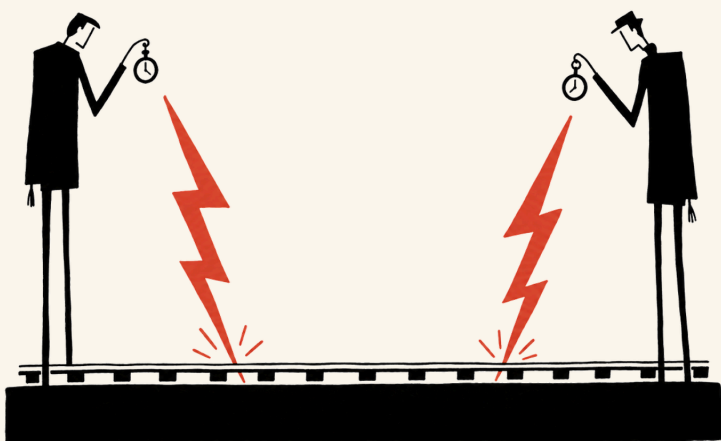


Sobre la teoría de la relatividad especial y general



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?

¿Dónde está la nube?

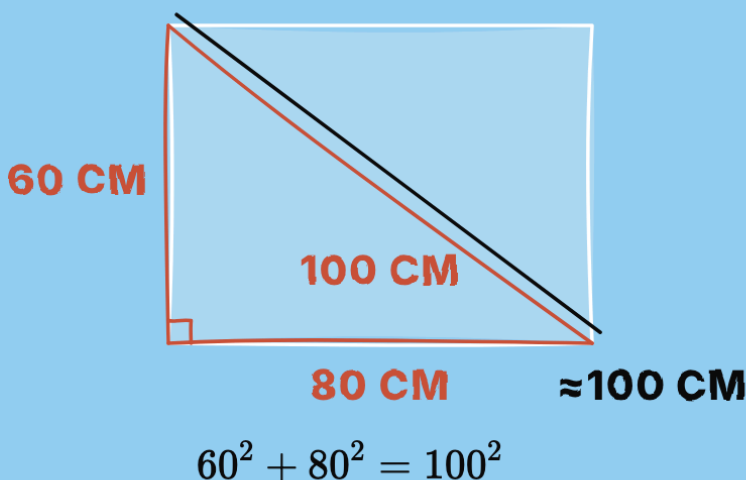
Una piedra, dos trayectorias

¿Qué cuerpos de referencia están permitidos?

¿Cuándo es verdadero un teorema?

Lleve una cinta métrica a la mesa de la cocina. Mida el lado corto y el lado largo, luego tienda la cinta de esquina a esquina, pero antes de leerla, adivine la respuesta con el único teorema que todo el mundo recuerda de la escuela, el del lado largo de un triángulo rectángulo. Si los lados median sesenta y ochenta centímetros, la regla de la escuela dice que la diagonal es de cien. Mira la cinta, y ahí está, milímetro más o menos. ¿Qué ha confirmado exactamente?

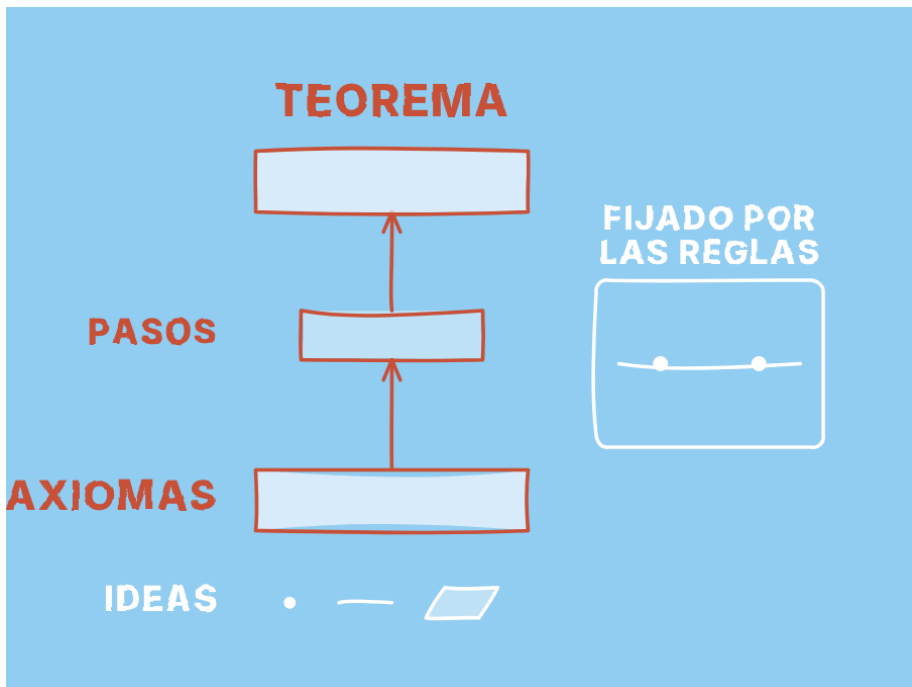
¿QUÉ SIGNIFICA VERDADERO?



Predecir la diagonal de la mesa

La mayoría diría que ha comprobado que el teorema es verdadero. Albert Einstein abre su pequeño libro deteniéndose justo ahí y preguntando, con cierta malicia, qué queremos decir 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 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 nuestra seguridad puede evaporarse en el momento en que alguien pregunte qué significa «verdadero».

Piense en la geometría como un edificio. Sus cimientos son unas pocas ideas básicas, punto, recta, plano, y unas pocas afirmaciones simples sobre ellas, los axiomas, que aceptamos porque parecen evidentes. Cada piso superior se construye sobre los cimientos por pasos lógicos, y ese proceso de construcción es lo que llamamos una demostración. Así que, dentro de la geometría, un teorema es verdadero cuando se ha construido correctamente a partir de los axiomas, y eso es todo lo que la palabra puede significar allí. Si los propios cimientos son verdaderos es una pregunta que la geometría no puede responder, y Einstein dice que no tiene ningún sentido.

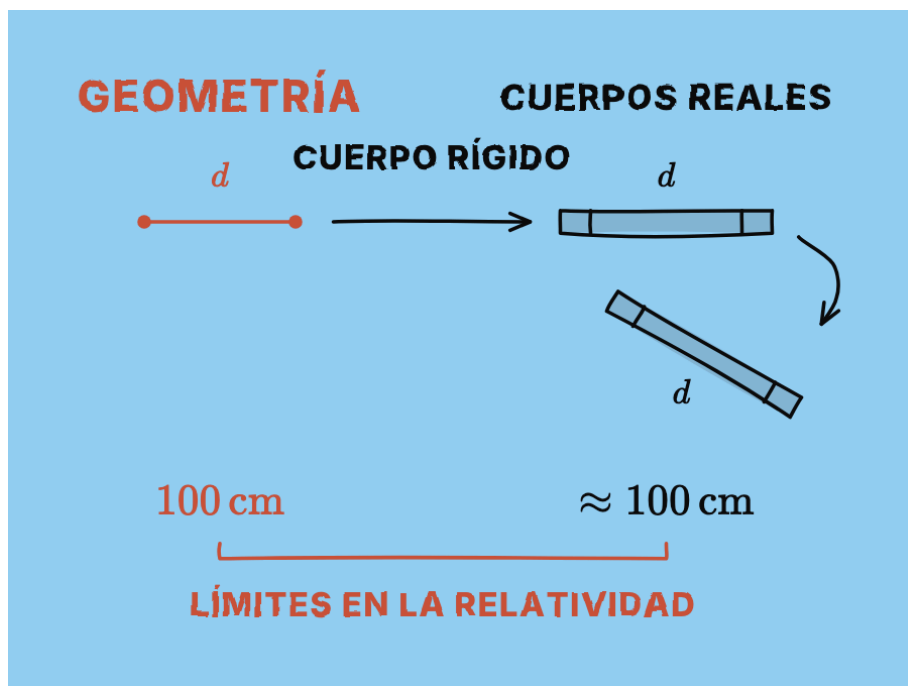


Lo que establece una demostración

He aquí por qué. ¿Es verdad que por dos puntos pasa una sola recta? La geometría no lo sabe; simplemente trata de cosas que llama rectas y les da esa propiedad por definición, como las reglas del ajedrez dan al alfil su movimiento en diagonal. Nadie pregunta si el movimiento del alfil es verdadero. Y «verdadero», dice Einstein, significa siempre concordancia con alguna cosa real, mientras que la geometría pura trata solo de cómo encajan entre sí sus propias ideas.

¿Por qué entonces el teorema parece tan verdadero en la mesa? Porque las ideas de la geometría nacieron de objetos reales en primer lugar. Tenemos la costumbre de ver un segmento como dos marcas sobre un cuerpo rígido, una cinta, una regla, una varilla, y de juzgar que tres cosas están en línea cuando, cerrando un ojo, podemos hacer

que la más cercana oculte a las demás. Esa costumbre es el puente, y Einstein lo hace explícito con una sola frase añadida: dos marcas sobre un cuerpo prácticamente rígido siguen a la misma distancia por mucho que mueva el cuerpo. Nada en la geometría pura dice eso; es una afirmación sobre cintas y varillas. Una vez añadida, cada teorema de la geometría se convierte en una afirmación sobre cómo pueden disponerse los cuerpos rígidos reales, y la geometría ha pasado a ser una rama de la física.



De la geometría a la prueba física

Ahora la palabra «verdadero» encaja, porque ahora hay algo que comprobar. Un teorema es verdadero, en este sentido físico, cuando una construcción con cosas reales, compás y regla o una cinta sobre una mesa, concuerda con él. Su mesa fue una comprobación así, y la

superó. La misma comprobación se hace, 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 coincide con donde usted está realmente.

Einstein cierra con una advertencia que recorre todo el libro. La convicción de que la geometría es verdadera en este sentido descansa en una experiencia bastante imperfecta; ninguna cinta es perfectamente rígida y ningún ojo perfectamente recto. Por ahora, dice, damos esa verdad por supuesta, y al final del libro, en 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 preguntar si los axiomas son verdaderos no tiene sentido allí, como preguntar si el movimiento del alfil en el ajedrez es verdadero. Los teoremas parecen verdaderos porque las ideas de la geometría nacieron de objetos reales, y vemos un segmento como dos marcas sobre un cuerpo rígido. Añada una afirmación física, que dos marcas sobre un cuerpo rígido conservan su 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, una cinta sobre una mesa o 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. Dentro de la propia geometría, ¿qué hace verdadero a un teorema?
 - a. Que una cinta métrica sobre una mesa concuerde con él
 - b. Que se haya construido correctamente a partir de los axiomas por pasos lógicos
 - c. Que todo el que lo piensa lo encuentre evidente
2. ¿Por qué compara la lección el axioma sobre las rectas con el movimiento del alfil en el ajedrez?
 - a. Porque ambos son difíciles de aprender
 - b. Porque ambos son reglas dadas por definición, así que preguntar si son verdaderas no tiene sentido
 - c. Porque ambos se obtuvieron por medición cuidadosa
 - d. Porque ambos pueden comprobarse con una regla
3. ¿Qué única afirmación añadida convierte la geometría en una rama de la física?
 - a. Que dos marcas sobre un cuerpo prácticamente rígido siguen a la misma distancia por mucho que se mueva el cuerpo
 - b. Que los axiomas se confirman con la experiencia
 - c. Que un receptor de satélites encuentra su posición mediante geometría
 - d. Que una recta es el camino más corto entre dos puntos
4. ¿Por qué acepta Einstein la verdad física de la geometría solo por ahora?

- a. Porque aún no se han demostrado todos los teoremas
- b. Porque las cintas métricas rara vez son exactas
- c. Porque descansa en una experiencia imperfecta, y la teoría de la relatividad general mostrará sus límites

Respuestas

1. **b)** Piense en la geometría como un edificio: dentro de él un teorema es verdadero cuando se ha construido correctamente a partir de los axiomas, y eso es todo lo que la palabra puede significar allí.
2. **b)** La geometría simplemente trata de cosas que llama rectas y les da su propiedad por definición, como las reglas del ajedrez dan al alfil su movimiento; nadie pregunta si el movimiento del alfil es verdadero.
3. **a)** Una vez que añadimos que dos marcas sobre un cuerpo rígido conservan su distancia por mucho que se mueva el cuerpo, cada teorema se convierte en una afirmación sobre cómo pueden disponerse los cuerpos rígidos reales, y la geometría ha pasado a ser una rama de la física.
4. **c)** La convicción descansa en una experiencia bastante imperfecta, ninguna cinta es perfectamente rígida y ningún ojo perfectamente recto; la da por supuesta por ahora y muestra al final del libro dónde tiene límites.

Ejercicios

1. Un amigo dice: «Pitágoras es verdadero, lo comprobé con una cinta métrica». ¿En qué sentido tiene razón, y en qué sentido no ha comprobado nada en absoluto?

Pista: Separe el teorema como algo construido a partir de axiomas del teorema como afirmación sobre una cinta en una mesa.

Respuesta: En el sentido físico tiene razón: una vez añadido que una cinta es un cuerpo rígido cuyas marcas conservan su distancia, el teorema es una afirmación sobre cosas reales, y la mesa concordó con él. Dentro de

la geometría pura no ha comprobado nada, porque allí un teorema es verdadero solo por construirse a partir de los axiomas, y ninguna medición puede afectar a eso.

2. Explique, con la comparación del ajedrez, por qué la pregunta de si por dos puntos pasa una sola recta ni siquiera puede plantearse, mientras que sí puede plantearse si una diagonal medida coincide con la predicha.

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

Respuesta: La primera es una regla de la geometría: las rectas son las cosas que tienen esa propiedad por definición, como el alfil tiene su movimiento en diagonal por las reglas del ajedrez, y preguntar si una regla es verdadera no tiene sentido. La segunda trata de marcas sobre una cinta y una mesa, cosas reales, así que la concordancia o discordancia con ellas puede comprobarse y la palabra verdadero encaja.

3. ¿Por qué llama la lección puente a la costumbre de ver un segmento como dos marcas sobre un cuerpo rígido, y qué construye Einstein sobre ese puente?

Pista: Piense en lo que conecta las ideas de la geometría con cintas y varillas.

Respuesta: La costumbre conecta las ideas de la geometría, que vinieron de objetos reales, de nuevo con esos objetos. Einstein la hace explícita con una sola afirmación añadida, que dos marcas sobre un cuerpo prácticamente rígido conservan su distancia por mucho que se mueva el cuerpo; con ella, la geometría se convierte en una rama de la física cuyos teoremas pueden comprobarse contra cuerpos reales.

¿Dónde está la nube?

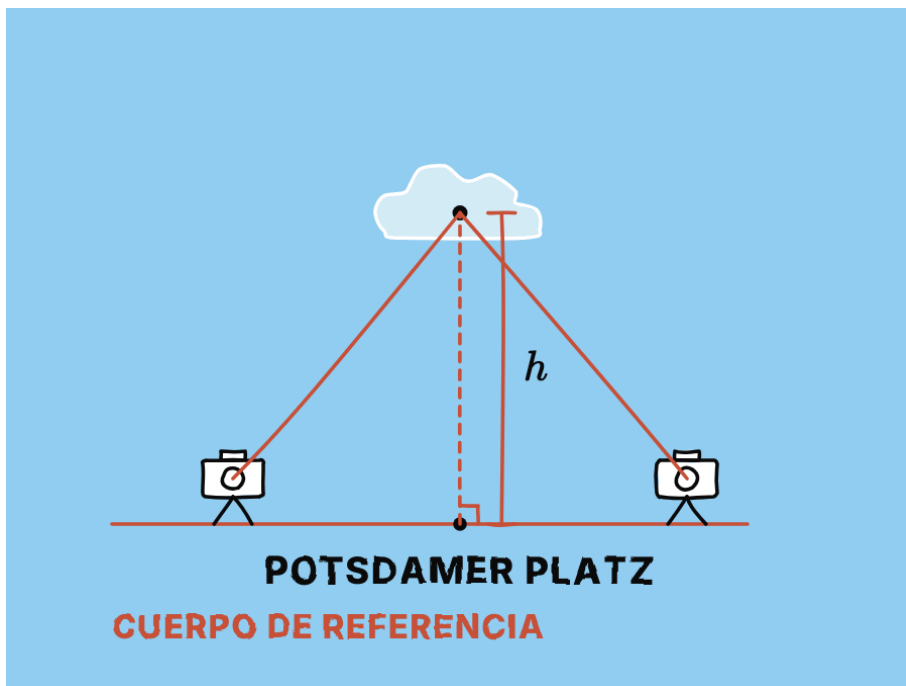
Mida la altura de una puerta con una regla corta de madera. Apóyela en el suelo contra el marco, marque con el pulgar dónde termina, levántela, apóyela en la marca y cuente: una, dos, tres reglas y un poco. Nadie le enseñó esto; es simplemente lo que es medir. Ahora mire una nube que pasa sobre la casa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



La distancia son unidades repetidas

Primero la regla. La última vez acordamos que un segmento son dos marcas sobre un cuerpo rígido; ahora elija uno de esos segmentos, una varilla pequeña, y comprométase a usarla de una vez por todas como unidad. Para medir la distancia entre dos puntos de un cuerpo rígido, coloque la varilla unidad a lo largo de la recta entre ellos, una y otra vez, y cuente cuántas veces cabe. Ese recuento es la distancia. Toda cinta métrica 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 algo, dice Einstein, nombra el punto de algún cuerpo rígido con el que la cosa coincide. Ese cuerpo rígido es el cuerpo de referencia, y el habla cotidiana funciona así tanto como la ciencia. Diga «en Berlín, en la Potsdamer Platz»: la superficie de la Tierra es el cuerpo rígido, la Potsdamer Platz es un punto con nombre sobre ella, y el suceso está en ese punto. Es como decirle a un amigo que se verán en la fuente del parque: el parque es el cuerpo de referencia y la fuente su punto con nombre.



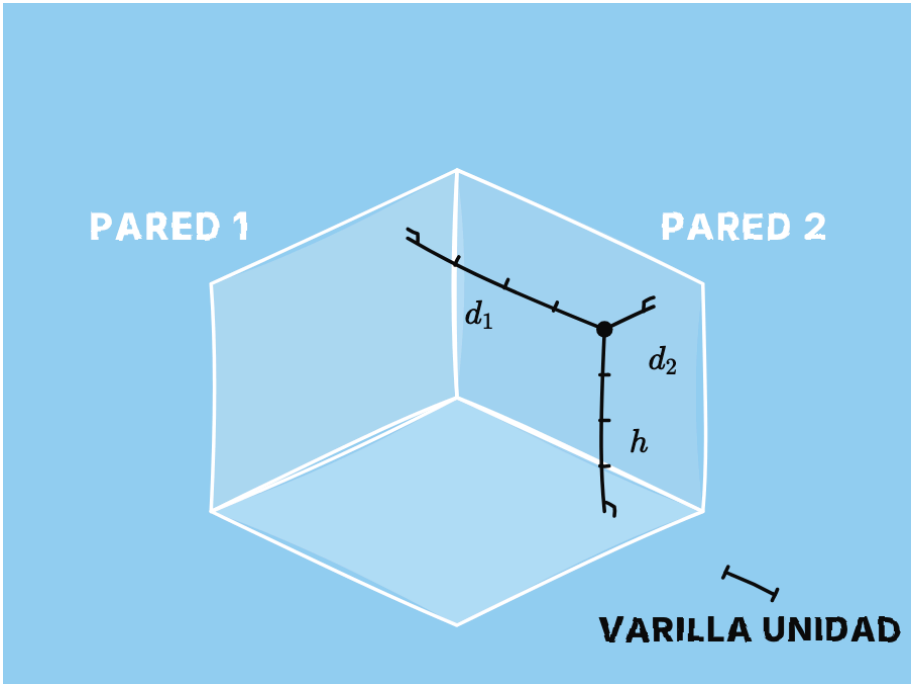
Llegar a la nube

Esta manera de indicar un lugar tiene dos límites. Solo puede nombrar lugares en la superficie de un cuerpo rígido, y necesita que esa superficie tenga puntos de referencia con nombre. La nube no tiene ninguna de las dos cosas. Así que 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 de su pie, dice por completo dónde está la nube. Nada ha cambiado de naturaleza: seguimos nombrando un punto de un cuerpo rígido, solo que el cuerpo rígido ahora llega hasta la nube.

En ese poste se esconden tres pasos, y Einstein los saca a la luz. El cuerpo de referencia se ha prolongado hasta alcanzar la cosa que se quiere localizar. Un número, la longitud 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 ningún poste: fotografíe la nube desde varios lugares del suelo y, a partir de las imágenes, sabiendo cómo viaja la luz, calcule 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 describir los lugares con números medidos en vez de con puntos de referencia con nombre. La física lo hace con el sistema de coordenadas: imagine dos paredes y el suelo que se juntan en la esquina de una habitación, tres superficies planas rígidas en ángulo recto, unidas en un solo cuerpo rígido. Cualquier punto de la habitación queda fijado por tres distancias: a qué distancia está de una pared, de la otra pared y sobre el suelo. Esos tres números son sus coordenadas, y cada uno se encuentra, en principio, colocando la varilla unidad a lo largo de la perpendicular a la pared.



Tres distancias fijan un punto

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 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 de cada indicación de ese tipo debe seguir siendo 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 toda descripción de dónde están las cosas usa un cuerpo rígido al que se refieren, y supone que la geometría corriente de la escuela vale para los segmentos, 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 distancia se mide colocando una varilla unidad elegida a lo largo de la recta entre dos puntos y contando cuántas veces cabe. Decir dónde está algo significa nombrar el punto de un cuerpo rígido de referencia con el que coincide, como la fuente nombra un punto del parque. La idea de lugar se refina prolongando el cuerpo de referencia, sustituyendo los puntos de referencia por números medidos y hablando de una longitud incluso cuando la varilla que la mediría es solo imaginaria. Un sistema de coordenadas lo hace sistemático: tres paredes rígidas en ángulo recto, y las tres distancias de un punto 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 de la escuela vale para los segmentos sobre cuerpos rígidos.

Preguntas

1. ¿En qué consiste realmente medir la distancia entre dos puntos, según la lección?
 - 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 tienen en común «nos vemos en la fuente del parque» y «en Berlín, en la Potsdamer Platz»?
 - a. Ambos dan un lugar como tres números medidos
 - b. Ambos nombran un punto de un cuerpo rígido de referencia con el que el suceso coincide
 - c. Ambos necesitan que se levante un poste para funcionar
 - d. Ambos localizan algo fuera de la superficie de la Tierra
3. La altura de la nube se calcula a partir de fotografías tomadas en varios lugares del suelo. ¿Cuál de los tres pasos es este?
 - a. Prolongar el cuerpo de referencia con un poste real hasta la nube
 - b. Sustituir un punto de referencia por un número
 - c. Hablar de una longitud aunque la varilla que la mediría nunca se construyó
 - d. Tratar la nube como un punto de referencia en 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 de satélite son menos exactas que las varillas
 - b. Porque de lo contrario los resultados de la física y de la astronomía se disuelven en la vaguedad
 - c. Porque las tres paredes del sistema de coordenadas siempre se construyen en la práctica

Respuestas

1. **a)** Coloque la varilla unidad a lo largo de la recta entre los puntos, una y otra vez, y cuente cuántas veces cabe; ese recuento es la distancia, y toda cinta y todo telémetro se reducen a él.
2. **b)** Toda indicación de dónde está algo nombra el punto de un cuerpo rígido con el que la cosa coincide; el parque es el cuerpo de referencia y la fuente su punto con nombre, como lo son la superficie de la Tierra y la Potsdamer Platz.
3. **c)** Hablamos de la altura de la nube incluso cuando no se ha construido ningún poste: a partir de las imágenes, 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 el sentido de cada indicación de ese tipo debe seguir siendo varillas apoyadas sobre 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 podría medirse cada una, en principio.

Pista: Piense en las dos paredes y el suelo como las tres superficies rígidas y pregúntese a qué distancia está la lámpara de cada una.

Respuesta: Las dos paredes y el suelo son tres superficies planas rígidas en ángulo recto, unidas en un solo cuerpo rígido. Las coordenadas de la lámpara son sus tres distancias, a una pared, a la otra pared y sobre el suelo. Cada una se encuentra, en principio, colocando la varilla unidad a lo largo de la perpendicular a esa superficie y contando cuántas veces cabe.

2. Nombre los dos límites de indicar un lugar con un punto de referencia y explique cómo el poste en la plaza nos libera de cada uno sin cambiar lo que es una indicación de lugar.

Pista: Parta de lo que «en la fuente del parque» puede y no puede localizar.

Respuesta: Un punto de referencia solo puede nombrar lugares en la superficie de un cuerpo rígido, y necesita que esa superficie tenga puntos de referencia con nombre. 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. La indicación sigue nombrando un punto de un cuerpo rígido con el que la nube coincide, así que su naturaleza no cambia.

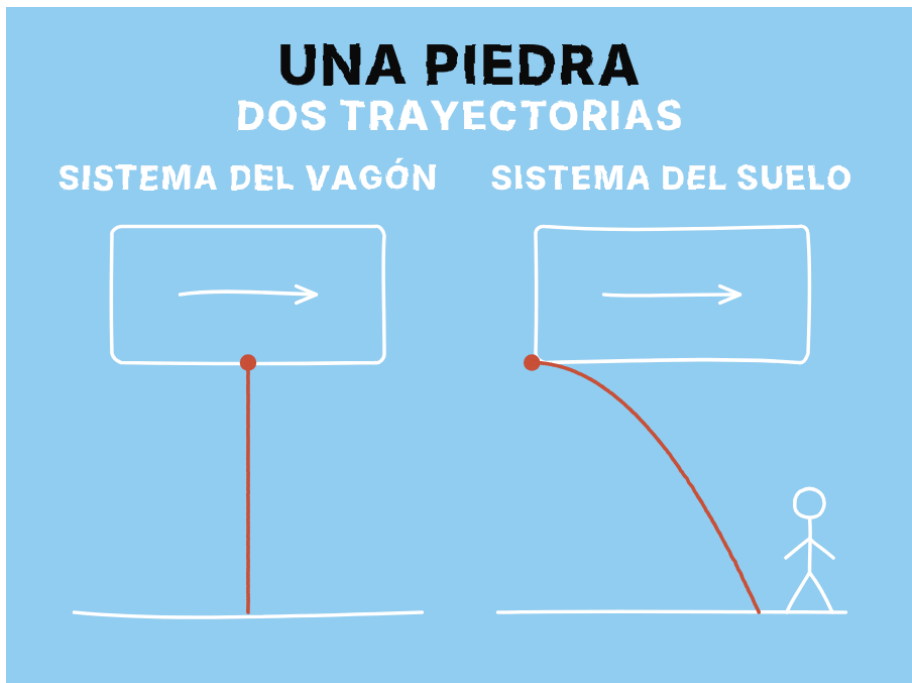
3. Un receptor de satélites calcula su posición a partir de los tiempos de llegada de las señales y nunca toca una varilla. ¿En qué sentido su respuesta sigue siendo una indicación de lugar del tipo descrito aquí, y qué supone sobre la geometría?

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 tres distancias a un cuerpo rígido de referencia, distancias que una varilla podría medir en principio. Como toda indicación de lugar, supone que la geometría de la escuela vale para los segmentos, 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. Saque una piedra por la ventanilla y suéltela, sin impulso. La ve caer en línea recta, como si el tren estuviera parado, y aterrizar en el terraplén debajo de usted. Un caminante en el sendero junto a la vía ve la misma piedra salir de la misma mano, pero para el caminante cae en una curva, arrastrada hacia adelante con el tren mientras cae, y aterriza 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 que la mecánica describe cómo los cuerpos cambian su lugar en el espacio con el tiempo, estaría pecando, como él dice, contra el santo espíritu de la claridad. El problema se esconde en dos palabras pequeñas, «lugar» y «espacio», y la piedra lo saca a la luz. ¿Los lugares por los que pasa la piedra están realmente sobre una recta o sobre una curva? ¿Y qué significa decir que la piedra se mueve «en el espacio»?

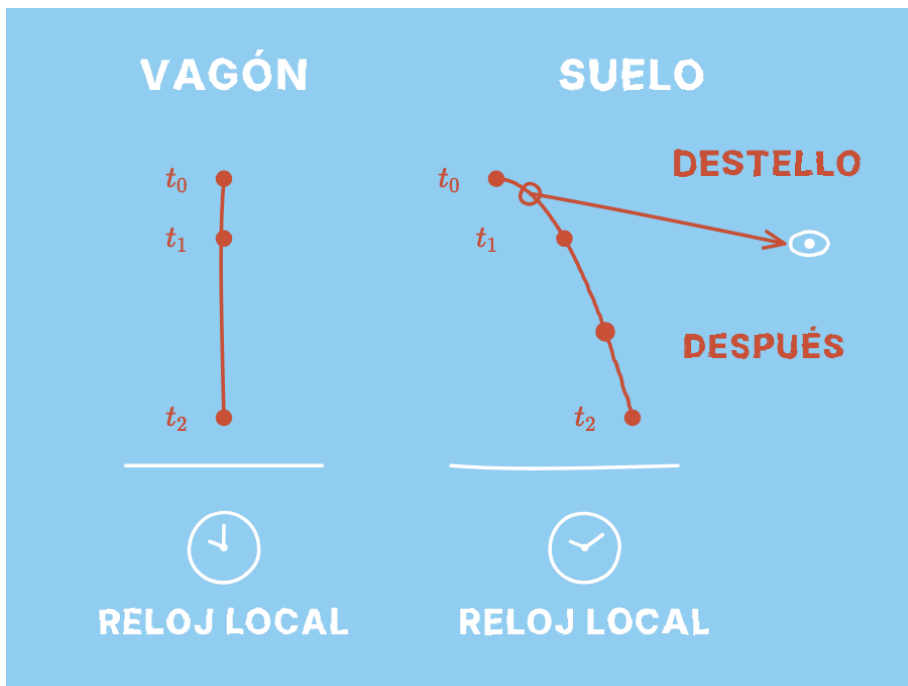
Después de la última vez la respuesta es clara. «Espacio», si somos sinceros, es una palabra a la que no asociamos ninguna idea clara, así que Einstein la deja de lado y dice en cambio «movimiento respecto a un cuerpo rígido de referencia». Los lugares respecto a un cuerpo de referencia son exactamente lo que aprendimos a dar la última vez, y aquí hay dos cuerpos de referencia disponibles: el vagón y el suelo. Respecto al vagón la piedra cae sobre una recta; respecto al suelo cae sobre una curva. Ninguna es la trayectoria real mientras la otra es una ilusión. No hay trayectoria en sí, solo una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado, y una frase que omite el cuerpo de referencia no dice nada.

Pruébalo

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 a través de la ventanilla: la moneda 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 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.

Una trayectoria con su cuerpo de referencia nombrado todavía no es toda la historia de un movimiento. Hay que decir también cuándo está la piedra en cada punto de la trayectoria, y esos instantes, insiste Einstein, deben ser cosas que puedan medirse, no números sacados del aire. Lo hace de manera sencilla: dos relojes hechos exactamente iguales, uno en la mano del pasajero y otro en la mano del caminante, y cada uno anota dónde está la piedra en su propio cuerpo de referencia en cada tic de su propio reloj. Tic, aquí; tic, allá; y una lista de lugares emparejados con tics es una descripción completa del movimiento respecto a ese cuerpo de referencia.



Lugares emparejados con lecturas del reloj

Einstein cierra con dos advertencias discretas, dejadas para más adelante. Emparejar un tic con un lugar ignora que la luz tarda en viajar, así que el caminante ve la piedra donde estaba hace un instante; y acecha una segunda dificultad que aún no nombra. No son pequeñas: los relojes de los satélites que alimentan su receptor se desviarían kilómetros al día si se ignoraran esas cosas, 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 real 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 vaga palabra «espacio» se sustituye por un cuerpo rígido de referencia. La piedra soltada desde el tren cae en línea recta respecto al vagón y a lo largo de una curva 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, tomado de un reloj en la mano del observador y emparejado con el lugar de la piedra en su propio cuerpo de referencia. Dos dificultades quedaron apartadas, el tiempo de viaje 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 a lo largo de una curva para el caminante. ¿Cuál es la trayectoria real?
 - a. La curva, 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 de movimiento respecto a un cuerpo rígido de referencia?

- a. Porque a «espacio» no asociamos ninguna idea clara, mientras que los lugares respecto a un cuerpo de referencia se definieron la última vez
 - b. Porque el espacio está curvado y no puede medirse con varillas
 - c. Porque el tren y el suelo se mueven por el espacio a velocidades distintas
 - d. Porque los cuerpos rígidos son más fáciles de imaginar que el espacio vacío
3. Una trayectoria con su cuerpo de referencia nombrado todavía no es toda la historia de un movimiento. ¿Qué falta?
- a. El peso de la piedra y la fuerza de la gravedad
 - b. Cuándo está la piedra en cada punto de la trayectoria, dado como algo que puede medirse
 - c. La velocidad del tren respecto al suelo
4. ¿Cómo obtienen el pasajero y el caminante los instantes para su descripción?
- a. Comparten un único reloj en el terraplén
 - b. Calculan el instante a partir de cuánto 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, solo una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado; ninguna es la real mientras la otra es una ilusión.

2. a) Espacio, si somos sinceros, es una palabra a la que no asociamos ninguna idea clara; los lugares respecto a un cuerpo de referencia son exactamente lo que la parte anterior nos enseñó a dar.

3. b) Hay que decir también cuándo está la piedra en cada punto de la trayectoria, y esos instantes deben ser cosas que puedan medirse, no números sacados del aire.

4. c) Dos relojes hechos exactamente iguales, uno en la mano del pasajero y otro en la mano del caminante, y cada uno anota dónde está la piedra en su propio cuerpo de referencia en cada tic de su propio reloj.

Ejercicios

1. Un pasajero de un tren que avanza suavemente suelta una piedra por la ventanilla. Describa su trayectoria respecto al vagón y respecto al suelo, y explique por qué preguntar cuál trayectoria es real es no preguntar nada.

Pista: Nombre el cuerpo de referencia antes de describir cualquiera de las trayectorias.

Respuesta: Respecto al vagón la piedra cae en línea recta; respecto al suelo avanza con el tren mientras cae y traza una curva. No hay trayectoria en sí, solo una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado, así que una pregunta que omite el cuerpo de referencia no dice nada.

2. El pasajero y el caminante escriben cada uno una lista de los lugares de la piedra en los tics de sus propios relojes. Diga qué comparten las listas y en qué difieren, y por qué esa lista, no la trayectoria sola, es una descripción completa del movimiento.

Pista: Pregúntese qué añade un tic a un punto de la trayectoria.

Respuesta: Ambas listas emparejan el mismo tipo de tics con el lugar de la piedra; los lugares del pasajero están sobre una recta vertical, los del

caminante sobre una curva, 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 en la mano del observador están medidos, que es lo que necesita una descripción completa.

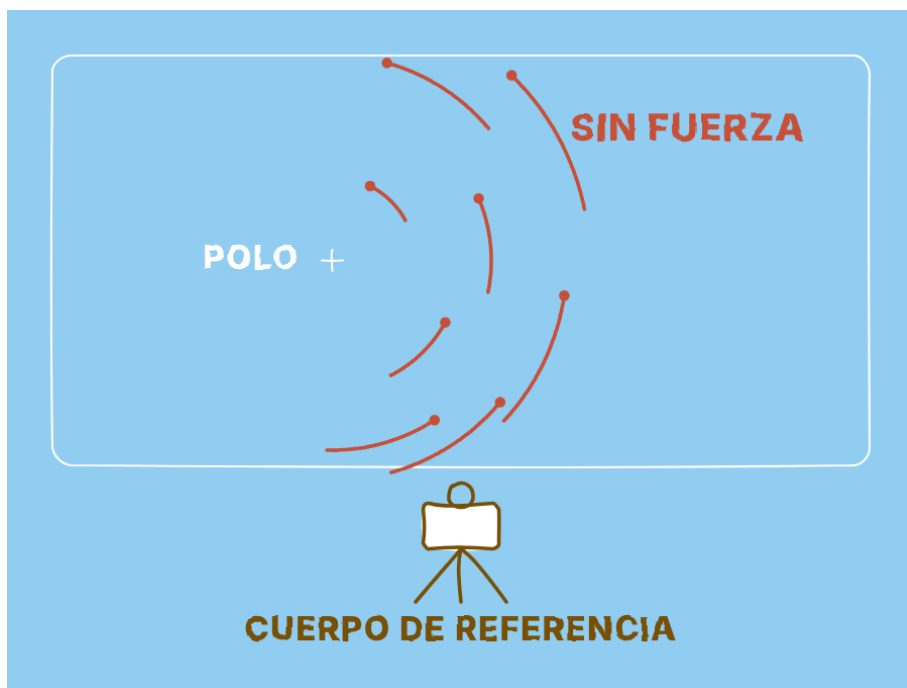
3. ¿Qué ignora emparejar un tic del reloj con el lugar de la piedra, y por qué se permite Einstein ignorarlo aquí?

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

Respuesta: Ignora que la luz tarda en viajar, así que el caminante ve la piedra donde estaba hace un instante, no donde está. Einstein lo deja de lado porque por ahora se sitúa en el terreno de la mecánica corriente, y promete tratarlo, junto con una segunda dificultad, más adelante en el libro.

¿Qué cuerpos de referencia están permitidos?

Deje una cámara apuntando al cielo nocturno con el obturador abierto durante una hora. Las estrellas salen no como puntos sino como arcos, trozos de círculos alrededor de un solo punto del cielo. Nadie empuja esas estrellas; están tan lejos de todo que nada les llega. Y sin embargo, respecto al suelo, cada una de ellas recorrió una curva.



Trazas de estrellas sobre la cámara

Einstein parte de la ley de inercia: un cuerpo alejado de todos los demás permanece en reposo o sigue moviéndose en línea recta a

ritmo constante. Suena como una regla sobre cuerpos, pero después de la piedra del tren sabemos que es igualmente una regla sobre cuerpos de referencia, porque «línea recta» no significa nada hasta que decimos respecto a qué. Las estrellas fijas son los cuerpos a los que la ley debería ajustarse mejor, y respecto a la Tierra giran una vez al día. Así que o se va la ley, o se va la Tierra como cuerpo de referencia, y Einstein conserva la ley.

El movimiento puede entonces referirse solo a cuerpos de referencia respecto a los cuales las estrellas fijas no giran. A un cuerpo de referencia así, uno en el que vale la ley de inercia, lo llama sistema de coordenadas galileano, y la mecánica de Galileo y Newton pretende ser válida solo para esos. Los satélites detrás del receptor de su teléfono se siguen exactamente en un sistema así, uno que mantiene sus direcciones fijas en las estrellas; el receptor convierte la respuesta a la Tierra que gira, para usted. Así las cuatro primeras secciones se cierran con los cuerpos de referencia clasificados: los galileanos admitidos, los demás apartados por el momento, y ese «por el momento» es donde empieza el resto del libro.

FIJO A LA TIERRA



GALILEANO



VALE LA LEY DE INERCIA

Fijo a la Tierra frente a galileano

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 regla sobre cuerpos de referencia tanto como sobre cuerpos. Respecto a la Tierra las estrellas fijas giran una vez al día, así que la Tierra no es un cuerpo de referencia en el que valga la ley. Un cuerpo de referencia en el que vale la ley de inercia es un sistema de coordenadas galileano, y la mecánica de Galileo y Newton es válida solo para esos.

Preguntas

1. Respecto a un sistema de coordenadas rígidamente unido a la Tierra, ¿qué hace una estrella fija en un día astronómico?
 - a. Permanece en reposo, como exige la ley de inercia
 - b. Describe un círculo de radio enorme, contra el enunciado de la ley de inercia
 - c. Se mueve uniformemente en línea recta
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 el reposo o el movimiento rectilíneo uniforme 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. ¿Para qué sistemas de coordenadas pretenden validez las leyes de la mecánica de Galileo y Newton?
- a. Para todo sistema de coordenadas
 - b. Solo para sistemas de coordenadas fijos a la Tierra
 - c. Solo para sistemas de coordenadas galileanos

Respuestas

1. **b)** Respecto a un sistema rígidamente unido a la Tierra, cada estrella fija describe, en un día astronómico, un círculo de radio enorme, en contradicción con el enunciado de la ley de inercia.
2. **b)** La ley dice algo no solo sobre el movimiento de los cuerpos, sino sobre qué cuerpos de referencia o sistemas de coordenadas pueden usarse en la descripción mecánica, puesto que el movimiento es siempre movimiento respecto a un cuerpo de referencia.
3. **b)** Un sistema de coordenadas cuyo estado de movimiento es tal que la ley de inercia vale respecto a él se llama sistema de coordenadas galileano; las estrellas fijas no realizan movimiento circular respecto a él.
4. **c)** Solo para un sistema de coordenadas galileano pretenden validez las leyes de la mecánica de Galileo y Newton.

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.