carretera recta y lisa, deje caer una moneda de la mano a su regazo. Cae en línea recta y aterriza en su regazo, no detrás de usted. Ahora imagínese de pie en la acera mirando la moneda a través de la ventanilla: avanza con el coche todo el tiempo que cae, trazando un arco suave. Los dos tienen razón; simplemente han elegido cuerpos rígidos distintos, el coche o la carretera, a los que referir los lugares de la moneda.

Un receptor de satélites vive por esta regla. Informa de su movimiento respecto a la superficie de la Tierra, el cuerpo de referencia que a usted le importa, y un pasajero que lo mira en un tren ve una velocidad de cien kilómetros por hora mientras está perfectamente quieto respecto al vagón. Ningún número es erróneo; cada uno pertenece a su propio cuerpo de referencia, y el receptor ha elegido uno calladamente.

Pero una trayectoria, incluso con su cuerpo de referencia nombrado, todavía no es una descripción del movimiento. Una descripción completa debe decir cómo el cuerpo cambia su lugar con el tiempo; para cada punto de la trayectoria debemos indicar en qué instante está allí el cuerpo. Y esos instantes, insiste Einstein, deben definirse de modo que cuenten como magnitudes observables en principio, resultados de mediciones, no números sacados del aire. Situado en el terreno de la mecánica clásica, cumple el requisito así. Imagine dos relojes, hechos exactamente iguales; la persona de la ventanilla del vagón tiene uno, el caminante del sendero tiene el otro. Cada uno anota en qué punto de su propio cuerpo de referencia está la piedra en

el momento en que su propio reloj hace tic. Tic, la piedra está aquí; tic, está allá; y una lista de lugares emparejados con tics es una descripción completa del movimiento, respecto a ese cuerpo de referencia y a ese reloj.



Lugares emparejados con tics

Imagine las dos listas una junto a otra. La lista del pasajero dice: tic uno, un metro por debajo de la mano; tic dos, cuatro metros por debajo; tic tres, nueve metros por debajo, siempre sobre la misma vertical. La lista del caminante tiene las mismas alturas, pero cada lugar está además un poco más adelante a lo largo de la vía que el anterior, así que unidos forman la parábola. La misma piedra, los mismos tics, dos cuerpos de referencia, dos listas.

Einstein cierra la sección con dos advertencias discretas, y las deja para más adelante. Al emparejar un tic con un lugar hemos ignorado la inexactitud que se cuela porque la luz viaja a velocidad finita: el caminante ve la piedra donde estaba hace un instante, no donde está. Una segunda dificultad acecha aquí también, y promete tratar ambas con detalle. No son pequeñas; los relojes de los satélites que alimentan su receptor, moviéndose a miles de metros por segundo muy por encima del suelo, se desviarían kilómetros al día si se ignoraran esas dificultades, y el resto del libro es la historia de tomárselas en serio. Así que estas tres primeras secciones se detienen donde se detiene el propio argumento de Einstein: la geometría hecha física por los cuerpos rígidos, los lugares dados por varillas sobre un cuerpo de referencia, y el movimiento que existe solo respecto a un cuerpo de referencia y un reloj. Todo lo que sigue en el libro descansa sobre estos tres pisos.

VER LLEVA TIEMPO

DESTELLO



RECEPCIÓN



AHORA

Ver lleva tiempo

Para recordar

«Movimiento en el espacio» no significa nada hasta que sustituimos la oscura palabra «espacio» por un cuerpo de referencia prácticamente rígido, o su forma matemática, un sistema de coordenadas. La piedra soltada desde el tren cae sobre una recta respecto al vagón y sobre una parábola respecto al suelo, y ninguna trayectoria es más real que la otra. No hay trayectoria en sí, solo una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado. Una descripción completa del movimiento necesita también el instante en cada punto de la trayectoria, y los instantes deben ser magnitudes observables: aquí, los tics de un reloj en la mano del observador, emparejados con los lugares de la piedra en su propio cuerpo de referencia. Dos dificultades quedaron apartadas, la velocidad finita de la luz y una segunda aún sin nombre, y el resto del libro las retoma.

Preguntas

1. La piedra soltada desde la ventanilla del tren cae en línea recta para el pasajero y en parábola para el caminante. ¿Cuál es la trayectoria real?
 - a. La parábola, porque el suelo está en reposo y el tren se mueve
 - b. La recta, porque la piedra se soltó sin impulso
 - c. Ninguna: una trayectoria existe solo respecto a un cuerpo de referencia elegido

2. ¿Por qué deja Einstein de lado la palabra «espacio» y habla en cambio de movimiento respecto a un cuerpo de referencia prácticamente rígido?
 - a. Porque a «espacio» no podemos asociar ninguna idea definida, mientras que los lugares respecto a un cuerpo rígido ya estaban definidos
 - b. Porque el espacio está curvado y no puede medirse con varillas rígidas
 - c. Porque los cuerpos rígidos son más fáciles de dibujar que el espacio vacío
 - d. Porque el tren y el suelo se mueven por el espacio a velocidades distintas
3. Una trayectoria con su cuerpo de referencia nombrado todavía no es una descripción completa del movimiento de la piedra. ¿Qué falta?
 - a. La masa de la piedra y la fuerza de la gravedad
 - b. El instante en que la piedra está en cada punto de la trayectoria, dado como magnitud medible
 - c. La velocidad del tren respecto al suelo
4. En la mecánica clásica, ¿cómo obtienen el pasajero y el caminante los instantes para su descripción de la piedra que cae?
 - a. Acuerdan un único reloj maestro colocado en el terraplén
 - b. Calculan el instante a partir de la altura que ha caído la piedra
 - c. Cada uno tiene uno de dos relojes idénticos y anota dónde está la piedra en su propio cuerpo de referencia en cada tic

d. Cada uno mide cuánto tarda en llegarle la luz de la piedra

Respuestas

1. c) No hay trayectoria en sí; la piedra describe una recta respecto a un sistema de coordenadas unido al vagón y una parábola respecto a uno unido al suelo, y ninguna descripción es una ilusión.

2. a) La palabra espacio es una palabra oscura a la que, si somos sinceros, no podemos asociar ninguna idea definida; los lugares respecto a un cuerpo de referencia, en cambio, son exactamente lo que definió la sección anterior.

3. b) Una descripción completa debe decir cómo el cuerpo cambia su lugar con el tiempo, así que para cada punto de la trayectoria debemos indicar cuándo está allí el cuerpo, y esos instantes deben ser magnitudes observables, resultados de mediciones.

4. c) Dos relojes hechos exactamente iguales, uno en la ventanilla del vagón y otro en el sendero; cada observador anota en qué punto de su propio cuerpo de referencia está la piedra en el momento en que su propio reloj hace tic.

Ejercicios

1. Un pasajero de un tren que avanza suavemente suelta una piedra por la ventanilla. Describa con sus palabras la trayectoria de la piedra respecto al vagón y respecto al suelo, y explique por qué la pregunta «¿cuál trayectoria es la real?» no tiene respuesta.

Pista: Empiece por nombrar el cuerpo de referencia antes de describir cualquiera de las trayectorias.

Respuesta: Respecto a un sistema de coordenadas rígidamente unido al vagón la piedra cae sobre una recta vertical; respecto a uno unido al suelo avanza con el tren mientras cae y traza una parábola. No hay trayectoria en sí, solo una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia

determinado, así que preguntar cuál es la real es hacer una pregunta sin cuerpo de referencia, y esa pregunta no dice nada.

2. Suponga que el pasajero y el caminante anotan cada uno una lista de los lugares de la piedra en los tics de sus propios relojes. Diga qué tienen en común las dos listas y en qué difieren, y explique por qué esa lista, y no la trayectoria sola, cuenta como descripción completa del movimiento.

Pista: Piense en lo que cada tic añade a un punto de la trayectoria.

Respuesta: Ambas listas emparejan los mismos tics con el lugar de la piedra; los lugares del pasajero están uno debajo de otro sobre una recta vertical, los del caminante sobre una parábola, cada uno un poco más adelante a lo largo de la vía. La trayectoria sola dice por dónde pasó la piedra pero no cuándo; la lista da el instante en cada punto, y como los instantes vienen de un reloj que el observador tiene en la mano, son magnitudes observables, que es lo que exige una descripción completa.

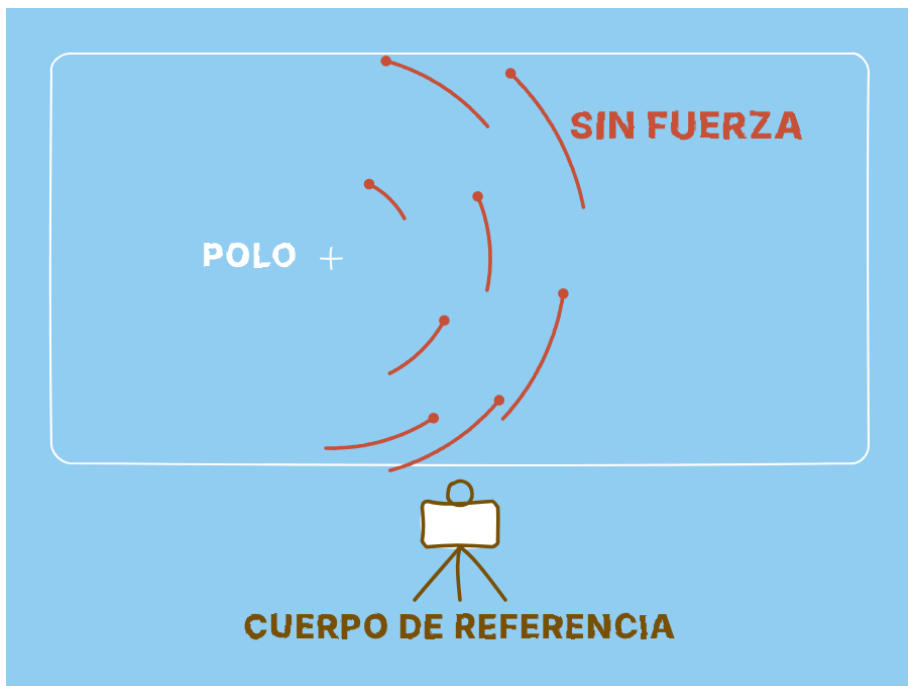
3. Einstein admite que emparejar un tic del reloj con el lugar de la piedra ignora una inexactitud. ¿Cuál es, y por qué se permite ignorarla aquí?

Pista: Pregúntese cómo sabe el caminante dónde está la piedra en el instante de un tic.

Respuesta: El caminante ve la piedra por una luz que tardó un tiempo finito en llegar, así que en el tic la piedra se ve donde estaba hace un instante, no donde está. Einstein lo deja de lado porque por ahora se sitúa en el terreno de la mecánica clásica, y promete tratarlo, junto con una segunda dificultad, con detalle más adelante en el libro.

¿Qué cuerpos de referencia están permitidos?

Ponga una cámara en un trípode una noche despejada, apúntela al cielo y deje el obturador abierto durante una hora. Cuando mire la foto, las estrellas no son puntos sino arcos, todos ellos trozos de círculos trazados alrededor de un solo punto del cielo. Nada empujaba esas estrellas; están tan lejos de todo que no les llega ninguna atracción digna de mención. Y sin embargo, respecto a la cámara, al trípode y al suelo en que se apoyan, cada una de ellas recorrió una curva. Tenga presente esa fotografía, porque Einstein usa exactamente este hecho para decidir qué cuerpos de referencia puede usar la física.

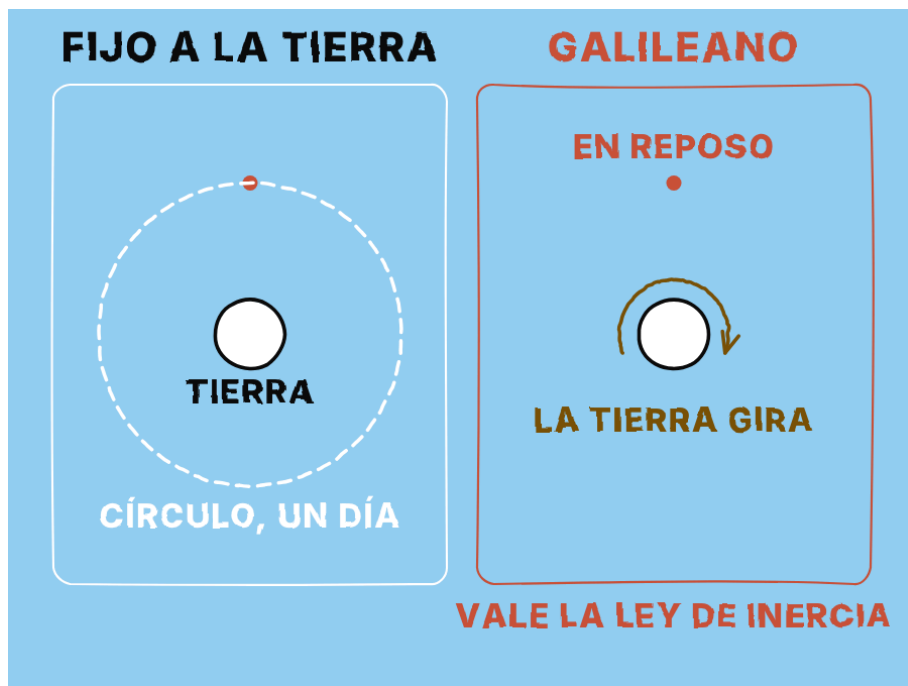


Trazas de estrellas sobre la cámara

Empieza por la ley de inercia, la primera ley de la mecánica de Galileo y Newton: un cuerpo suficientemente alejado de todos los demás permanece en reposo o sigue moviéndose uniformemente en línea recta. Dicha así, suena como una afirmación solo sobre cuerpos. Einstein señala que es igualmente una afirmación sobre cuerpos de referencia, los sistemas de coordenadas que la mecánica puede usar cuando describe el movimiento. Después de la piedra del tren sabemos por qué: una trayectoria solo es una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia, así que «se mueve en línea recta» está vacío hasta que se nombra el cuerpo.

Ahora juntemos las dos cosas. Las estrellas fijas visibles son cuerpos a los que la ley de inercia debería aplicarse con gran exactitud; están tan

lejos de todo como cualquier cuerpo que podamos ver. Tome un sistema de coordenadas rígidamente unido a la Tierra, las tres paredes de la parte anterior, fijadas al suelo. Respecto a ese sistema, cada estrella fija describe, en el curso de un día astronómico, un círculo de radio enorme. Esa es su fotografía, y contradice el enunciado de la ley de inercia, que prometía una línea recta o el reposo.



Fijo a la Tierra frente a galileano

Así que una de las dos cosas tiene que ceder. Si nos aferramos a la ley, dice Einstein, podemos referir los movimientos solo a sistemas de coordenadas respecto a los cuales las estrellas fijas no se mueven en círculos. A un sistema de coordenadas cuyo estado de movimiento es tal que la ley de inercia vale respecto a él, lo llama sistema de

coordenadas galileano. Solo para un sistema de coordenadas galileano pretenden ser válidas las leyes de la mecánica de Galileo y Newton. La Tierra, que gira una vez al día, no es del todo uno; un sistema que mantiene sus direcciones fijas en las estrellas lejanas sí lo es.

Esto no es una curiosidad histórica. Los satélites que alimentan el receptor de su teléfono se siguen y se predicen exactamente en un sistema así, con ejes que apuntan a las estrellas fijas y no giran con la Tierra, porque solo ahí las ecuaciones del movimiento toman su forma simple. El receptor convierte luego el resultado en un lugar sobre la Tierra que gira, para usted. La primera elección que hace todo ingeniero de navegación es la elección de Einstein en esta sección: elegir primero un sistema de coordenadas galileano, y describir el movimiento después.

Aquí las cuatro primeras secciones del libro llegan a un alto. La geometría se hizo física mediante los cuerpos rígidos; los lugares se hicieron tres números sobre un cuerpo de referencia; el movimiento se hizo una trayectoria respecto a tal cuerpo y un reloj; y ahora los propios cuerpos de referencia han quedado clasificados, con los galileanos admitidos y los demás, por el momento, apartados. Ese «por el momento» es el gozne sobre el que gira el resto del libro.

Para recordar

La ley de inercia dice que un cuerpo alejado de todos los demás permanece en reposo o se mueve uniformemente en línea recta, y es una afirmación sobre cuerpos de referencia tanto como sobre cuerpos. Respecto a un sistema de coordenadas fijo a la Tierra, las estrellas fijas describen círculos enormes una vez al día, lo que contradice la ley tal como está enunciada; una fotografía de larga exposición lo muestra. Para conservar la ley, los movimientos se refieren solo a sistemas de coordenadas en los que las estrellas fijas no giran: sistemas de coordenadas galileanos, definidos como aquellos en los que vale la ley de inercia. Las leyes de la mecánica de Galileo y Newton pretenden validez solo para sistemas de coordenadas galileanos, y la navegación por satélite calcula las órbitas en un sistema así antes de traducirlas a la Tierra que gira.

Preguntas

1. Una cámara dejada abierta durante una hora muestra las estrellas como arcos de círculos. ¿Qué saca de esto la lección?
 - a. Que alguna fuerza empuja las estrellas por caminos curvos
 - b. Que respecto a un sistema de coordenadas fijo a la Tierra las estrellas fijas se mueven en círculos, contra el enunciado de la ley de inercia
 - c. Que la ley de inercia no vale para las estrellas

2. ¿Por qué dice Einstein que la ley de inercia es una afirmación sobre cuerpos de referencia tanto como sobre cuerpos?
 - a. Porque los cuerpos de referencia están ellos mismos lejos de todos los demás cuerpos
 - b. Porque una línea recta o el reposo solo lo son respecto a un cuerpo de referencia nombrado
 - c. Porque la ley se encontró primero observando las estrellas fijas
 - d. Porque solo los cuerpos rígidos pueden servir de cuerpos de referencia
3. ¿Qué es un sistema de coordenadas galileano?
 - a. Un sistema de coordenadas rígidamente unido a la Tierra
 - b. Un sistema de coordenadas cuyo estado de movimiento es tal que la ley de inercia vale respecto a él
 - c. Cualquier sistema de coordenadas hecho de tres paredes perpendiculares entre sí
 - d. Un sistema de coordenadas que se mueve con las estrellas fijas a su velocidad
4. ¿Por qué los satélites detrás de un receptor de navegación se siguen en un sistema cuyos ejes apuntan a las estrellas fijas?
 - a. Porque el receptor no puede trabajar con coordenadas fijas a la Tierra
 - b. Porque solo en un sistema de coordenadas galileano las leyes de la mecánica toman su forma simple
 - c. Porque las estrellas hacen falta para medir las distancias a los satélites

Respuestas

1. **b)** Las estrellas fijas son cuerpos a los que la ley de inercia debería aplicarse con gran exactitud, y sin embargo respecto a un sistema fijo a la Tierra cada una describe un círculo de radio enorme en un día, lo que contradice la ley tal como está enunciada.
2. **b)** Una trayectoria solo es una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia, así que lo que la ley dice sobre moverse en línea recta está vacío hasta que se nombra el sistema de coordenadas.
3. **b)** Einstein llama galileano a un sistema de coordenadas cuando su estado de movimiento es tal que la ley de inercia vale respecto a él; las estrellas fijas no giran en tal sistema.
4. **b)** Las leyes de la mecánica de Galileo y Newton pretenden validez solo para un sistema de coordenadas galileano, así que las órbitas se calculan en uno y se convierten después a la Tierra que gira.

Ejercicios

1. Explique con sus propias palabras por qué un sistema de coordenadas rígidamente unido a la Tierra no es un sistema de coordenadas galileano, usando las estrellas fijas.

Pista: Pregúntese qué trayectoria describe una estrella fija respecto al suelo en un día, y qué dice la ley de inercia que debería hacer.

Respuesta: Una estrella fija está lejos de todos los demás cuerpos, así que por la ley de inercia debería estar en reposo o moverse uniformemente en línea recta. Respecto a un sistema unido a la Tierra describe en cambio un círculo de radio enorme una vez al día. La ley no vale respecto a ese sistema, así que el sistema no es galileano.

2. Einstein conserva la ley de inercia y renuncia a algunos cuerpos de referencia. Enuncie la regla para describir el movimiento a la que esto

lleva y nombre la clase de sistema de coordenadas que resulta.

Pista: ¿Qué no deben hacer las estrellas fijas respecto a un sistema permitido?

Respuesta: Los movimientos pueden referirse solo a sistemas de coordenadas respecto a los cuales las estrellas fijas no se mueven en círculos. Un sistema de coordenadas en cuyo estado de movimiento vale la ley de inercia es un sistema de coordenadas galileano, y las leyes de la mecánica de Galileo y Newton pretenden validez solo para tales sistemas.

3. Un amigo dice que la ley de inercia es sencillamente falsa, puesto que las estrellas se mueven claramente en círculos cada noche.

Respóndale con las ideas de esta parte.

Pista: Separe la afirmación sobre cuerpos de la afirmación sobre cuerpos de referencia.

Respuesta: Los círculos son las trayectorias de las estrellas respecto a la Tierra que gira, y una trayectoria existe solo respecto a un cuerpo de referencia. La ley de inercia pretende validez solo para sistemas de coordenadas galileanos, en los que las estrellas fijas no giran; el sistema fijo a la Tierra no es uno de ellos, así que el cielo nocturno contradice la elección del cuerpo de referencia, no la ley.