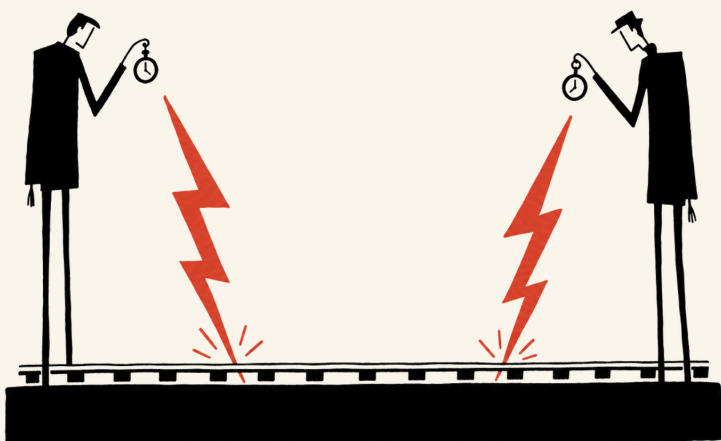


Sobre la teoría de la relatividad especial y general



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

Qué hace verdadera a la geometría

Decir dónde está algo

No hay trayectoria en sí

¿Qué cuerpos de referencia están permitidos?

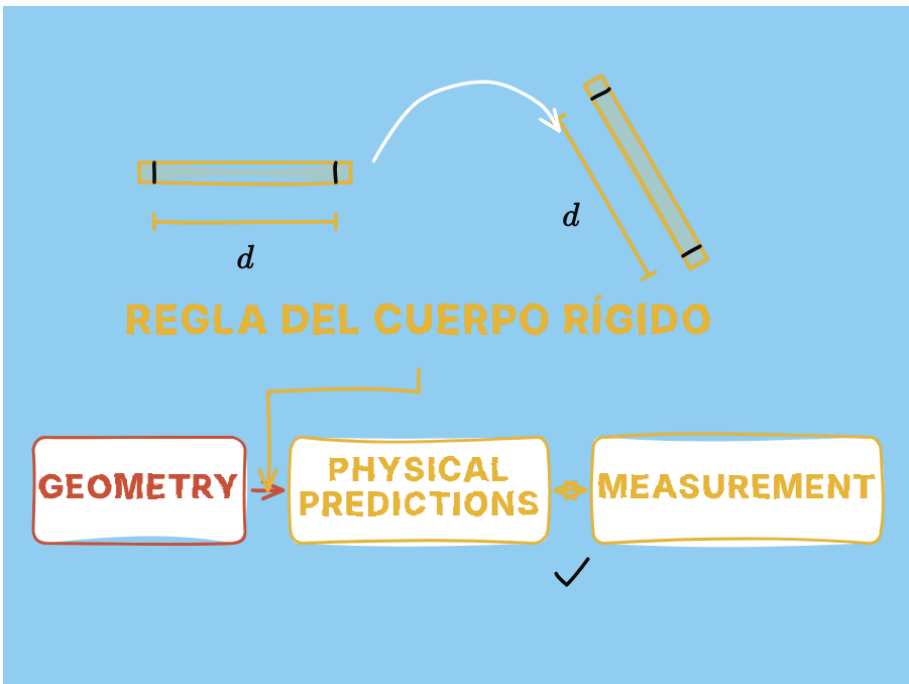
Qué hace verdadera a la geometría

Mida una mesa de cocina con una cinta: sesenta centímetros por ochenta. Antes de tender la cinta por la diagonal, la geometría de la escuela le dice lo que marcará: cien centímetros. Lo comprueba, y así es. Todo el mundo dice que el teorema acaba de mostrarse verdadero, y Einstein abre su libro preguntando qué puede significar siquiera esa palabra.

La pregunta que responde esta primera sección es simple de enunciar: ¿en qué sentido es verdadera una afirmación de la geometría? Dentro de la propia geometría, un teorema es verdadero solo porque se sigue de los axiomas, las pocas afirmaciones de partida que aceptamos porque parecen evidentes. Si los propios axiomas son verdaderos es una pregunta que la geometría no puede responder; Einstein va más lejos y dice que no tiene ningún sentido, porque «verdadero» significa siempre concordancia con alguna cosa real, y la geometría pura no trata de cosas reales, solo de cómo encajan entre sí sus propias ideas.

¿Por qué entonces el teorema parece verdadero en la mesa? Porque las ideas de la geometría nacieron de objetos reales, y tenemos la costumbre de ver un segmento como dos marcas sobre un cuerpo rígido, como una cinta o una varilla, y de juzgar que tres lugares están en línea cuando un ojo puede hacerlos coincidir. He aquí la única idea en la que descansa todo. Añada a la geometría una sola afirmación física: dos marcas sobre un cuerpo prácticamente rígido siguen a la misma distancia por mucho que se mueva el cuerpo. Con esa adición, cada teorema de la geometría se convierte en una afirmación sobre

cómo pueden disponerse los cuerpos rígidos reales, y la geometría pasa a ser una rama de la física.



El puente físico

Lo que se sigue en la práctica es que un teorema ahora puede comprobarse, y por tanto ser verdadero o falso en el sentido corriente: es verdadero cuando una construcción con cuerpos reales, compás y regla, o una cinta sobre una mesa, concuerda con él. Su prueba en la mesa fue un experimento de física, y lo superó. Lo mismo ocurre 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 añade una advertencia que recorre todo el libro. La convicción de que la geometría es verdadera en este sentido físico descansa en una experiencia bastante imperfecta, pues ninguna cinta es perfectamente rígida y ningún ojo perfectamente recto. Acepta esa verdad por ahora, como supuesto de trabajo, y promete mostrar al final del libro, en la teoría de la relatividad general, que tiene límites. Quedan fuera aquí los pasos más finos del argumento de Einstein, como sus observaciones sobre nuestra formación escolar en Euclides y la redacción exacta de sus definiciones; están en la primera sección del libro.

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. 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 cuyos teoremas pueden comprobarse contra cosas reales. Entonces un teorema es verdadero cuando los cuerpos reales, una cinta sobre una mesa o un receptor de satélites, concuerdan con él. Esa concordancia descansa en una experiencia imperfecta; Einstein la supone por ahora y mostrará sus límites en la teoría de la relatividad general.

Preguntas

1. Dentro de la propia geometría, ¿por qué es verdadero un teorema?
 - a. Porque una cinta métrica sobre una mesa concuerda con él
 - b. Porque se sigue de los axiomas, las afirmaciones de partida que aceptamos como evidentes
 - c. Porque las personas cuidadosas lo encuentran convincente
2. ¿Por qué dice Einstein que preguntar si los axiomas son verdaderos no tiene ningún sentido?
 - a. Porque los axiomas son demasiado simples para dudar de ellos
 - b. Porque nadie ha encontrado la manera de ponerlos a prueba
 - c. Porque «verdadero» significa concordancia con una cosa real, y la geometría pura no trata de cosas reales
 - d. Porque cada axioma puede demostrarse a partir de los otros
3. ¿Cuál es la única idea en la que descansa todo, según esta parte?
 - 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 de la geometría están confirmados por la experiencia
 - c. Que un receptor de satélites usa la geometría para encontrar su posición
 - d. Que la geometría debe mantenerse separada de la física
4. ¿Con qué espíritu acepta Einstein la verdad física de la geometría?
 - a. Como demostrada más allá de toda duda por incontables mediciones

- b. Como un supuesto de trabajo que descansa en una experiencia imperfecta, cuyos límites aparecen más adelante en el libro
- c. Como una convención que podría sustituirse por cualquier otra

Respuestas

1. b) Dentro de la geometría un teorema es verdadero solo porque se sigue de los axiomas; si los propios axiomas son verdaderos es una pregunta que la geometría no puede responder.

2. c) Verdadero significa siempre concordancia con alguna cosa real, y la geometría pura no trata de cosas reales, solo de cómo encajan entre sí sus propias ideas.

3. a) Añada esa única afirmación física y cada teorema de la geometría se convierte en una afirmación sobre cómo pueden disponerse los cuerpos rígidos reales; la geometría pasa a ser una rama de la física.

4. b) La convicción descansa en una experiencia bastante imperfecta; acepta esa verdad por ahora como supuesto de trabajo y promete mostrar, en la teoría de la relatividad general, que 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 que se sigue 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 seguirse de los axiomas, y ninguna medición afecta a eso.

2. Explique por qué un teorema puede comprobarse, y por tanto ser verdadero o falso en el sentido corriente, solo después de añadir a la geometría la única afirmación física sobre los cuerpos rígidos.

Pista: Pregúntese de qué tratan los teoremas antes y después de la adición.

Respuesta: Antes de la adición los teoremas tratan de ideas y solo dicen lo que se sigue de los axiomas, así que no hay nada real con que compararlos. Después son afirmaciones sobre cómo pueden disponerse los cuerpos rígidos reales, de modo que una construcción con compás y regla, o una cinta sobre una mesa, puede concordar o no con ellos, y la palabra verdadero se aplica.

3. ¿Por qué llama Einstein a nuestra convicción de la verdad de la geometría una cuestión de experiencia imperfecta, y qué promete al respecto?

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

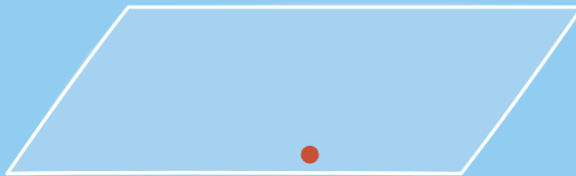
Respuesta: La convicción descansa solo en la experiencia con cosas reales, y ninguna cinta es perfectamente rígida ni ningún ojo perfectamente recto, así que la concordancia es aproximada. Supone esa verdad por ahora y promete mostrar al final del libro, en la teoría de la relatividad general, que tiene límites.

Decir dónde está algo

Mida una puerta con una regla corta: apóyela contra el marco, marque dónde termina, vuelva a apoyarla desde la marca y cuente. Tres reglas y un poco, y eso es lo que es medir. Esta sección responde a una sola pregunta: ¿qué hacemos realmente cuando medimos una longitud o decimos dónde está algo?

MEDIR Y LOCALIZAR

SUPERFICIE DE LA TIERRA



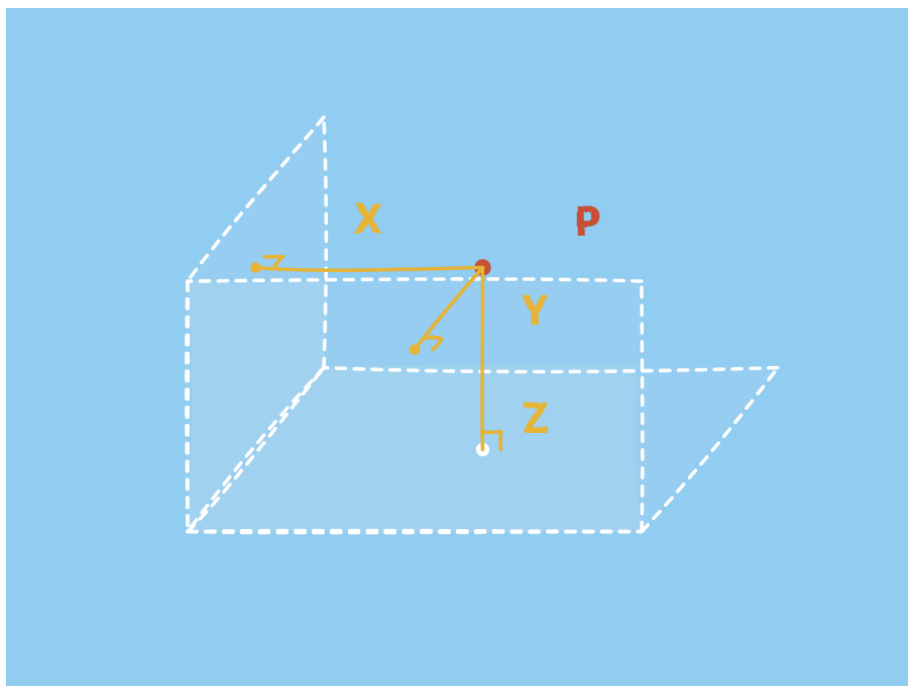
POTSDAMER PLATZ

Medir y localizar

Dos ideas lo sostienen todo. La primera es la varilla unidad: elija un segmento, dos marcas sobre un cuerpo rígido, de una vez por todas, y la distancia entre dos puntos cualesquiera es el número de veces que

hay que colocar esa varilla a lo largo de la recta entre ellos. Toda cinta métrica y todo telémetro láser se reducen a este recuento. La segunda es el cuerpo de referencia: decir dónde está una cosa significa nombrar el punto de algún cuerpo rígido con el que coincide. «En Berlín, en la Potsdamer Platz» nombra un punto de la superficie de la Tierra, y la superficie de la Tierra es el cuerpo rígido al que se refiere la indicación.

Einstein muestra luego cómo esta idea sencilla se estira sin cambiar de naturaleza. Una nube sobre la plaza no tiene punto de referencia propio, así que imagine un poste levantado en la plaza, lo bastante alto para llegar a ella; la longitud medida del poste, con el lugar de su pie, dice dónde está la nube. Han ocurrido tres cosas: el cuerpo rígido se ha prolongado hasta la nube, un número ha sustituido a un punto de referencia con nombre, y podemos hablar incluso de la altura de la nube cuando no existe ningún poste, calculando a partir de fotografías qué longitud tendría que tener.



De los puntos de referencia a las coordenadas

Lo que se sigue en la práctica es el sistema de coordenadas: tres paredes planas rígidas en ángulo recto, como dos paredes y el suelo que se juntan en la esquina de una habitación, y cualquier punto queda fijado por sus tres distancias a ellas, sus coordenadas. Nadie construye las paredes, admite Einstein, y los números se encuentran de manera indirecta; un receptor de satélites en su bolsillo calcula sus tres coordenadas a partir de cuánto tardaron en llegar las señales de varios satélites, como la altura de la nube se calculó a partir de fotografías. Y sin embargo el sentido de cada uno de esos números debe seguir siendo el que era: varillas apoyadas sobre un cuerpo rígido, o la física y 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 vale para los segmentos sobre cuerpos rígidos, el supuesto aceptado a prueba la última vez. Quedan fuera aquí las observaciones de Einstein sobre cómo se encuentran las coordenadas mediante construcciones con varillas prescritas por la geometría euclidiana; están en la segunda sección del libro.

Para recordar

La distancia es el número de veces que una varilla unidad elegida cabe a lo largo de la recta entre dos puntos. Decir dónde está algo significa nombrar el punto de un cuerpo rígido de referencia con el que coincide. La idea se estira prolongando el cuerpo de referencia, usando números medidos en vez de puntos de referencia y hablando de una longitud incluso cuando la varilla es solo imaginaria. Un sistema de coordenadas, tres paredes rígidas en ángulo recto, convierte cualquier lugar en tres números, e incluso la posición de un receptor de satélites significa varillas sobre un cuerpo rígido. Todo ello supone que la geometría corriente vale para los segmentos sobre cuerpos rígidos.

Preguntas

1. ¿Qué es la distancia entre dos puntos, según esta parte?

- a. El número de veces que la varilla unidad elegida cabe a lo largo de la recta entre ellos
 - b. El tiempo que una señal tarda en ir de uno al otro
 - c. El número de puntos de referencia que hay entre ellos
2. ¿Qué significa «en Berlín, en la Potsdamer Platz» cuando lo desmontamos?
- a. Que el lugar tiene tres coordenadas medidas desde paredes
 - b. Que el suceso está a cierta distancia del centro de la Tierra
 - c. Que el suceso coincide con un punto con nombre de un cuerpo rígido, la superficie de la Tierra
 - d. Que un poste en la plaza alcanzaría el suceso
3. La altura de una nube se calcula a partir de fotografías, sin ningún poste construido. ¿Qué estiramiento de la idea de lugar es este?
- a. Prolongar el cuerpo rígido con un poste real
 - b. Hablar de una longitud aunque la varilla que la mediría solo existe en la imaginación
 - c. Tratar la nube como un punto de referencia en el suelo
 - d. Sustituir la Tierra por otro cuerpo de referencia
4. ¿Por qué las coordenadas de un receptor de satélites deben seguir significando varillas apoyadas sobre un cuerpo rígido?
- a. Porque las señales de satélite son menos exactas que las varillas
 - b. Porque las tres paredes del sistema de coordenadas siempre se construyen

c. Porque de lo contrario la física y la astronomía se disuelven en la vaguedad

Respuestas

1. **a)** Elija un segmento de una vez por todas como varilla unidad; la distancia entre dos puntos cualesquiera es el número de veces que hay que colocar esa varilla a lo largo de la recta entre ellos, y toda cinta y todo telémetro se reducen a este recuento.
2. **c)** Decir dónde está una cosa significa nombrar el punto de algún cuerpo rígido 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. **b)** Podemos hablar de la altura de la nube incluso cuando no existe ningún poste, calculando a partir de fotografías qué longitud tendría que tener; el poste es imaginario, la longitud se mide.
4. **c)** Los números se encuentran de manera indirecta, como la altura de la nube a partir de fotografías, pero el sentido de cada uno de esos números debe seguir siendo el que era, varillas apoyadas sobre un cuerpo rígido, o la física y la astronomía se disuelven en la vaguedad.

Ejercicios

1. Explique con sus palabras qué son las tres coordenadas de una lámpara en una habitación, tomando como sistema de coordenadas la esquina donde dos paredes se juntan con el suelo, y cómo podría medirse cada una en principio.

Pista: Piense en las paredes y el suelo como tres superficies rígidas en ángulo recto.

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 ellas, y cada distancia se encuentra, en

principio, colocando la varilla unidad a lo largo de la perpendicular a esa superficie y contando cuántas veces cabe.

2. Nombre las tres cosas que ocurren cuando se usa un poste para decir dónde está una nube, y diga por qué la naturaleza de una indicación de lugar no ha cambiado.

Pista: Parta de lo que un punto de referencia en el suelo puede y no puede localizar.

Respuesta: El cuerpo rígido se prolonga con el poste hasta la nube; un número, la longitud medida del poste, sustituye a un punto de referencia con nombre; y hablamos de la altura incluso cuando no existe ningún poste, calculándola a partir de fotografías. La indicación sigue nombrando un punto de un cuerpo rígido con el que la nube coincide, así que su naturaleza no cambia.

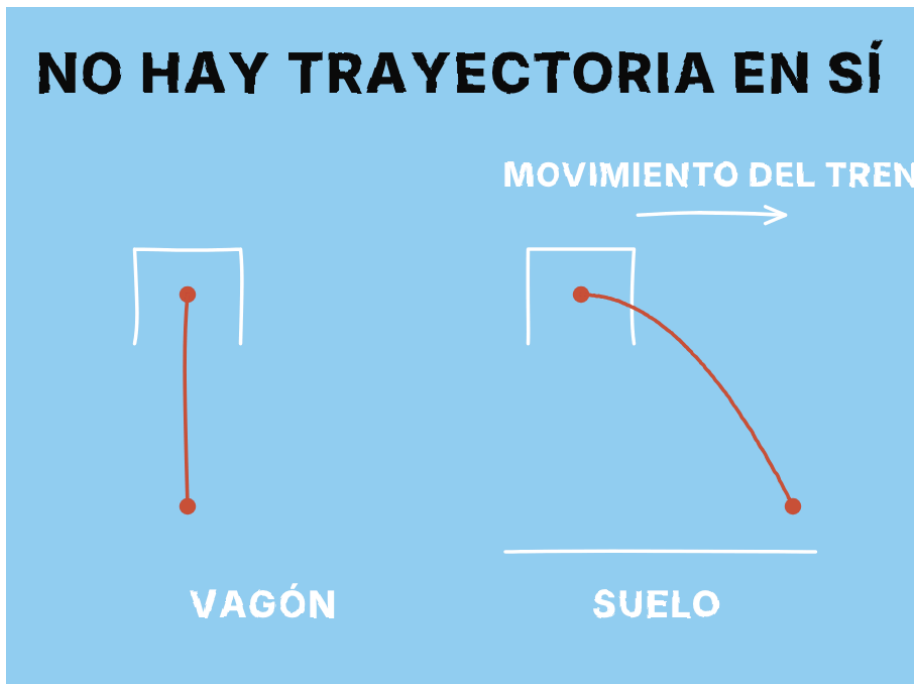
3. ¿Qué supuesto sobre la geometría subyace a toda descripción de dónde están las cosas, y dónde se encontró este curso con él por primera vez?

Pista: Recuerde lo que se aceptó a prueba en la primera parte.

Respuesta: Toda descripción de ese tipo refiere los sucesos a un cuerpo rígido y supone que la geometría euclidiana corriente vale para los segmentos, dos marcas sobre un cuerpo rígido. Es la verdad física de la geometría aceptada a prueba en la primera parte, que descansa en una experiencia imperfecta y cuyos límites aparecen en la teoría de la relatividad general.

No hay trayectoria en sí

Siéntese junto a la ventanilla de un tren que avanza suavemente y deje caer una piedra de la mano. La ve caer en línea recta hasta el terraplén. Un caminante junto a la vía ve la misma piedra caer en una curva, arrastrada hacia adelante con el tren mientras cae. Una piedra, dos testigos, dos trayectorias, y esta sección pregunta cuál de ellas es real.



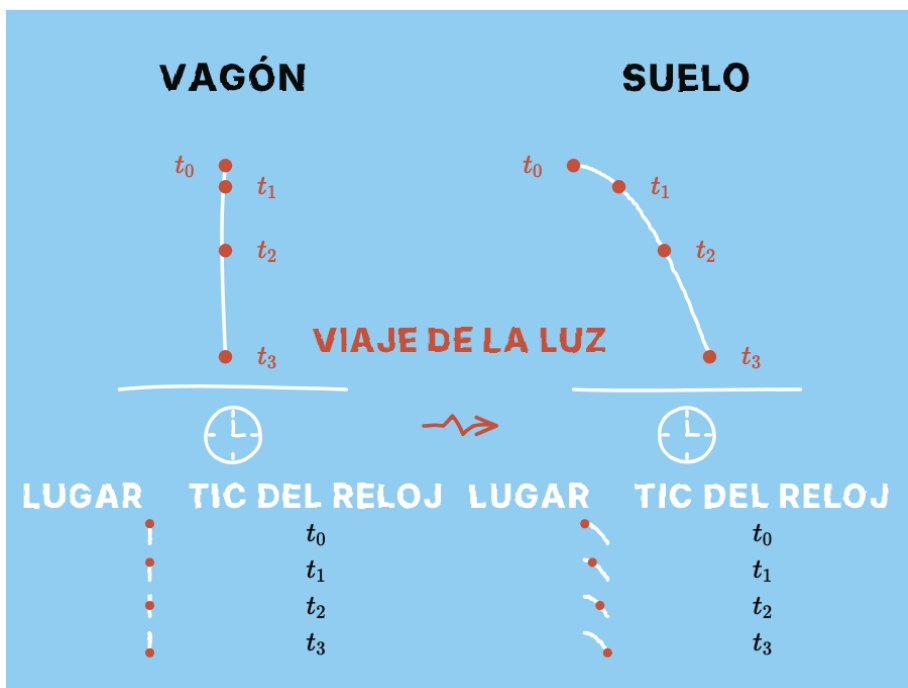
Una piedra, dos cuerpos de referencia

Einstein empieza confesando que la formulación habitual de lo que hace la mecánica, describir cómo los cuerpos cambian su lugar en el

espacio con el tiempo, peca contra la claridad. El problema se esconde en las palabras «lugar» y «espacio». ¿Los lugares por los que pasa la piedra están realmente sobre una recta o sobre una curva, y qué significa siquiera moverse «en el espacio»?

Una sola idea responde a ambas preguntas. «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 lo que la sección anterior nos enseñó a dar, 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, 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. Quite el cuerpo de referencia de la frase y la frase no dice nada. Un receptor de satélites vive por esta regla; informa de su movimiento respecto a la superficie de la Tierra, así que un pasajero de tren lee cien kilómetros por hora mientras está quieto respecto al vagón, y ningún número es erróneo.

Lo que se sigue en la práctica es un segundo requisito. Una trayectoria todavía no es un movimiento; hay que decir también cuándo está la piedra en cada punto de ella, y esos instantes deben ser cosas que puedan medirse, no números sacados del aire. En la mecánica corriente Einstein 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. Una lista de lugares emparejados con tics es una descripción completa del movimiento respecto a ese cuerpo de referencia.



Emparejar cada lugar con un tiempo

Einstein cierra con dos advertencias dejadas para más adelante: emparejar un tic con un lugar ignora que la luz tarda en viajar, 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 se las toma en serio. Quedan fuera aquí las notas de Einstein sobre cómo una recta se define por la distancia mínima sobre un cuerpo rígido y sobre las reglas divididas; están al final de la tercera sección. Así que este tramo del libro se detiene donde se detiene su argumento: 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 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. 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
 - b. La recta, porque la piedra se soltó sin impulso
 - c. Ninguna: no hay trayectoria en sí, solo una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia
2. ¿Por qué sustituye Einstein «movimiento en el espacio» por «movimiento respecto a un cuerpo rígido de referencia»?
 - a. Porque a la palabra «espacio» no asociamos ninguna idea clara, mientras que los lugares respecto a un cuerpo de

referencia ya estaban definidos

- b. Porque el espacio está curvado y no puede medirse
 - c. Porque el tren se mueve por el espacio más deprisa que el caminante
 - d. Porque los cuerpos rígidos son más fáciles de dibujar
3. ¿Qué segundo requisito convierte una trayectoria en una descripción del movimiento?
- a. La masa de la piedra y la fuerza que actúa sobre ella
 - b. Decir cuándo está la piedra en cada punto de la trayectoria, como algo que puede medirse
 - c. La velocidad del tren respecto al suelo
4. ¿Cómo se obtienen los instantes en la mecánica corriente, en el ejemplo de Einstein?
- a. De un único reloj en el terraplén
 - b. Calculando a partir de la altura que ha caído la piedra
 - c. De dos relojes idénticos, anotando cada observador dónde está la piedra en su propio cuerpo de referencia en cada tic
 - d. Cronometrando la luz que viene de la piedra

Respuestas

1. c) Ninguna trayectoria es la real mientras la otra es una ilusión; no hay trayectoria en sí, solo una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado.

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 lo que la sección anterior nos enseñó a dar.

3. b) Una trayectoria todavía no es un movimiento; hay que decir también cuándo está la piedra en cada punto de ella, y esos instantes deben ser cosas que puedan medirse, no números sacados del aire.

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

Ejercicios

1. Describa la trayectoria de la piedra 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. ¿Por qué una lista de lugares emparejados con tics del reloj es una descripción completa del movimiento, mientras que la trayectoria sola no lo es?

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

Respuesta: La trayectoria sola dice por dónde pasó la piedra pero no cuándo. La lista da el instante en cada punto, y como cada instante es un tic de un reloj en la mano del observador, es algo medido, que es lo que exige una descripción completa.

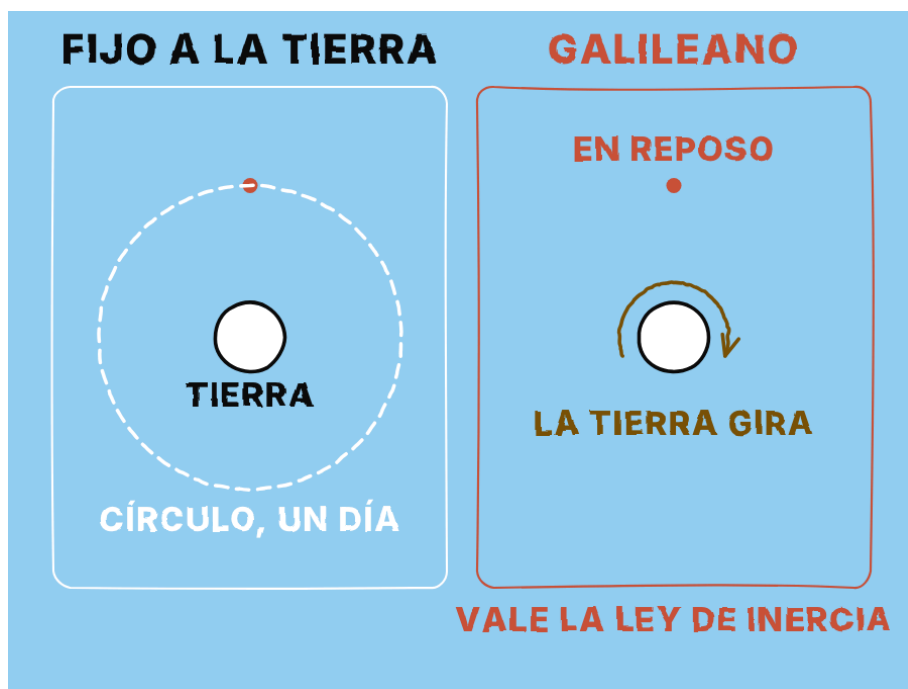
3. ¿Qué dos dificultades deja Einstein de lado al final de esta sección, y por qué puede permitírselo por ahora?

Pista: Piense en cómo ve el caminante la piedra en el instante de un tic.

Respuesta: Emparejar un tic con un lugar ignora que la luz tarda en viajar, así que la piedra se ve donde estaba hace un instante; y acecha una segunda dificultad que aún no nombra. Las deja de lado porque por ahora se sitúa en el terreno de la mecánica corriente, y promete tratar ambas con detalle más adelante en el libro.

¿Qué cuerpos de referencia están permitidos?

Una cámara dejada abierta sobre el cielo nocturno durante una hora muestra cada estrella como un arco de círculo, aunque nada empuja a las estrellas. Esta sección responde a una sola pregunta: ¿qué cuerpos de referencia puede usar la física para describir el movimiento?



Círculos o reposo

Todo descansa en la ley de inercia: un cuerpo alejado de todos los demás permanece en reposo o se mueve uniformemente en línea recta. Como una trayectoria solo es una trayectoria respecto a un

cuerpo de referencia, la ley es también una regla sobre cuerpos de referencia. Respecto a un sistema fijo a la Tierra, las estrellas fijas giran una vez al día, contra la ley tal como está enunciada; Einstein conserva la ley y renuncia a la Tierra como cuerpo de referencia.

Lo que se sigue en la práctica: el movimiento puede referirse solo a cuerpos de referencia respecto a los cuales las estrellas fijas no giran. Un sistema así, 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 esos. La navegación por satélite calcula sus órbitas en un sistema así, con ejes fijos en las estrellas, antes de traducir a la Tierra que gira. Queda fuera aquí solo la formulación de la ley por el propio Einstein; está en la cuarta sección del libro. Así las cuatro primeras secciones terminan con los cuerpos de referencia clasificados, y esa clasificación es donde empieza el resto del libro.

Para recordar

La ley de inercia es una regla sobre cuerpos de referencia tanto como sobre cuerpos. La Tierra no es uno en el que valga, puesto que las estrellas fijas giran respecto a ella. Los cuerpos de referencia en los que vale la ley son sistemas de coordenadas galileanos, 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.