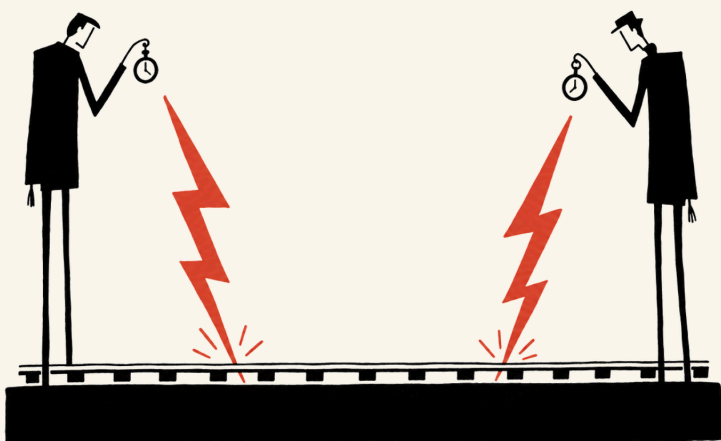


Sobre la teoría de la relatividad especial y general



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

¿Es verdadero el teorema de Pitágoras?

¿Dónde está la nube?

Una piedra, dos trayectorias

¿Qué cuerpos de referencia están permitidos?

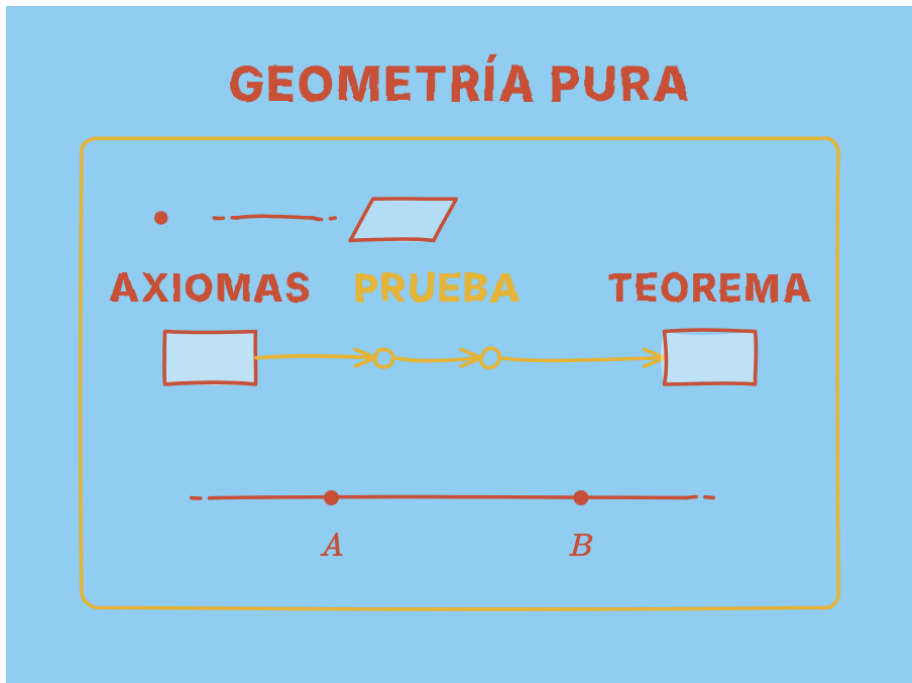
¿Es verdadero el teorema de Pitágoras?

Tome una hoja de papel cuadriculado y una regla. Dibuje un ángulo recto en una esquina, mida tres centímetros a lo largo de un lado y cuatro a lo largo del otro, y una los dos extremos con una línea recta. Ahora mida esa línea inclinada. Antes de mirar, ya sabe lo que dirá la regla: cinco centímetros, porque en la escuela aprendió que el cuadrado sobre el lado largo de un triángulo rectángulo es igual a los dos cuadrados sobre los lados cortos, y nueve más dieciséis son veinticinco, cuya raíz cuadrada es cinco. La regla está de acuerdo, salvo el grosor de una línea de lápiz. Entonces, ¿tenía razón Pitágoras, y es verdadero su teorema?

Albert Einstein empieza su pequeño libro sobre la relatividad precisamente con esta pregunta, y la hace con una sonrisa. La mayoría de nosotros, dice, conocimos la geometría de Euclides de niños y la recordamos con más respeto que cariño, después de que profesores concienzudos nos hicieran subir sus altas escaleras. Por lealtad a aquella escuela despreciaríamos a cualquiera que dudase del más humilde de sus teoremas. Y sin embargo nuestra orgullosa seguridad podría desvanecerse en el momento en que alguien preguntara qué queremos decir al afirmar que un teorema es verdadero.

Piense en cómo está construida la geometría. Parte de unas pocas ideas básicas, como punto, recta y plano, que imaginamos con mayor o menor claridad, y de unas pocas afirmaciones simples sobre ellas, los axiomas, que aceptamos porque esas imágenes los hacen parecer evidentes. Todo lo demás se deduce de los axiomas por pasos lógicos, y esa deducción es lo que llamamos una demostración. Así que,

dentro de la geometría, un teorema es verdadero cuando se ha deducido correctamente de los axiomas, y eso es todo lo que «verdadero» puede significar allí. Todo el peso de la verdad recae entonces sobre los axiomas, y aquí Einstein hace su primera observación sorprendente: la pregunta de si un axioma es verdadero no puede responderla la geometría, y de hecho no tiene ningún sentido.

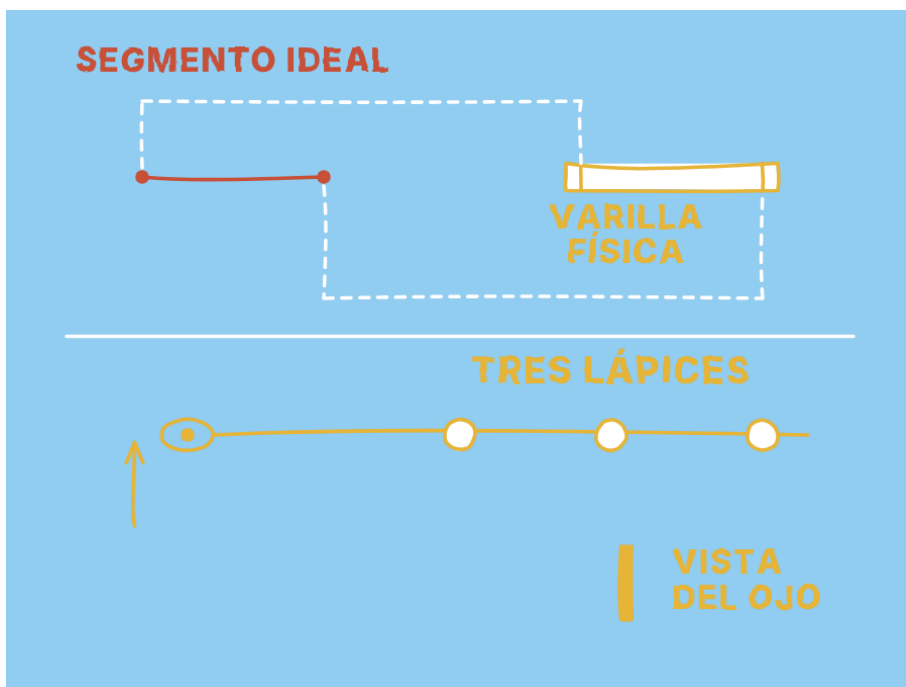


Lo que establece una demostración

Intente preguntar si es verdad que por dos puntos pasa una sola recta. No puede, porque la geometría euclidiana simplemente trata de ciertos objetos que llama rectas y les da, por definición, la propiedad de quedar fijados por dos de sus puntos. La palabra «verdadero», observa Einstein, significa siempre, en el fondo, concordancia con

alguna cosa real. La geometría pura no dice nada sobre cosas reales; trata solo de cómo sus propias ideas encajan lógicamente entre sí. Así que la palabra no encaja.

¿Por qué, entonces, estamos tan seguros de que los teoremas son verdaderos? Porque las ideas de la geometría nacieron de objetos de la naturaleza, que les corresponden con mayor o menor exactitud. La geometría puede mantenerse apartada de esos objetos para conservar su lógica intacta, pero la costumbre de ver un segmento como dos marcas sobre un cuerpo prácticamente rígido, una regla o una varilla, está muy arraigada en nuestro pensamiento. También consideramos que tres lugares están en línea recta cuando, mirando con un solo ojo desde el punto adecuado, podemos hacer que parezcan coincidir, uno ocultando a los otros.



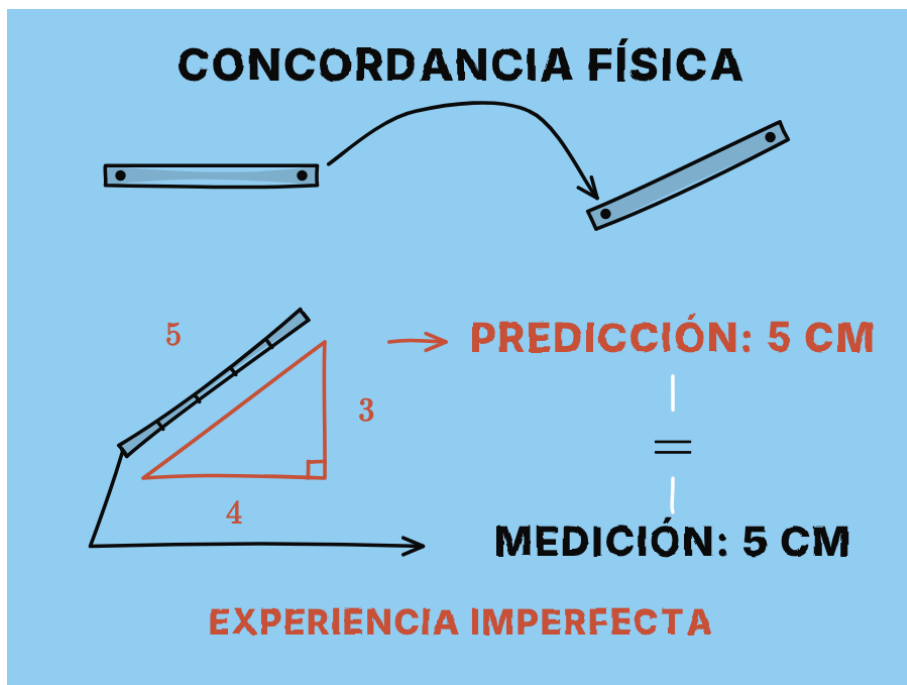
La rectitud probada con la vista

Pruébelo

Ponga tres lápices de pie en bolitas de plastilina, más o menos en fila, y cierre un ojo. Mueva la cabeza hasta que el lápiz más cercano oculte a los otros dos, de modo que los tres se fundan en una sola silueta estrecha. Esa es una prueba física de rectitud, hecha con un ojo y objetos reales, y es lo que usted realmente quiere decir cuando llama alineadas a tres cosas.

Ahora viene el paso decisivo, y es una sola frase añadida. A los teoremas de Euclides añadimos la afirmación de que a dos puntos de un cuerpo prácticamente rígido les corresponde siempre el mismo

segmento, la misma distancia, por mucho que movamos el cuerpo. Nada en la geometría pura dice eso; es una afirmación sobre reglas y varillas y sobre cómo se comporta la materia real. Una vez añadida, los teoremas de la geometría se convierten en afirmaciones sobre la posible disposición de cuerpos prácticamente rígidos, y la geometría así completada es una rama de la física. Ahora sí podemos preguntar con razón si los teoremas son verdaderos, porque ahora podemos preguntar si se cumplen para las cosas reales, las marcas, los bordes y las varillas, que hemos asignado a las ideas geométricas. Con cierta inexactitud, dice Einstein, la verdad de un teorema geométrico en este sentido significa que se cumple en una construcción con compás y regla.



La geometría se vuelve una prueba física

Eso es lo que hizo usted en el papel cuadriculado. El teorema era verdadero en el sentido físico porque la regla, un cuerpo prácticamente rígido, coincidió con la predicción. Lo mismo ocurre, a gran escala, cada vez que su teléfono encuentra su posición: el receptor convierte las distancias medidas a varios satélites en un lugar del mapa mediante geometría corriente, y el método cuenta como verdadero porque el lugar que da coincide con donde usted está realmente. La geometría se gana su verdad física como cualquier afirmación física: comprobándose contra el mundo.

Einstein añade una advertencia, y es el hilo que recorre todo el libro. Nuestra convicción de que la geometría es verdadera en este sentido descansa en nada más que una experiencia bastante imperfecta; una regla nunca es perfectamente rígida, un ojo nunca perfectamente recto. Por ahora, dice, daremos esa verdad por supuesta, y en la última parte del libro, cuando lleguemos a la teoría de la relatividad general, veremos que tiene límites, y dónde están.

Para recordar

Dentro de la geometría pura un teorema es verdadero solo porque se sigue de los axiomas, y si los axiomas son verdaderos es una pregunta sin sentido allí. Los teoremas parecen verdaderos porque las ideas de la geometría 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. Entonces un teorema es verdadero cuando los cuerpos reales concuerdan con él, en una construcción con compás y regla, en papel cuadriculado con una regla o en un receptor de satélites. 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. Dibuja un triángulo rectángulo de tres por cuatro y la regla muestra que el lado largo mide cinco centímetros. ¿En qué sentido se ha mostrado verdadero el teorema?
 - a. En el sentido de la geometría pura, porque la medición confirma los axiomas
 - b. En el sentido físico, porque un cuerpo prácticamente rígido coincidió con la predicción

- c. En ningún sentido, porque una regla nunca es perfectamente rígida
2. ¿Por qué dice Einstein que la pregunta de si un axioma es verdadero no tiene sentido?
- a. Porque los axiomas se eligen por convención entre los matemáticos
 - b. Porque «verdadero» significa concordancia con una cosa real, y la geometría pura no dice nada sobre cosas reales
 - c. Porque nadie ha encontrado todavía la manera de demostrar un axioma
 - d. Porque los axiomas son demasiado evidentes para cuestionarlos
3. ¿Qué consigue la única afirmación añadida sobre los cuerpos prácticamente rígidos?
- a. Convierte los teoremas de la geometría en afirmaciones sobre varillas y reglas reales, y la geometría pasa a ser una rama de la física
 - b. Demuestra los axiomas de Euclides a partir de la experiencia
 - c. Muestra que la geometría es independiente de toda experiencia
 - d. Sustituye los axiomas por mediciones
4. ¿Por qué la verdad física de la geometría se acepta solo por ahora, según la lección?
- a. Porque las construcciones con compás y regla nunca se terminan
 - b. Porque el receptor de satélites a veces da una posición equivocada

- c. Porque descansa en una experiencia bastante imperfecta, y la teoría de la relatividad general mostrará sus límites

Respuestas

1. **b)** El teorema era verdadero en el sentido físico porque la regla, un cuerpo prácticamente rígido, coincidió con la predicción; dentro de la geometría pura ninguna medición tiene que ver con un teorema.
2. **b)** La palabra verdadero significa siempre, en el fondo, concordancia con alguna cosa real, y la geometría pura trata solo de cómo sus propias ideas encajan lógicamente, así que la palabra no encaja.
3. **a)** Añada que dos puntos de un cuerpo prácticamente rígido conservan el mismo segmento por mucho que se mueva el cuerpo, y los teoremas se convierten en afirmaciones sobre la posible disposición de tales cuerpos; la geometría así completada es una rama de la física.
4. **c)** Nuestra convicción descansa en nada más que una experiencia bastante imperfecta; Einstein da esa verdad por supuesta por ahora y muestra en la última parte del libro que tiene límites, y dónde están.

Ejercicios

1. Un amigo dice: «Pitágoras es verdadero, lo comprobé con una regla». Explique en qué sentido de la palabra verdadero tiene razón su amigo y en qué sentido no ha comprobado nada.

Pista: Separe el teorema como afirmación deducida de axiomas del teorema como afirmación sobre una regla y una hoja de papel.

Respuesta: En el sentido físico su amigo tiene razón: una vez añadido que una regla es un cuerpo prácticamente rígido cuyas marcas conservan su distancia, el teorema es una afirmación sobre segmentos reales, y la regla coincidió con él. En el sentido de la geometría pura no ha

comprobado nada, porque allí un teorema es verdadero solo por deducirse de los axiomas, y ninguna medición tiene que ver con eso.

2. ¿Por qué dice Einstein que ni siquiera podemos preguntar si por dos puntos pasa una sola recta, mientras que sí podemos preguntar si una diagonal medida coincide con la calculada?

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

Respuesta: La primera afirmación pertenece a la geometría pura, que trata de objetos que llama rectas y les da esa propiedad por definición; preguntar si es verdadera sería pedir concordancia con una cosa real, y la geometría pura no trata de cosas reales. La segunda pregunta es sobre marcas en una regla rígida y una hoja de papel, cosas reales asignadas a las ideas geométricas, así que la concordancia o discordancia con ellas tiene sentido.

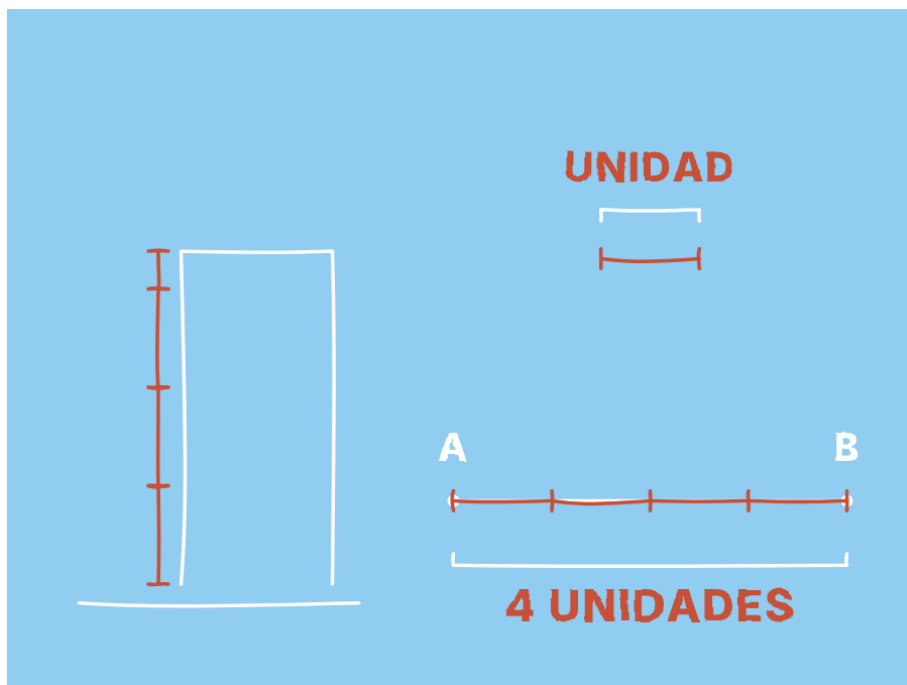
3. Einstein dice que nuestra convicción de que la geometría se cumple en los cuerpos reales descansa en una experiencia bastante imperfecta. Dé dos razones por las que la experiencia es imperfecta, con los ejemplos de esta parte, y diga qué promete Einstein al respecto.

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

Respuesta: Una regla 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 dar por supuesta 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.

¿Dónde está la nube?

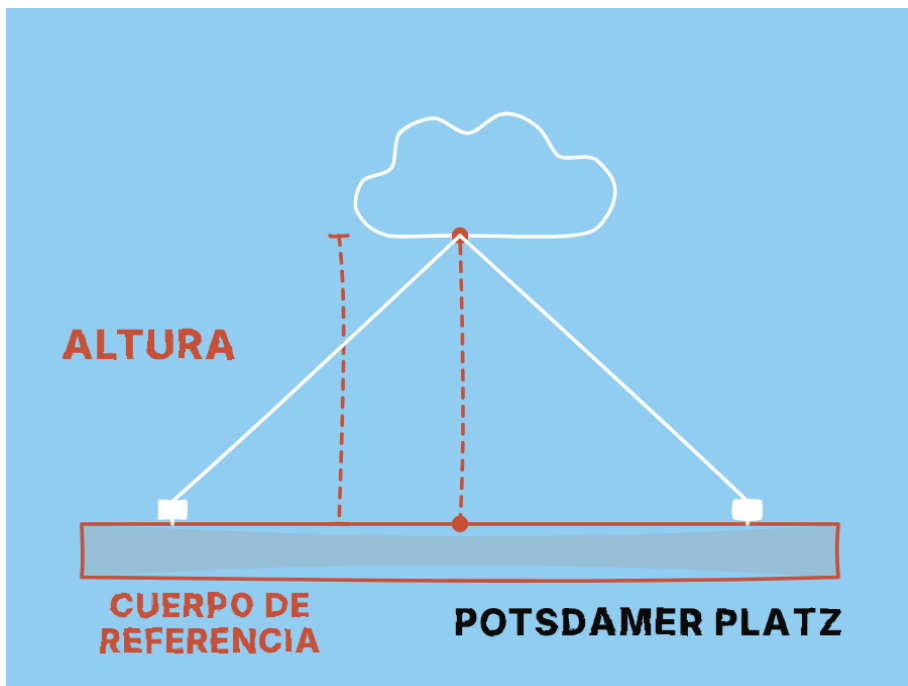
Mida la altura de una puerta con una regla corta de madera. Apóyela en el suelo contra el marco, marque con el pulgar dónde termina, levántela, apóyela en la marca y cuente: una, dos, tres reglas y un poco más. Nadie le enseñó esto; es simplemente lo que es medir. Ahora mire hacia arriba: una nube pasa sobre la casa. ¿Cómo mediría dónde está la nube, con esa misma regla? Einstein usa exactamente esta pregunta para mostrar lo que hacemos en realidad cada vez que decimos dónde está algo.



Longitud por unidades repetidas

Primero la regla. La última vez acordamos que un segmento son dos marcas sobre un cuerpo prácticamente rígido; ahora tome uno de esos segmentos, una varilla pequeña, y comprométase a usarla de una vez por todas como unidad de medida. Para medir la distancia entre dos puntos de un cuerpo rígido, construya la recta que los une, como enseña la geometría, y lleve la varilla unidad a lo largo de ella desde el primer punto, una y otra vez, hasta llegar al segundo. El número de veces que tuvo que colocarla es la medida de esa distancia. Toda cinta métrica, toda cadena de agrimensor y todo telémetro láser se reducen, al final, a este recuento de una unidad repetida.

Ahora la pregunta del dónde. Toda indicación de dónde está un suceso o una cosa, dice Einstein, nombra el punto de algún cuerpo rígido con el que el suceso coincide. Ese cuerpo rígido es el cuerpo de referencia, y así funciona el habla cotidiana tanto como la ciencia. Diga «en Berlín, en la Potsdamer Platz». La superficie de la Tierra es el cuerpo rígido al que se hace referencia, la Potsdamer Platz es un punto marcado sobre ella con un nombre, y el suceso está en ese punto.



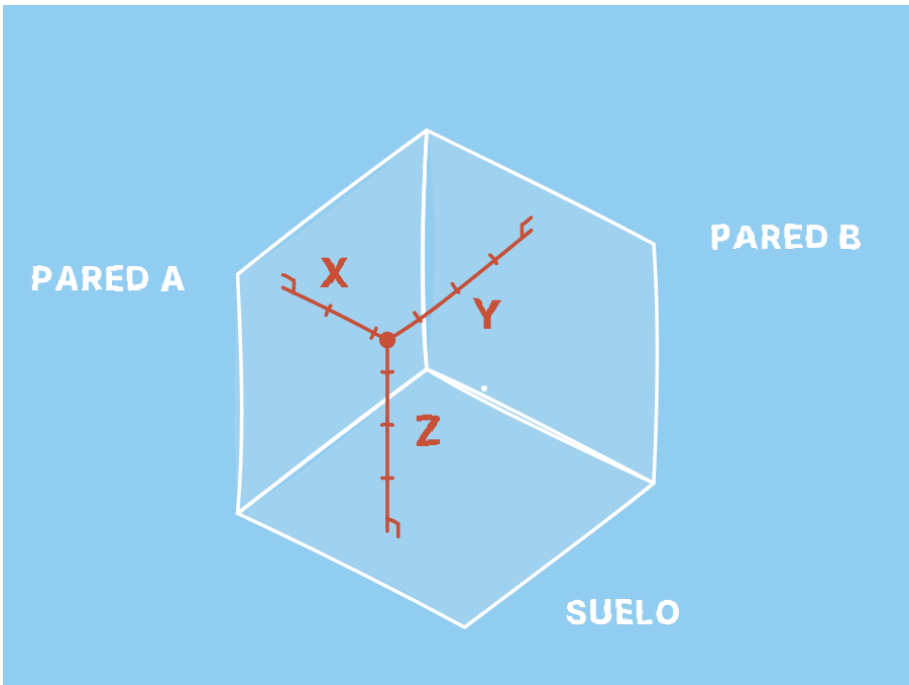
Prolongar el cuerpo de referencia

Esta manera primitiva de indicar un lugar tiene dos límites. Conoce solo lugares en la superficie de un cuerpo rígido, y necesita que esa superficie tenga puntos distinguibles con nombre. Aquí es donde entra la nube. Para decir dónde está, imagine un poste levantado en la plaza, vertical, lo bastante alto para tocar la nube. La longitud del poste, medida con la varilla unidad, junto con el lugar del pie del poste, dice por completo dónde está la nube. Nada de la indicación ha cambiado de naturaleza: sigue nombrando un punto de un cuerpo rígido con el que la nube coincide, solo que el cuerpo rígido se ha prolongado hacia arriba con el poste.

En ese poste se esconden tres refinamientos, y Einstein los saca uno a uno. El cuerpo rígido de referencia se ha prolongado hasta alcanzar la

cosa que se quiere localizar. Un número, la longitud medida del poste, ha sustituido a un punto de referencia con nombre. Y hablamos de la altura de la nube incluso cuando no se ha construido poste alguno: se fotografía la nube desde varios lugares 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 de que conviene, al describir lugares, liberarse de los puntos de referencia con nombre usando números medidos. La física que mide lo hace con el sistema de coordenadas cartesiano, llamado así por Descartes. Imagine tres paredes planas rígidas, cada una en ángulo recto con las otras dos y 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 queda dado entonces por tres números, sus coordenadas: las longitudes de las tres perpendiculares trazadas desde el suceso hasta las tres paredes. Cada una se encuentra, en principio, colocando la varilla unidad a lo largo de la perpendicular, una construcción que sigue las reglas de la geometría euclidiana.



Tres distancias fijan un lugar

Pruébalo

Póngase en una esquina de su habitación y elija una lámpara o un gancho para cuadros. Diga a qué distancia está de una pared, a qué distancia de la otra y a qué altura sobre el suelo: tres distancias, tres recuentos con una regla, y su lugar queda fijado sin un solo punto de referencia. Mueva el objeto, y solo cambian los tres números; las paredes siguen siendo lo que eran.

En la práctica, admite Einstein, nadie construye las tres paredes, y las coordenadas casi nunca se encuentran con varillas; se encuentran de manera indirecta. Un receptor de satélites nunca apoya una varilla en

nada; mide cuánto tardaron en llegar las señales de varios satélites y calcula 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 ese tipo debe ser siempre el que acabamos de describir, varillas apoyadas sobre un cuerpo rígido, o si no, advierte, los resultados de la física y de la astronomía se disuelven en la vaguedad.

Así que aquí es adonde llega esta sección. Toda descripción espacial de sucesos usa un cuerpo rígido al que los sucesos se refieren. Y esa referencia supone que la geometría euclidiana vale para los segmentos, siendo un segmento 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. Decir dónde está algo significa nombrar el punto de un cuerpo rígido de referencia con el que coincide, como la Potsdamer Platz 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 que la mediría 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 de satélite, una indicación de lugar significa esto, y supone que la geometría euclidiana vale para los segmentos sobre cuerpos rígidos.

Preguntas

1. ¿En qué consiste realmente medir la distancia entre dos puntos de un cuerpo rígido?
 - a. En colocar la varilla unidad a lo largo de la recta entre ellos y contar cuántas veces cabe
 - b. En cronometrar una señal enviada de un punto al otro
 - c. En contar los puntos de referencia con nombre que hay entre los dos puntos

2. ¿Qué significa «en Berlín, en la Potsdamer Platz» una vez que lo miramos 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 con nombre de un cuerpo rígido, la superficie de la Tierra
 - d. Que podría levantarse un poste en la plaza para alcanzar el suceso
3. La altura de la nube se calcula a partir de fotografías tomadas en varios lugares del suelo. ¿Qué refinamiento de la idea de lugar es este?
 - 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
 - c. Se habla de una longitud aunque la varilla que la mediría nunca se construyó
 - d. La nube se trata como un punto de la superficie de la Tierra
4. ¿Por qué insiste Einstein en que incluso la posición de un receptor de satélites debe significar varillas apoyadas sobre un cuerpo rígido?
 - a. Porque las señales nunca son tan exactas como las varillas
 - b. Porque sin ese sentido los resultados de la física y de la astronomía se disuelven en la vaguedad
 - c. Porque las tres paredes rígidas siempre se construyen en la práctica

Respuestas

1. **a)** Se construye la recta que une los dos puntos y se lleva la varilla unidad a lo largo de ella desde el primero hasta llegar al segundo; el número de veces que se colocó es la medida de la distancia.
2. **c)** Toda indicación de dónde está algo nombra el punto de un cuerpo rígido de referencia con el que 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 se ha construido poste alguno: a partir de las fotografías y sabiendo cómo viaja la luz se calcula qué longitud tendría que tener el poste, así que el poste es imaginario pero su longitud se mide de todos modos.
4. **b)** Las coordenadas se encuentran de manera indirecta, como la altura de la nube a partir de fotografías, pero su sentido físico debe ser siempre 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 qué son sus tres coordenadas y cómo podría medirse cada una, en principio.

Pista: Piense en las paredes y el suelo como las tres paredes rígidas y pregúntese qué es una perpendicular trazada desde la lámpara hasta cada una.

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; las longitudes de esas tres perpendiculares son las coordenadas. Cada una se encuentra, en

principio, colocando la varilla unidad a lo largo de la perpendicular y contando, una construcción que sigue la geometría euclidiana.

2. Nombre los dos límites de la manera primitiva de indicar un lugar y explique cómo el poste en la Potsdamer Platz nos libera de cada uno sin cambiar lo que es una indicación de lugar.

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

Respuesta: 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. La indicación sigue nombrando un punto de un cuerpo rígido con el que la nube coincide, así que su naturaleza no cambia.

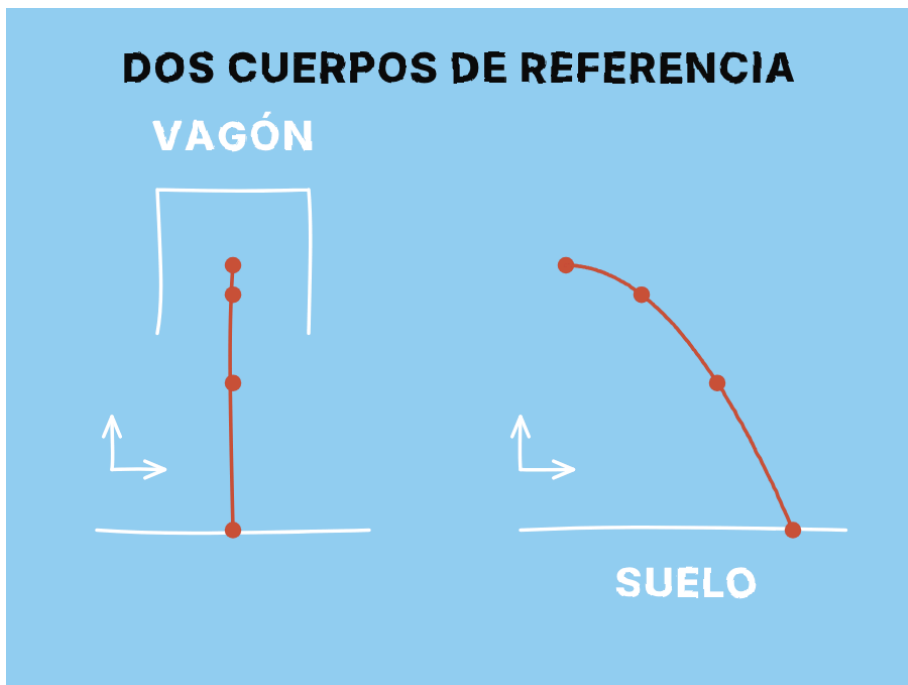
3. Un receptor de satélites calcula su posición a partir de los tiempos de llegada de las señales y nunca toca una varilla. ¿En qué sentido su respuesta sigue siendo una indicación de lugar del tipo descrito aquí, y qué supone sobre la geometría?

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 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.

Una piedra, dos trayectorias

Siéntese junto a la ventanilla de un tren que avanza suavemente por una vía recta a velocidad constante. Saque una piedra por la ventanilla y suéltela, sin ningún impulso. Ignorando el aire, la ve caer en línea recta hacia abajo, como si el tren estuviera parado, y aterrizar en el terraplén debajo de usted. Ahora un caminante en el sendero junto a la vía 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. Una piedra, dos testigos honrados, dos trayectorias distintas.



Una piedra, dos cuerpos de referencia

Einstein abre esta sección con una confesión. Si dijera, sin pensarlo más, que la mecánica tiene que describir cómo los cuerpos cambian su lugar en el espacio con el tiempo, cometería, en sus palabras, pecados mortales contra el santo espíritu de la claridad. Los pecados se esconden en dos palabras pequeñas, «lugar» y «espacio», y la piedra 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 decir que la piedra se mueve «en el espacio»?

Después de la última vez, dice Einstein, la respuesta es clara. La palabra «espacio», si somos sinceros, es una palabra oscura a la que no podemos asociar ninguna idea definida, así que la dejamos de lado. En su lugar decimos «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. Para la piedra hay dos cuerpos de referencia disponibles, el vagón y el suelo. Respecto al vagón, los lugares están uno debajo de otro, sobre una recta; respecto al suelo, están sobre una parábola.

Como el sistema de coordenadas, las tres paredes rígidas, es la forma matemática 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 uno rígidamente unido al suelo. Ninguna de las trayectorias 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 una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado. Quite el cuerpo de referencia de la frase y la frase no dice nada.

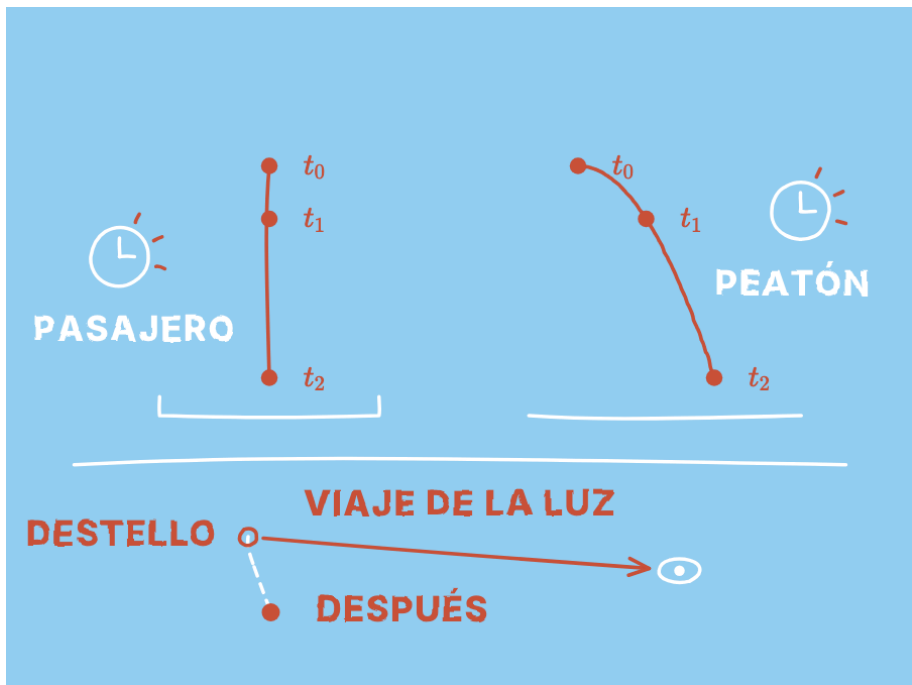
Pruébelo

La próxima vez que viaje en 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 imagine a alguien 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 referido los lugares de la moneda a cuerpos rígidos distintos, el coche o la carretera.

Un receptor de satélites vive por la misma regla. Informa de su movimiento respecto a la superficie de la Tierra, así que un pasajero que lo mira en un tren ve 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 por usted.

Una trayectoria con su cuerpo de referencia nombrado todavía no es una descripción completa del movimiento. Hay que decir también cómo el cuerpo cambia su lugar con el tiempo: para cada punto de la trayectoria, 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, lo hace así: dos relojes hechos exactamente iguales, uno en la mano del pasajero de la ventanilla, otro en la mano del caminante. 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.



Emparejar lugares con tics del reloj

Einstein cierra con dos advertencias discretas, que 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 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 este tramo del libro se detiene donde se detiene el 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.

Para recordar

«Movimiento en el espacio» no significa nada hasta que la oscura palabra «espacio» se sustituye 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 observables: 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 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 de referencia ya estaban definidos
 - b. Porque el espacio está curvado y no puede medirse con varillas rígidas
 - c. Porque el tren y el suelo se mueven por el espacio a velocidades distintas
 - d. Porque los cuerpos rígidos son más fáciles de dibujar que el espacio vacío
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, si somos sinceros, es una palabra oscura a la que no podemos asociar ninguna idea definida; los lugares respecto a un cuerpo de referencia son exactamente lo que definió la sección anterior.
3. **b)** Hay que decir también cómo el cuerpo cambia su lugar con el tiempo, para cada punto de la trayectoria en qué instante está allí, 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.

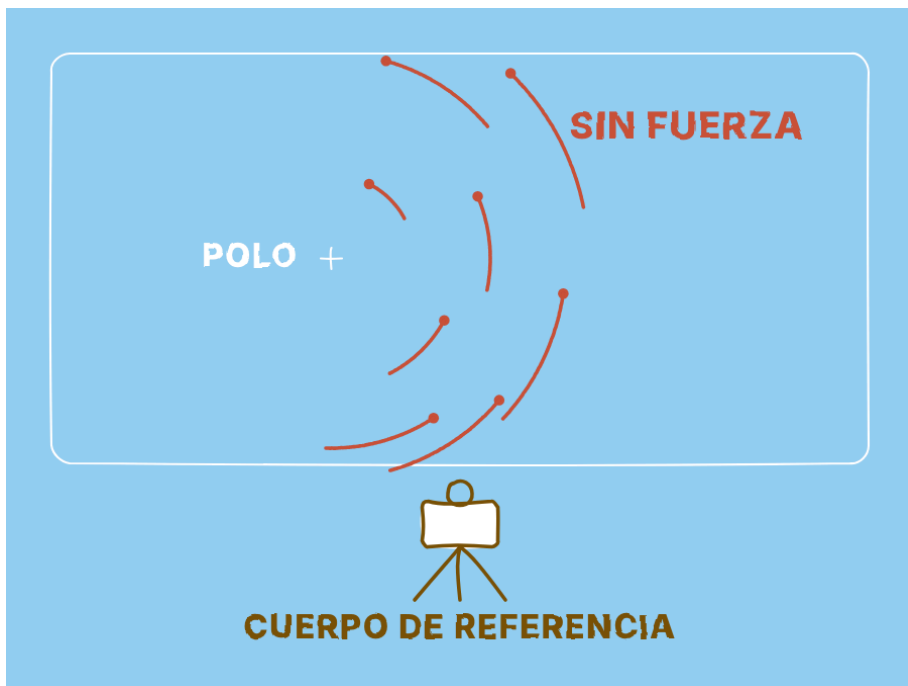
3. Einstein admite que emparejar un tic del reloj con el lugar de la piedra ignora una inexactitud. ¿Cuál es, y por qué se permite ignorarla aquí?

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. La foto muestra las estrellas no como puntos sino como arcos, 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 y al suelo en que se apoya, cada una de ellas se movió por una curva. Einstein usa exactamente esto para decidir qué cuerpos de referencia puede usar la física.

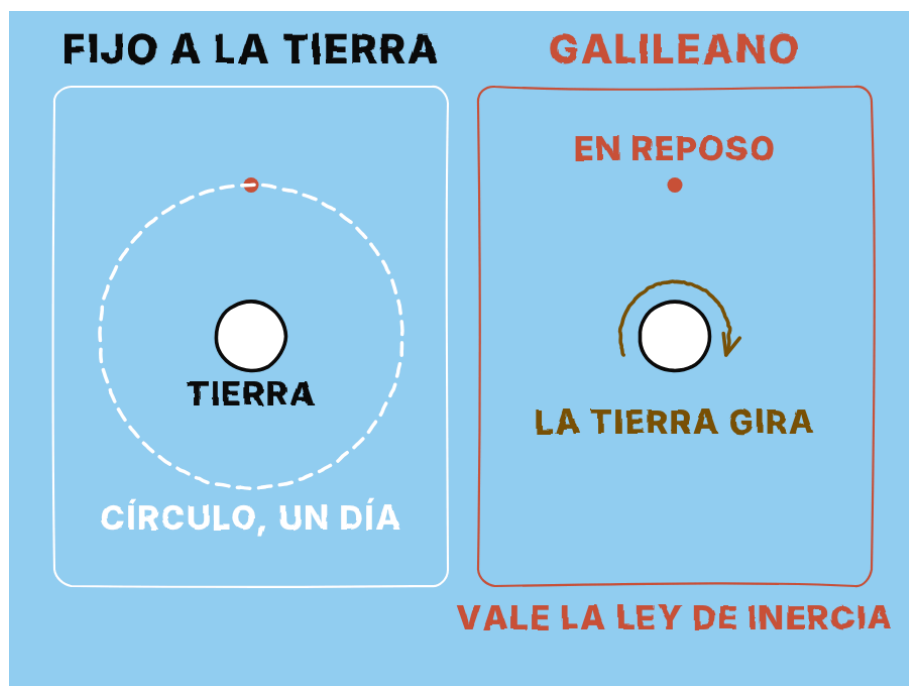


Trazas de estrellas sobre la cámara

Parte de 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. Suena como una afirmación sobre cuerpos, pero, dice Einstein, es igualmente una afirmación sobre cuerpos de referencia, los sistemas de coordenadas que la mecánica puede usar para describir 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» no dice nada hasta que se nombra el cuerpo.

Las estrellas fijas visibles son cuerpos a los que la ley de inercia debería aplicarse con gran exactitud, pues nada está más lejos de todo

lo demás. Tome un sistema de coordenadas rígidamente unido a la Tierra, las tres paredes fijadas al suelo. Respecto a él, cada estrella fija describe, en un día astronómico, un círculo de radio enorme: su fotografía. Eso contradice el enunciado de la ley, que prometía reposo o una línea recta.



Fijo a la Tierra frente a galileano

Así que una de las dos cosas tiene que ceder, y Einstein conserva la ley. Entonces los movimientos pueden referirse 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. Las leyes de la mecánica de Galileo y Newton pretenden ser válidas solo para un sistema de coordenadas galileano.

La Tierra que gira no es del todo uno; un sistema que mantiene sus direcciones fijas en las estrellas lejanas sí lo es.

Los satélites detrás del receptor de su teléfono se siguen exactamente en un sistema así, con ejes que apuntan a las estrellas fijas, porque solo ahí sus movimientos obedecen las leyes simples; el receptor convierte la respuesta en un lugar sobre la Tierra que gira después. Así las cuatro primeras secciones llegan a un alto: la geometría hecha física por los cuerpos rígidos, los lugares como tres números sobre un cuerpo de referencia, el movimiento como trayectoria respecto a tal cuerpo y un reloj, y ahora los propios cuerpos de referencia clasificados, los galileanos admitidos y los demás apartados por el momento. Ese «por el momento» es donde empieza el resto del libro.

Para recordar

La ley de inercia, según la cual un cuerpo alejado de todos los demás permanece en reposo o se mueve uniformemente en línea recta, es una afirmación sobre cuerpos de referencia tanto como sobre cuerpos. Respecto a un sistema de coordenadas fijo a la Tierra las estrellas fijas giran una vez al día, contra la ley tal como está enunciada. 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, aquellos en los que vale la ley de inercia. La mecánica de Galileo y Newton pretende validez solo para sistemas de coordenadas galileanos, y la navegación por satélite trabaja en uno antes de traducir 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 giran, contra el enunciado de la ley de inercia
 - c. Que la ley de inercia no vale para las estrellas
2. ¿Por qué es la ley de inercia 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 observando las estrellas fijas
 - d. Porque solo los cuerpos rígidos pueden ser 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 en ángulo recto
 - d. Un sistema de coordenadas que se mueve junto con las estrellas fijas

4. ¿Por qué los satélites de navegación se siguen en un sistema con ejes que apuntan a las estrellas fijas?
- a. Porque el receptor no puede usar coordenadas fijas a la Tierra
 - b. Porque solo en un sistema de coordenadas galileano los movimientos obedecen las leyes simples
 - c. Porque las estrellas hacen falta para medir las distancias a los satélites

Respuestas

- 1. b)** Respecto a un sistema unido a la Tierra cada estrella fija describe un círculo de radio enorme en un día, lo que contradice la promesa de la ley de reposo o línea recta.
- 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 no dice nada hasta que se nombra el cuerpo.
- 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 él.
- 4. b)** La mecánica de Galileo y Newton pretende 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 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 giran. Un sistema de coordenadas en el que vale la ley de inercia es un sistema de coordenadas galileano, y la mecánica de Galileo y Newton pretende validez solo para tales sistemas.

3. Un amigo dice que la ley de inercia debe ser falsa, puesto que las estrellas giran claramente 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 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.