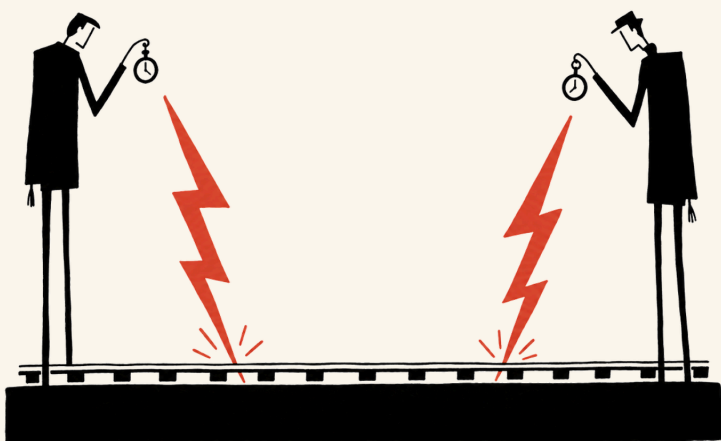


Sobre la teoría de la relatividad especial y general



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

Contenido físico de los teoremas geométricos

El sistema de coordenadas

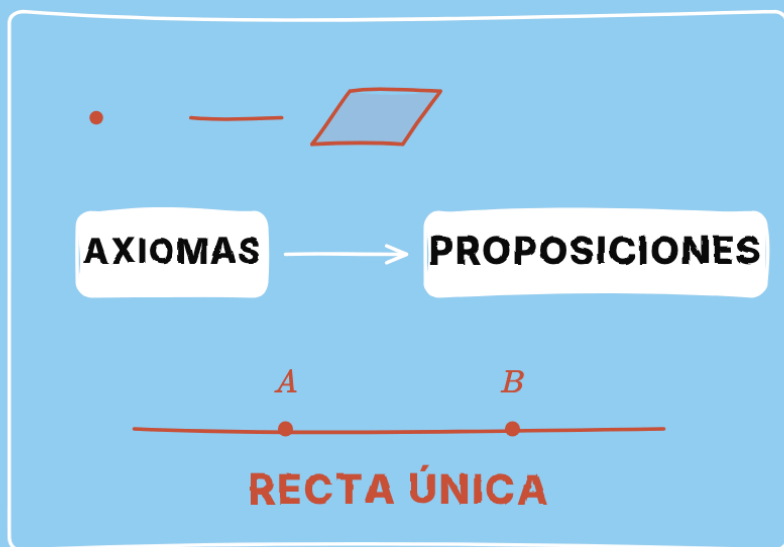
Espacio y tiempo en la mecánica clásica

El sistema de coordenadas de Galileo

Contenido físico de los teoremas geométricos

Seguramente también tú, querido lector, de niño o de niña trabaste conocimiento con el orgulloso edificio de la geometría de Euclides, y recuerdas quizá con más respeto que cariño aquella orgullosa construcción, por cuyas altas escaleras te hicieron correr durante incontables horas profesores concienzudos. Seguramente, en virtud de ese pasado tuyo, castigarías con desprecio a cualquiera que declarase falsa aun la más remota proposición de esta ciencia. Pero ese sentimiento de orgullosa seguridad te abandonaría quizá al instante si alguien te preguntara: «¿Qué quieres decir con la afirmación de que estas proposiciones son verdaderas?» Detengámonos un poco en esta pregunta.

GEOMETRÍA PURA



Dentro de la geometría pura

La geometría parte de ciertos conceptos fundamentales, como plano, punto, recta, con los que somos capaces de asociar ideas más o menos definidas, y de ciertas proposiciones simples, los axiomas, que, sobre la base de esas ideas, nos inclinamos a aceptar como «verdaderas». Todas las demás proposiciones se reducen entonces a esos axiomas, es decir, se demuestran, mediante un método lógico cuya legitimidad nos sentimos obligados a reconocer. Una proposición es entonces correcta, o «verdadera», cuando se ha deducido de los axiomas de la manera reconocida. La cuestión de la «verdad» de las distintas proposiciones geométricas conduce, pues, a la cuestión de la «verdad» de los axiomas. Pero desde hace mucho se sabe que esta última cuestión no solo no puede responderse con los métodos de la geometría, sino que en sí misma carece por completo de sentido. No

se puede preguntar si es verdad que por dos puntos pasa una sola recta. Solo se puede decir que la geometría euclidiana trata de entes que llama «rectas» y a los que atribuye la propiedad de quedar determinados unívocamente por dos de sus puntos. El concepto «verdadero» no se ajusta a los enunciados de la geometría pura, porque con la palabra «verdadero» solemos designar, en última instancia, la concordancia con un objeto «real»; la geometría, en cambio, no se ocupa de la relación de sus conceptos con los objetos de la experiencia, sino solo de la conexión lógica de esos conceptos entre sí.

Que a pesar de ello nos sentimos inclinados a llamar «verdaderas» a las proposiciones de la geometría se explica fácilmente. A los conceptos geométricos corresponden, con mayor o menor exactitud, objetos de la naturaleza, y estos son sin duda la única causa del origen de aquellos conceptos. Puede la geometría, para dar a su edificio la mayor coherencia lógica posible, mantenerse apartada de ello; pero la costumbre de ver en un segmento, por ejemplo, dos lugares marcados sobre un cuerpo prácticamente rígido está profundamente arraigada en nuestros hábitos de pensamiento. Estamos además acostumbrados a considerar que tres lugares están sobre una recta cuando, eligiendo adecuadamente el punto de observación, podemos hacer coincidir sus posiciones aparentes al mirar con un solo ojo.

Si ahora, siguiendo ese hábito de pensamiento, añadimos a las proposiciones de la geometría euclidiana la única proposición de que a dos puntos de un cuerpo prácticamente rígido les corresponde siempre la misma distancia, el mismo segmento, cualesquiera que sean los cambios de posición que hagamos con el cuerpo, entonces las proposiciones de la geometría euclidiana se convierten en proposiciones sobre la posible disposición relativa de cuerpos

prácticamente rígidos. La geometría así completada debe tratarse entonces como una rama de la física. Ahora sí puede preguntarse con razón por la «verdad» de las proposiciones geométricas así interpretadas, pues puede preguntarse si esas proposiciones se cumplen para las cosas reales que hemos asignado a los conceptos geométricos. Con cierta inexactitud podemos decir, pues, que por «verdad» de una proposición geométrica en este sentido entendemos que se cumple en una construcción con compás y regla.

La convicción de la «verdad» de las proposiciones geométricas en este sentido descansa, naturalmente, de manera exclusiva en experiencias bastante imperfectas. Supondremos por ahora esa verdad de las proposiciones geométricas, para ver después, en la última parte de nuestras consideraciones, en la teoría de la relatividad general, que esa verdad tiene sus límites y en qué medida los tiene.

Preguntas

1. Dentro de la propia geometría, ¿cuándo se llama verdadera a una proposición?
 - a. Cuando concuerda con mediciones hechas sobre cuerpos reales
 - b. Cuando se ha deducido de los axiomas de la manera reconocida
 - c. Cuando todo lector atento la encuentra evidente
2. ¿Por qué dice el autor que el concepto «verdadero» no se ajusta a los enunciados de la geometría pura?

- a. Porque nadie ha demostrado nunca sus axiomas
 - b. Porque «verdadero» designa la concordancia con un objeto real, y la geometría pura trata solo de la conexión lógica de sus conceptos
 - c. Porque las ideas que asociamos a punto y recta son demasiado vagas
 - d. Porque las construcciones geométricas nunca son exactas
3. ¿Qué única proposición, añadida a la geometría euclidiana, la convierte en una rama de la física?
- a. Que a dos puntos de un cuerpo prácticamente rígido les corresponde siempre la misma distancia, cualesquiera que sean los cambios de posición del cuerpo
 - b. Que tres lugares están en una recta cuando parecen coincidir al mirar con un solo ojo
 - c. Que una construcción con compás y regla siempre es posible
 - d. Que los objetos de la naturaleza son la única causa de los conceptos geométricos
4. ¿En qué descansa la convicción de la verdad de las proposiciones geométricas, en el sentido físico?
- a. En la coherencia lógica del edificio de la geometría
 - b. En que los axiomas parecen evidentes
 - c. En una experiencia bastante imperfecta, supuesta por ahora

Respuestas

1. **b)** Una proposición es correcta, o verdadera, cuando se ha deducido de los axiomas de la manera reconocida; la cuestión de su verdad conduce así a la verdad de los axiomas.

2. b) Con la palabra verdadero designamos, en última instancia, la concordancia con un objeto real; la geometría se ocupa solo de la conexión lógica de sus conceptos entre sí, no de su relación con los objetos de la experiencia.

3. a) Con esa única proposición añadida, las proposiciones de la geometría euclidiana se convierten en proposiciones sobre la posible disposición relativa de cuerpos prácticamente rígidos, y la geometría así completada debe tratarse como una rama de la física.

4. c) La convicción descansa exclusivamente en una experiencia bastante imperfecta; el autor supone esa verdad por ahora, para mostrar después, en la teoría de la relatividad general, dónde tiene sus límites.

Ejercicios

1. Explique con sus propias palabras por qué la pregunta «¿Es verdad que por dos puntos pasa una sola recta?» no puede plantearse dentro de la geometría pura, mientras que sí puede preguntarse si un triángulo dibujado cumple el teorema de Pitágoras.

Pista: Pregúntese, de cada cuestión, si trata de conceptos o de objetos reales.

Respuesta: La geometría pura trata de entes que llama rectas y les atribuye por definición la propiedad de quedar determinados por dos de sus puntos; preguntar si eso es verdad sería pedir concordancia con un objeto real, de lo que la geometría pura no se ocupa. El triángulo dibujado es una cosa real asignada a los conceptos geométricos, así que preguntar si la proposición se cumple en él es una pregunta sobre la concordancia con la realidad, y tiene sentido.

2. El autor dice que nos sentimos inclinados a llamar verdaderas a las proposiciones geométricas, y que esto se explica fácilmente. Dé la explicación, con los dos hábitos de pensamiento que menciona.

Pista: ¿De dónde surgieron en primer lugar los conceptos de la geometría?

Respuesta: A los conceptos geométricos corresponden, con mayor o menor exactitud, objetos de la naturaleza, que son la única causa de su origen. Dos hábitos lo muestran: vemos en un segmento dos lugares marcados sobre un cuerpo prácticamente rígido, y consideramos que tres lugares están en una recta cuando, desde un punto de observación adecuado, sus posiciones aparentes coinciden al mirar con un solo ojo.

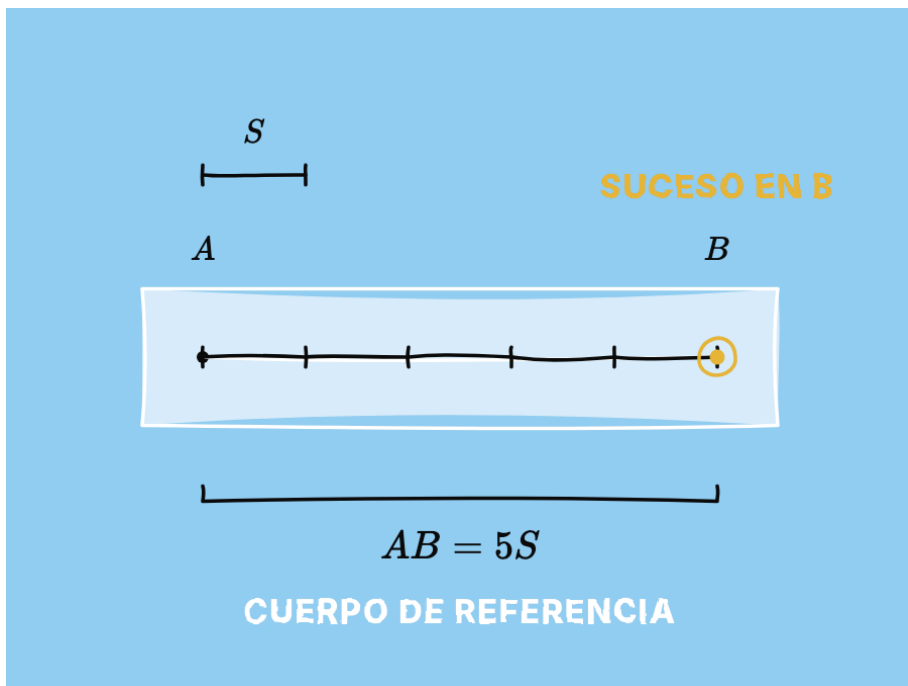
3. ¿En qué sentido, algo inexacto, dice el autor que podemos entender la verdad de una proposición geométrica una vez que la geometría se trata como rama de la física, y por qué llama provisional a esa convicción?

Pista: Piense en lo que puede hacerse con compás y regla.

Respuesta: Su verdad significa que se cumple en una construcción con compás y regla, es decir, para las cosas reales asignadas a los conceptos geométricos. La convicción descansa solo en una experiencia bastante imperfecta, por lo que se supone por ahora; la teoría de la relatividad general, al final del libro, mostrará que tiene límites y en qué medida.

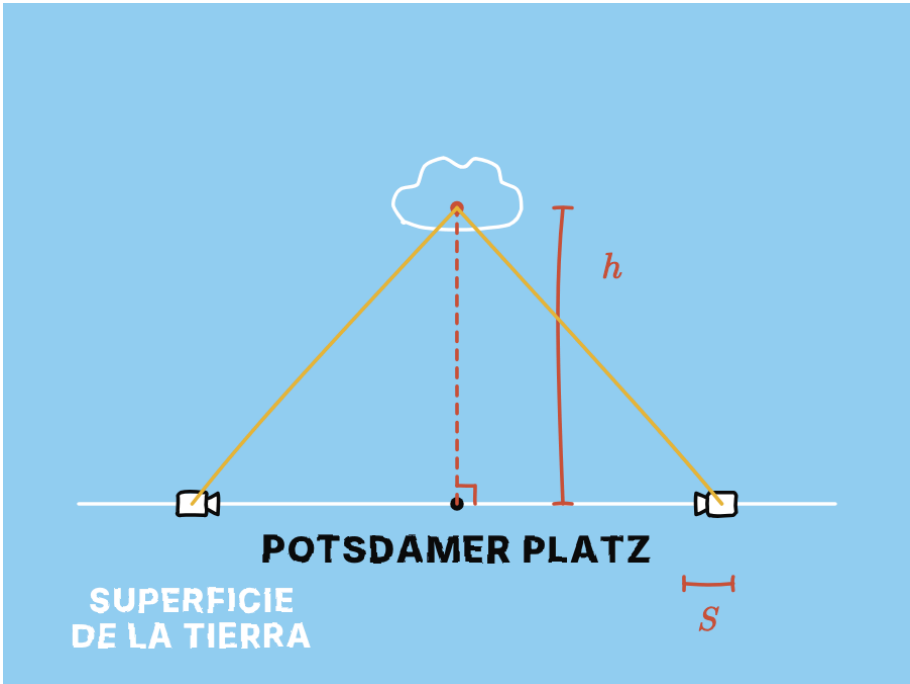
El sistema de coordenadas

Sobre la base de la interpretación física de la distancia que acabamos de indicar, estamos también en condiciones de establecer por medición la distancia entre dos puntos de un cuerpo rígido. Para ello necesitamos un segmento que usaremos de una vez por todas, una varilla S , que sirve de unidad de medida. Si ahora A y B son dos puntos de un cuerpo rígido, la recta que los une puede construirse según las leyes de la geometría; luego, sobre esa recta, puede llevarse el segmento S desde A tantas veces como haga falta para llegar a B . El número de repeticiones de ese traslado es la medida del segmento AB . En esto descansa toda medición de longitudes.



Medir sobre un cuerpo de referencia

Toda descripción espacial del lugar de un suceso o de un objeto se basa en que se indica el punto de un cuerpo rígido, el cuerpo de referencia, con el que ese suceso coincide. Esto vale no solo para la descripción científica, sino también para la vida diaria. Si analizo la indicación de lugar «en Berlín, en la Potsdamer Platz», significa lo siguiente. La superficie de la Tierra es el cuerpo rígido al que se refiere la indicación de lugar; sobre ella, «Potsdamer Platz en Berlín» es un punto marcado y provisto de nombre con el que el suceso coincide espacialmente.



Del lugar con nombre a la altura

Esta manera primitiva de indicar un lugar conoce solo lugares en la superficie de cuerpos rígidos y está ligada a la existencia de puntos distinguibles de esa superficie. Veamos cómo la mente humana se libera de estas dos restricciones sin que la naturaleza de la indicación de lugar sufra cambio alguno. Si, por ejemplo, una nube flota sobre la Potsdamer Platz, su lugar, referido a la superficie de la Tierra, puede fijarse levantando en la plaza un poste vertical que llegue hasta la nube. La longitud del poste, medida con la unidad de medida, junto con la indicación del lugar del pie del poste, es entonces una indicación de lugar completa. En este ejemplo vemos por qué camino se ha producido un refinamiento del concepto de lugar.

Primero, el cuerpo rígido al que se refiere la indicación de lugar se prolonga de tal modo que el objeto que se quiere localizar es alcanzado por el cuerpo rígido completado. Segundo, para caracterizar el lugar se usa un número en vez de puntos de referencia con nombre; aquí, la longitud del poste medida con la unidad de medida. Tercero, se habla de la altura de la nube incluso cuando no se ha levantado poste alguno que llegue hasta ella. En nuestro caso se determina, a partir de fotografías ópticas de la nube tomadas desde distintos lugares del suelo y teniendo en cuenta las propiedades de la propagación de la luz, qué longitud habría que dar al poste para que alcanzara la nube.

De esta consideración se ve que para la descripción de lugares será ventajoso lograr, mediante el uso de números medidos, independizarse de la existencia de puntos de referencia con nombre sobre el cuerpo rígido al que se refiere la indicación de lugar. La física que mide lo consigue aplicando el sistema de coordenadas cartesiano.

Este consiste en tres paredes planas rígidas, perpendiculares entre sí, unidas en un solo cuerpo rígido. El lugar de cualquier suceso respecto al sistema de coordenadas se describe, en esencia, indicando las longitudes de las tres perpendiculares, o coordenadas (x, y, z) , que pueden trazarse desde el suceso hasta esas tres paredes planas. Las longitudes de esas tres perpendiculares pueden determinarse mediante una sucesión de manipulaciones con varillas rígidas, manipulaciones prescritas por las leyes y los métodos de la geometría euclidiana.

En las aplicaciones, las paredes rígidas que forman el sistema de coordenadas casi nunca se construyen; y las coordenadas tampoco se determinan realmente con construcciones de varillas rígidas, sino de

manera indirecta. El sentido físico de las indicaciones de lugar debe, sin embargo, buscarse siempre conforme a las consideraciones anteriores, si los resultados de la física y de la astronomía no han de disolverse en la vaguedad.

Resulta, pues, lo siguiente: toda descripción espacial de sucesos se sirve de un cuerpo rígido al que los sucesos se refieren espacialmente. Esa referencia presupone que para los «segmentos» valen las leyes de la geometría euclidiana, donde el «segmento» está representado físicamente por dos marcas sobre un cuerpo rígido.

Preguntas

1. ¿Qué es la medida del segmento AB, según el pasaje?
 - a. El número de veces que hay que llevar la varilla unidad S a lo largo de la recta de A a B
 - b. El tiempo que una señal necesita para ir de A a B
 - c. El número de marcas con nombre que hay entre A y B
2. ¿Qué significa la indicación de lugar «en Berlín, en la Potsdamer Platz» cuando se analiza?
 - a. Que el suceso está a cierta distancia del centro de la Tierra
 - b. Que el suceso coincide espacialmente con un punto marcado y con nombre de un cuerpo rígido, la superficie de la Tierra
 - c. Que el suceso tiene tres coordenadas referidas a paredes perpendiculares
 - d. Que podría levantarse un poste en la plaza para alcanzar el suceso

3. La altura de una nube se obtiene a partir de fotografías tomadas desde varios lugares del suelo. ¿Qué refinamiento del concepto de lugar ilustra esto?
 - a. Prolongar el cuerpo rígido hasta alcanzar el objeto
 - b. Usar un número en vez de marcas con nombre
 - c. Hablar de una altura aunque no se haya levantado ningún poste que llegue a la nube
 - d. Tratar la nube como un punto del cuerpo de referencia
4. ¿Por qué el sentido físico de las indicaciones de lugar debe buscarse siempre en varillas y cuerpos rígidos, aunque las coordenadas se determinen casi siempre de manera indirecta?
 - a. Porque las determinaciones indirectas nunca son bastante exactas
 - b. Porque las tres paredes rígidas siempre se construyen realmente
 - c. Porque de lo contrario los resultados de la física y de la astronomía se disuelven en la vaguedad

Respuestas

1. **a)** Sobre la recta que une A y B se lleva el segmento S desde A tantas veces como haga falta para llegar a B; el número de repeticiones es la medida del segmento, y en esto descansa toda medición de longitudes.
2. **b)** La superficie de la Tierra es el cuerpo rígido al que se refiere la indicación; sobre ella, Potsdamer Platz en Berlín es un punto marcado y provisto de nombre con el que el suceso coincide espacialmente.
3. **c)** Se habla de la altura de la nube incluso cuando no existe poste alguno que llegue a ella; a partir de las fotografías, teniendo en cuenta cómo se propaga la luz, se determina qué longitud tendría que tener el poste.

4. c) Las paredes casi nunca se construyen y las coordenadas se encuentran de manera indirecta, pero su sentido físico debe buscarse conforme a las construcciones con varillas, o los resultados de la física y de la astronomía se disuelven en la vaguedad.

Ejercicios

1. Describa con sus propias palabras en qué consiste el sistema de coordenadas cartesiano y qué son las tres coordenadas de un suceso, y diga cómo se determinan, en principio, sus valores.

Pista: Parta de tres paredes planas rígidas y pregúntese qué puede trazarse desde el suceso hasta cada una.

Respuesta: Consiste en tres paredes planas rígidas, perpendiculares entre sí, unidas en un solo cuerpo rígido. El lugar de un suceso se describe por las longitudes de las tres perpendiculares trazadas desde el suceso hasta las paredes, las coordenadas x , y , z . Esas longitudes se determinan, en principio, mediante una sucesión de manipulaciones con varillas rígidas prescritas por las leyes y los métodos de la geometría euclidiana.

2. La manera primitiva de indicar un lugar está ligada a dos restricciones. Nómbrelas y explique cómo el poste levantado en la Potsdamer Platz nos libera de cada una sin cambiar la naturaleza de una indicación de lugar.

Pista: ¿Qué puede y qué no puede localizar «Potsdamer Platz en Berlín»?

Respuesta: Conoce solo lugares en la superficie de cuerpos rígidos y necesita puntos distinguibles y con nombre en esa superficie. El poste prolonga el cuerpo rígido hacia arriba, de modo que la nube, fuera de la superficie, es alcanzada; y la longitud medida del poste, un número, sustituye a una marca con nombre. La indicación sigue nombrando un punto de un cuerpo rígido con el que la nube coincide, así que su naturaleza no cambia.

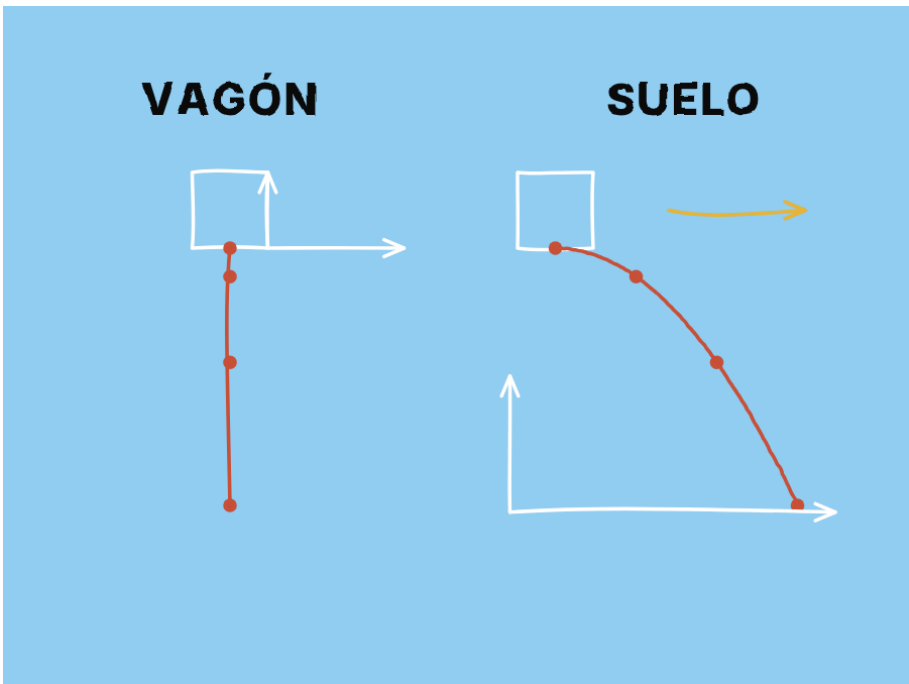
3. Enuncie la conclusión a la que llega el pasaje sobre toda descripción espacial de sucesos y diga qué presupone esa descripción acerca de los segmentos.

Pista: Dos frases al final del pasaje llevan todo el resultado.

Respuesta: Toda descripción espacial de sucesos se sirve de un cuerpo rígido al que los sucesos se refieren espacialmente. Esa referencia presupone que para los segmentos valen las leyes de la geometría euclidiana, donde un segmento está representado físicamente por dos marcas sobre un cuerpo rígido.

Espacio y tiempo en la mecánica clásica

Si, sin serios reparos ni explicaciones detalladas, formulo la tarea de la mecánica así: «La mecánica debe describir cómo los cuerpos cambian su lugar en el espacio con el tiempo», cargo sobre mi conciencia algunos pecados mortales contra el santo espíritu de la claridad; esos pecados deben descubrirse primero.



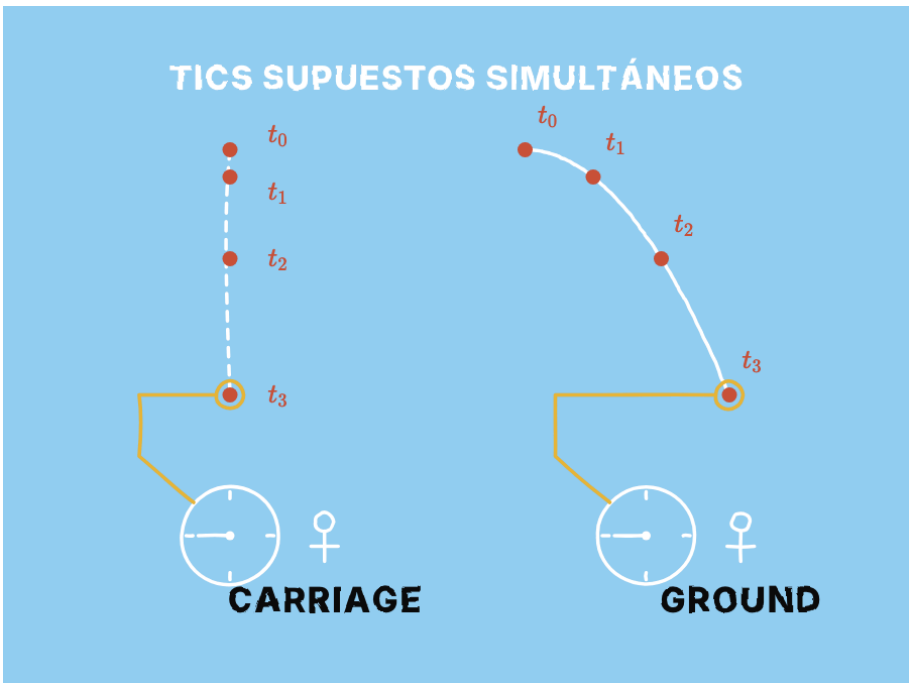
Una caída, dos trayectorias

No está claro qué debe entenderse aquí por «lugar» y por «espacio». Estoy en la ventanilla de un vagón de ferrocarril que viaja uniformemente y dejo caer una piedra sobre el terraplén, sin darle

impulso alguno. Entonces veo, prescindiendo de la influencia de la resistencia del aire, que la piedra cae en línea recta. Un peatón que observa la fechoría desde el sendero advierte que la piedra cae a tierra en un arco de parábola. Ahora pregunto: ¿los «lugares» que recorre la piedra están «en realidad» sobre una recta o sobre una parábola? ¿Qué significa aquí, además, movimiento «en el espacio»? Tras las consideraciones de la sección anterior, la respuesta es evidente por sí misma. Ante todo dejamos enteramente de lado la oscura palabra «espacio», con la que, si somos sinceros, no podemos pensar absolutamente nada; en su lugar ponemos «movimiento respecto a un cuerpo de referencia prácticamente rígido». Los lugares respecto al cuerpo de referencia, el vagón o el suelo, ya quedaron definidos en detalle en la sección anterior. Si en vez de «cuerpo de referencia» introducimos el concepto de «sistema de coordenadas», útil para la descripción matemática, podemos decir: la piedra describe una recta respecto a un sistema de coordenadas rígidamente unido al vagón, y una parábola respecto a un sistema de coordenadas rígidamente unido al suelo. En este ejemplo se ve claramente que no existe una trayectoria en sí, sino solo una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado.

Pero una descripción completa del movimiento solo se logra cuando se indica cómo el cuerpo cambia su lugar con el tiempo; es decir, para cada punto de la trayectoria debe indicarse en qué instante se encuentra allí el cuerpo. Estas indicaciones deben completarse con una definición del tiempo tal que, en virtud de esa definición, esos valores del tiempo puedan considerarse magnitudes observables en principio, resultados de mediciones. Situados en el terreno de la mecánica clásica, cumplimos este requisito para nuestro ejemplo de la siguiente manera. Imaginamos dos relojes de construcción

exactamente igual; uno lo tiene en la mano el hombre de la ventanilla del vagón, el otro el hombre del sendero. Cada uno de ellos determina en qué lugar de su cuerpo de referencia se encuentra la piedra en el momento en que hace tic el reloj que tiene en la mano. Al hacerlo renunciamos a entrar en la inexactitud que introduce la finitud de la velocidad de propagación de la luz. De esto, y de una segunda dificultad que aquí se presenta, se hablará en detalle más adelante.

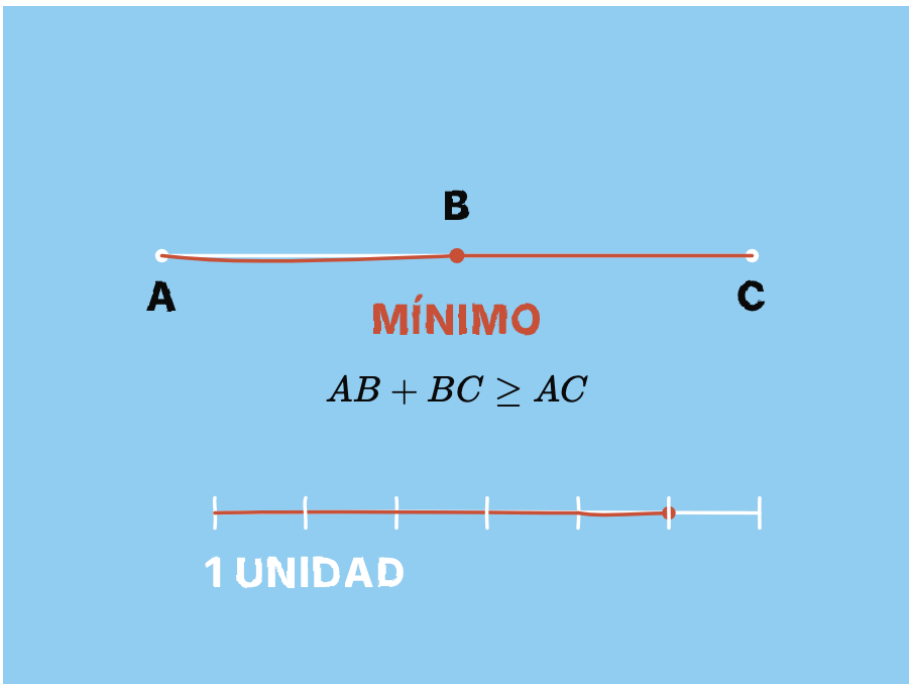


Posiciones emparejadas con tiempos

Notas.

Con ello también se ha asignado a la línea recta un objeto natural. Tres puntos A, B, C de un cuerpo rígido están sobre una recta cuando, dados los puntos A y C, el punto B se elige de modo que la suma de las

distancias AB y BC sea lo más pequeña posible. Esta indicación incompleta puede bastar en este contexto.



Rectitud y reglas divididas

Aquí se supone, ciertamente, que la medición sale exacta, es decir, que da un número entero. De esta dificultad nos liberamos usando reglas divididas, cuya introducción no exige ningún método nuevo en principio.

No es necesaria aquí una investigación más detenida de lo que significa «coincidencia espacial», pues este concepto es claro en la medida en que, en cada caso real concreto, difícilmente surgirán discrepancias sobre si se cumple o no.

Solo la teoría de la relatividad general, tratada en la segunda parte de este librito, hace necesario un refinamiento y una modificación de estas concepciones.

Preguntas

1. La piedra soltada desde la ventanilla del vagón cae en línea recta para el hombre de la ventanilla y en arco de parábola para el peatón. ¿Sobre qué trayectoria están los lugares de la piedra «en realidad»?
 - a. Sobre la parábola, porque el suelo está en reposo
 - b. Sobre la recta, porque a la piedra no se le dio impulso
 - c. Sobre ninguna: solo hay una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado
2. ¿Por qué el autor deja de lado la palabra «espacio» y habla en cambio de movimiento respecto a un cuerpo de referencia prácticamente rígido?
 - a. Porque, si somos sinceros, con «espacio» no podemos pensar absolutamente nada, mientras que los lugares respecto a un cuerpo de referencia quedaron definidos en la sección anterior
 - b. Porque el espacio está curvado y no puede medirse con varillas rígidas
 - c. Porque el vagón y el suelo se mueven por el espacio a velocidades distintas
 - d. Porque los cuerpos de referencia son más fáciles de imaginar que el espacio vacío

3. ¿Qué falta todavía en una descripción del movimiento una vez conocida la trayectoria respecto a un cuerpo de referencia?
 - a. La masa de la piedra y la fuerza que actúa sobre ella
 - b. Para cada punto de la trayectoria, el instante en que el cuerpo está allí, definido como magnitud observable en principio
 - c. La velocidad del vagón respecto al suelo
4. ¿Cómo obtienen los dos observadores, en el terreno de la mecánica clásica, los tiempos para sus descripciones?
 - a. Leen un único reloj colocado en el terraplén
 - b. Cada uno tiene uno de dos relojes de igual construcción y anota dónde está la piedra en su cuerpo de referencia cuando su reloj hace tic
 - c. Calculan el tiempo a partir de la altura que ha caído la piedra
 - d. Miden cuánto tarda en llegarles la luz de la piedra

Respuestas

1. **c)** No existe una 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.
2. **a)** La oscura palabra espacio es una con la que no podemos pensar absolutamente nada; los lugares respecto a un cuerpo de referencia, el vagón o el suelo, ya quedaron definidos en detalle.
3. **b)** Una descripción completa solo se logra cuando se indica cómo el cuerpo cambia su lugar con el tiempo, y esos valores del tiempo deben, por su definición, contar como resultados de mediciones.
4. **b)** Dos relojes de construcción exactamente igual, uno en la ventanilla del vagón y otro en el sendero; cada observador determina en qué lugar de

su cuerpo de referencia está la piedra en el momento en que su propio reloj hace tic.

Ejercicios

1. Describa la trayectoria de la piedra respecto a un sistema de coordenadas unido al vagón y respecto a uno unido al suelo, y explique por qué la pregunta de cuál es la trayectoria real no tiene respuesta.

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 cae en un arco de parábola. No hay trayectoria en sí, solo una trayectoria respecto a un cuerpo de referencia determinado, así que una pregunta que no nombra ningún cuerpo de referencia no pregunta nada.

2. Las notas dicen que tres puntos A, B, C de un cuerpo rígido están sobre una recta cuando B se elige de modo que la suma de las distancias AB y BC sea lo más pequeña posible. Explique con sus palabras cómo esto asigna un objeto natural a la recta y en qué idea anterior se apoya.

Pista: Piense en lo que necesitaría para comparar la suma de dos distancias.

Respuesta: En vez de definir la rectitud con una imagen, la define por medición: entre los puntos del cuerpo rígido, los que hacen mínima la suma de AB y BC están sobre la recta que pasa por A y C. Se apoya en la medición de distancias llevando la varilla unidad, así que una recta pasa a ser algo que se encuentra con varillas sobre un cuerpo real.

3. ¿En qué inexactitud dice el autor que renuncia a entrar cuando un tic del reloj se empareja con el lugar de la piedra, y qué promete al respecto?

Pista: Pregúntese cómo sabe el peatón dónde está la piedra en el momento de un tic.

Respuesta: La inexactitud que introduce la velocidad finita de propagación de la luz: el observador ve la piedra por una luz que tardó en llegar. La deja aquí de lado, junto con una segunda dificultad, y promete tratar ambas en detalle más adelante.

El sistema de coordenadas de Galileo

Como es sabido, la ley fundamental de la mecánica de Galileo y Newton, conocida como ley de inercia, reza: un cuerpo suficientemente alejado de otros cuerpos persiste en el estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme. Esta proposición dice algo no solo sobre el movimiento de los cuerpos, sino también sobre los cuerpos de referencia o sistemas de coordenadas admisibles en la mecánica, que pueden usarse en la descripción mecánica. Cuerpos a los que la ley de inercia puede aplicarse con seguridad con gran aproximación son las estrellas fijas visibles. Si ahora usamos un sistema de coordenadas rígidamente unido a la Tierra, entonces respecto a él cada estrella fija describe, en el curso de un día astronómico, un círculo de radio enorme, en contradicción con el enunciado de la ley de inercia. Si, pues, nos atenemos a esta ley, podemos referir los movimientos solo a sistemas de coordenadas respecto a los cuales las estrellas fijas no realizan movimientos circulares. A un sistema de coordenadas cuyo estado de movimiento es tal que la ley de inercia vale respecto a él lo llamamos «sistema de coordenadas galileano». Solo para un sistema de coordenadas galileano pretenden validez las leyes de la mecánica de Galileo y Newton.



Círculos o reposo

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. ¿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
3. ¿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)** 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.
- 3. 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.