

Teoría de la relatividad

José Luis San Emeterio Peña



Teoría de la relatividad

José Luis San Emeterio Peña



Título de la obra:
Teoría de la relatividad

Autor:
José Luis San Emeterio Peña

Código JavaScript para el libro: [Joel Espinosa Longi](#), [IMATE](#), UNAM.

Recursos interactivos: [DescartesJS](#)

Fuentes: [Lato](#) y [UbuntuMono](#)

Imagen de portada: [jcomp - www.freepik.es](#)

Fórmulas matemáticas: [K^AT_EX](#)

Núcleo del libro interactivo: septiembre 2023



Esta obra está bajo una licencia [Creative Commons 4.0 internacional: Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual](#).
Todos los objetos interactivos y los contenidos de esta obra colectiva están protegidos por la Ley de Propiedad Intelectual.

Tabla de contenido

1. Introducción	4
2. Principio de la relatividad	6
2.1 Conclusiones sobre la teoría clásica relativista	7
3. El experimento de Michelson y Morley	9
3.1 El problema del campo magnético	10
3.2 Conclusiones sobre el fracaso de la teoría clásica	12
4. Principio de la Relatividad según Einstein	13
4.1 Dilatación del tiempo	14
4.2 Contracción del espacio	15
4.3 Composición de velocidades	16
4.4 Conclusiones sobre el nuevo principio relativista	17
5. Otras magnitudes relativistas	19
5.1 El momento lineal	19
5.2 Masa y energía	20
5.3 Energía térmica y masa de un gas	21
5.4 Energía solar	22
5.5 Conclusiones sobre otras magnitudes relativistas	23
6. Algunos impactos de la teoría	24
6.1 La posibilidad de viajes interestelares	24
6.2 El origen de la energía nuclear	25
6.3 Conclusiones sobre aplicaciones de la teoría	26
7. Evaluación - Paradoja 1	27
8. Evaluación - Paradoja 2	28
9. Evaluación - cuestionario	29

1. Introducción

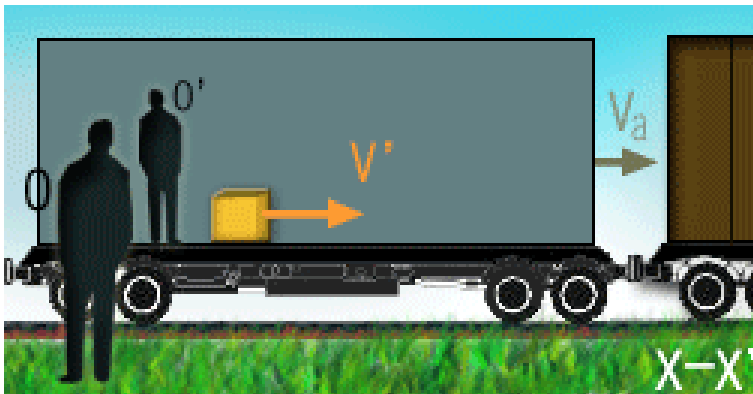
La Teoría de la Relatividad de Einstein se publicó en dos etapas:

En 1905 dio a conocer la Teoría de la Relatividad Especial, válida para sistemas de referencia inerciales.

En 1916 completó su trabajo con la Teoría de la Relatividad Generalizada, apta para cualquier sistema de referencia.

Nosotros trabajaremos sólo con la primera de las dos, la más sencilla y adecuada al currículo de Bachillerato.

No obstante es ya una teoría revolucionaria, una forma de pensar que nos hace comprender que la razón humana es capaz de elevarse por encima de nuestra intuición, de nuestro "sentido común", limitado en realidad por prejuicios no bien contrastados con la experiencia.



En la imagen vemos una caja amarilla que se mueve en el interior de un tren. El movimiento de este objeto es estudiado por dos observadores: Uno de ellos, O , está en reposo junto a la vía. Mientras que otro se mueve con el tren, aunque esté quieto en su interior.

Cada observador tiene su propio sistema de coordenadas y su reloj para estudiar el movimiento de la caja. ***Tratamos con dos sistemas de referencia en movimiento relativo.***

Por otro lado, recordemos el primero de los principios de la Dinámica de Newton , el principio de inercia, que podemos enunciar así: ***Para que un cuerpo posea aceleración debe actuar una fuerza exterior sobre él.***

Si desde un sistema de referencia se cumple este principio, ***el sistema se considera inercial.***

¿Son todos los sistemas de referencia inerciales?.

Para responder esta pregunta es mejor que nos introduzcamos en el siguiente apartado, el Principio de Relatividad.

2. Principio de la relatividad

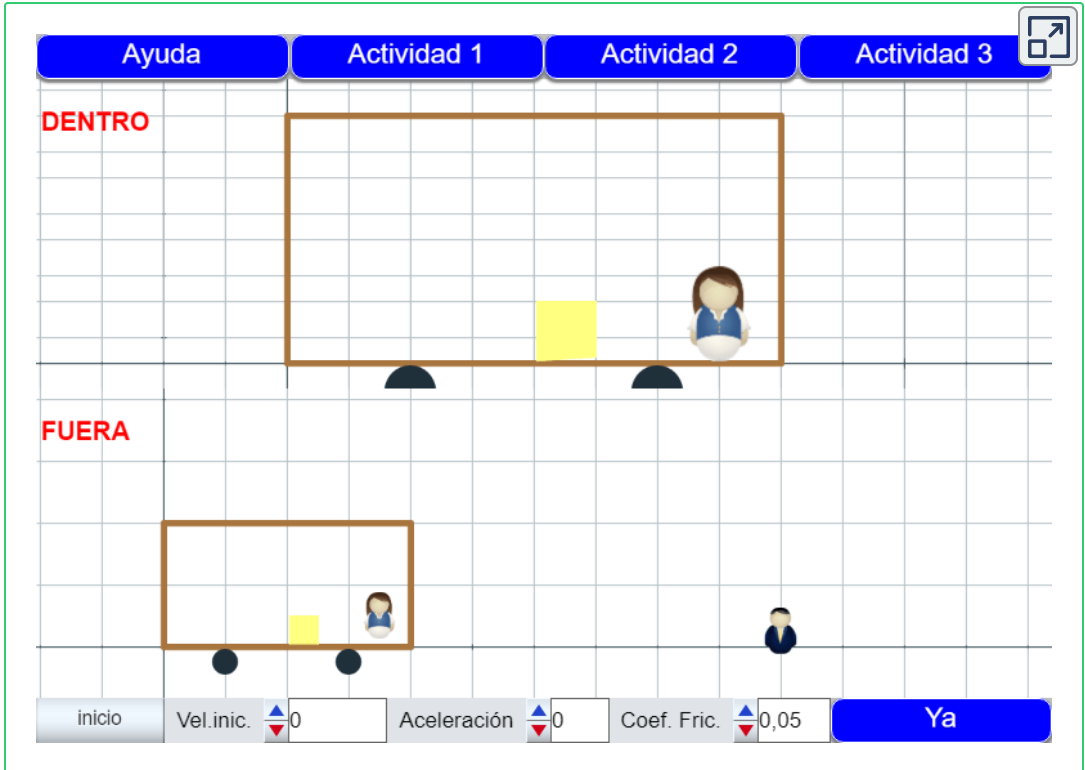


El principio de Relatividad clásico fue establecido por Galileo, para estudiar fenómenos desde diferentes sistemas de referencia. Para entenderlo, volveremos al caso del objeto que se mueve en un tren y es vigilado por un observador en el tren (sistema de referencia propio) y otro, en reposo, en el exterior.

En este caso trataremos de determinar las características del movimiento y comparar los resultados del movimiento de la caja desde el punto de vista de los dos observadores.

También podremos ver qué ocurre si aceleramos el movimiento del tren o si cambiamos el coeficiente de fricción entre la caja y el suelo del tren.

Para ello, observa la escena interactiva de la siguiente página. Es conveniente leer el contenido de la ayuda y seguir las actividades 1, 2 y 3. De esta forma llegaremos a entender claramente el contenido del Principio de Relatividad en su forma clásica, atribuido a Galileo.



2.1 Conclusiones sobre la teoría clásica relativista

El problema de la relatividad en la Física clásica consiste en comparar cómo se ven fenómenos físicos desde dos sistemas de referencia animados de movimiento uno respecto a otro. De la teoría clásica debemos retener estas nociones esenciales:

Sistemas de referencia inerciales

Se denominan así aquellos en los que se cumple el principio de inercia: Para que un cuerpo posea aceleración ha de actuar sobre el una fuerza exterior. En estos sistemas se cumplen, por extensión los otros dos principios de la Dinámica de Newton.

Referencia con movimiento uniforme

Si un sistema es inercial, también lo será cualquier otro que posea movimiento rectilíneo y uniforme respecto al anterior.

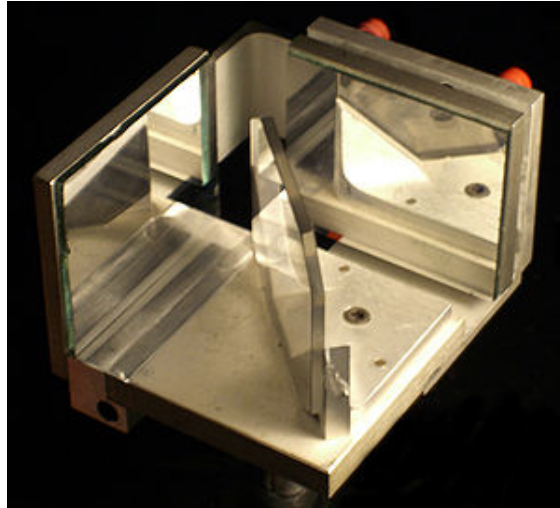
Sistemas no inerciales

Desde un sistema en movimiento acelerado respecto a uno inercial, se observan fuerzas falsas llamadas de inercia. Este tipo de sistemas con fuerzas ficticias es no inercial (pueden observarse aceleraciones sin fuerzas reales).

Principio de relatividad

Desde cualquier sistema de referencia inercial se observan las mismas leyes físicas (desde todos ellos se miden las mismas fuerzas).

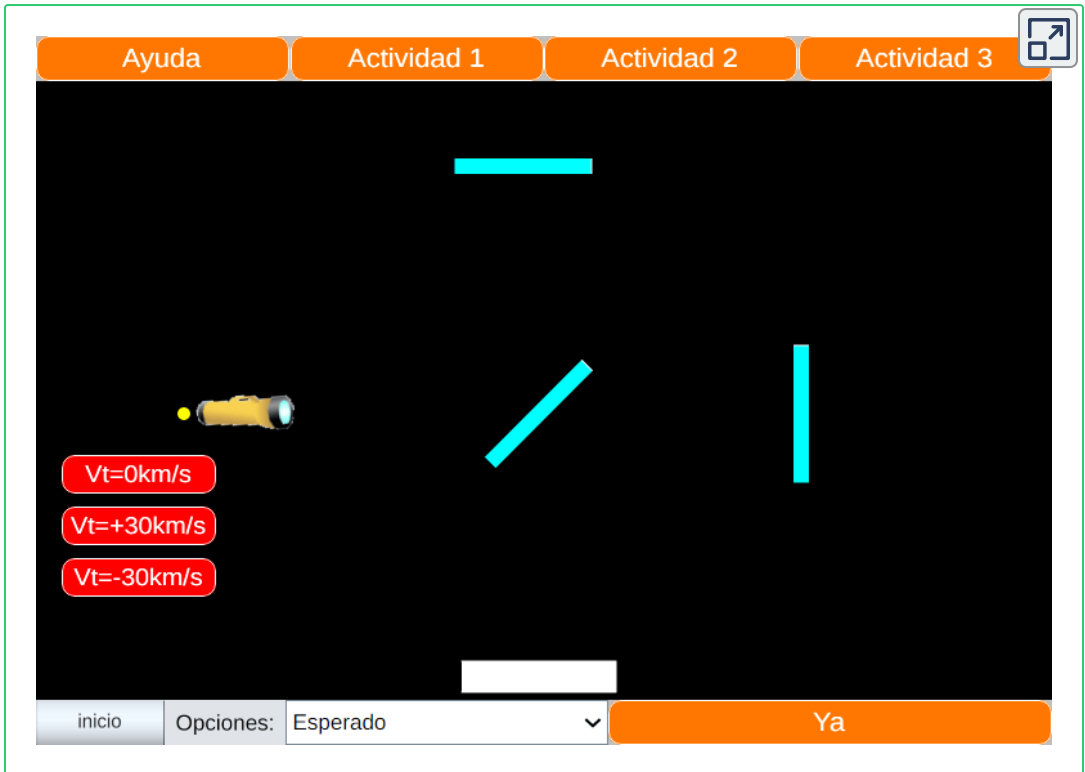
3. El experimento de Michelson y Morley



Cuando nuestro coche se cruza con otro, la velocidad relativa de uno respecto al otro es la suma de las dos velocidades. Del mismo modo, Si un coche nos adelanta, su velocidad respecto a nosotros es la diferencia de velocidades de los dos vehículos.

Con esta sencilla ley de suma de velocidades Michelson y Morley trataron de medir, entre 1881 y 1887, la velocidad de la Tierra respecto al éter, la supuesta sustancia inmóvil que debía servir de medio para la propagación de la luz. En su aparato, un haz de luz se separaba en dos al atravesar un elemento semireflectante.

Los dos haces seguían caminos diferentes que hacíamos converger en un detector donde podríamos observar la figura de interferencia entre ambos haces. En la siguiente página observamos una simulación del aparato. las actividades 1, 2 y 3 nos permiten reproducir el experimento. El experimento logró demostrar algo no previsto: el éter no existe y la luz no respeta la ley clásica de suma de velocidades.



3.1 El problema del campo magnético



Maxwell fue el gran monstruo que desarrolló la teoría del electromagnetismo en el siglo XIX. Su teoría, que aún utilizamos en nuestros aparatos, da lugar a una importante contradicción con la mecánica clásica que podemos ver bien así: Consideramos dos partículas de igual masa y carga que marchan en paralelo, con una velocidad igual. Ejercen dos fuerzas diferentes una sobre otra.

Por un lado actúa la repulsión electrostática, determinada por la ley de Coulomb. Por otro lado, hay entre las dos una fuerza de atracción magnética, determinada por la ley de Lorentz.

Entremos en la escena de la página siguiente para comprender la paradoja que se produce cuando buscamos a qué velocidad las dos fuerzas se equilibran. Pulsemos el botón de ayuda para entender la escena y realicemos las actividades propuestas.

The screenshot shows a simulation interface with a green border. At the top, there are four green buttons labeled "Ayuda", "Actividad 1", "Actividad 2", and "Actividad 3". To the right of these buttons is a small icon of a square with an arrow pointing out. Below the buttons, there is a dropdown menu labeled "Observador:" with "Exterior" selected. To the right of the dropdown is an orange button labeled "Ver/ocultar fuerzas". In the center of the interface, there are two blue dots representing particles. At the bottom, there is a green button labeled "Ya". Below the "Ya" button, there are two input fields: "Separación inicial" with a value of "1,00" and "Velocidad Inicial" with a value of "0,60". The "Velocidad Inicial" field has a slider control next to it.

3.2 Conclusiones sobre el fracaso de la teoría clásica

Hay dos fracasos de la Física clásica detrás del origen de la Teoría de la Relatividad:

El fracaso teórico del electromagnetismo

Las fuerzas magnéticas se aprecian de forma diferente desde dos sistemas de referencia con velocidades diferentes, incumpléndose el principio clásico de relatividad. La diferencia se hace llamativa si consideramos partículas a la velocidad de la luz.

El experimento de Michelson y Morley

En este experimento se determinó que todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento, miden el mismo valor para la velocidad de la luz en el vacío.

Lorentz trató de explicar este resultado suponiendo que los cuerpos se acortan en un factor:

$$y = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

donde v es la velocidad del cuerpo y c es la de la luz.

4. Principio de la Relatividad según Einstein



En vez de buscar formas de justificar los resultados inesperados del experimento de Michelson o las contradicciones teóricas del electromagnetismo, Einstein decidió construir una nueva Mecánica a partir de los hechos constatados.

Además, pensaba que la noción de simetría debía ser importante: los fenómenos naturales deben regirse por las mismas leyes para cualquier observador.

Por eso, en 1905, formuló así el nuevo ***Principio de la Relatividad***

1. ***Las leyes de la Física deben ser iguales para observadores en cualquier sistema de referencia inercial.*** Posteriormente, en 1916, extendería este postulado a observadores en cualquier sistema de referencia.

2. ***La velocidad de la luz en el vacío es una constante igual para todos los observadores.***

Este principio no parece una modificación muy importante del galileano. Pronto veremos que sus implicaciones son profundas.

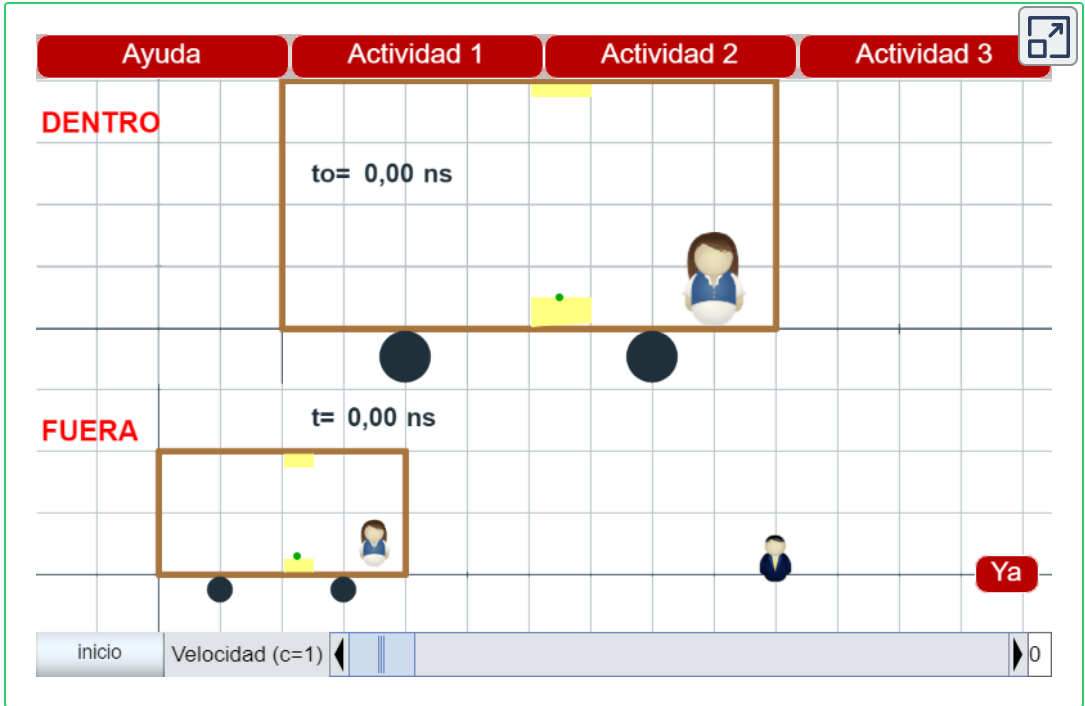
4.1 Dilatación del tiempo



El cuadro de Dalí "La persistencia de la memoria" (1931) no es, sin duda, ajeno al debate que provocaba en la época la primera implicación del nuevo principio de Einstein: el tiempo no puede transcurrir de la misma forma para diferentes observadores.

En la escena de la página siguiente vamos a estudiar este fenómeno a partir de un sencillo experimento ideal en el que observamos la trayectoria de un fotón desde un punto a otro, visto desde sistemas diferentes.

Es importante que en la escena pulsemos el botón de ayuda y sigamos las instrucciones de las actividades 1, 2 y 3.



4.2 Contracción del espacio

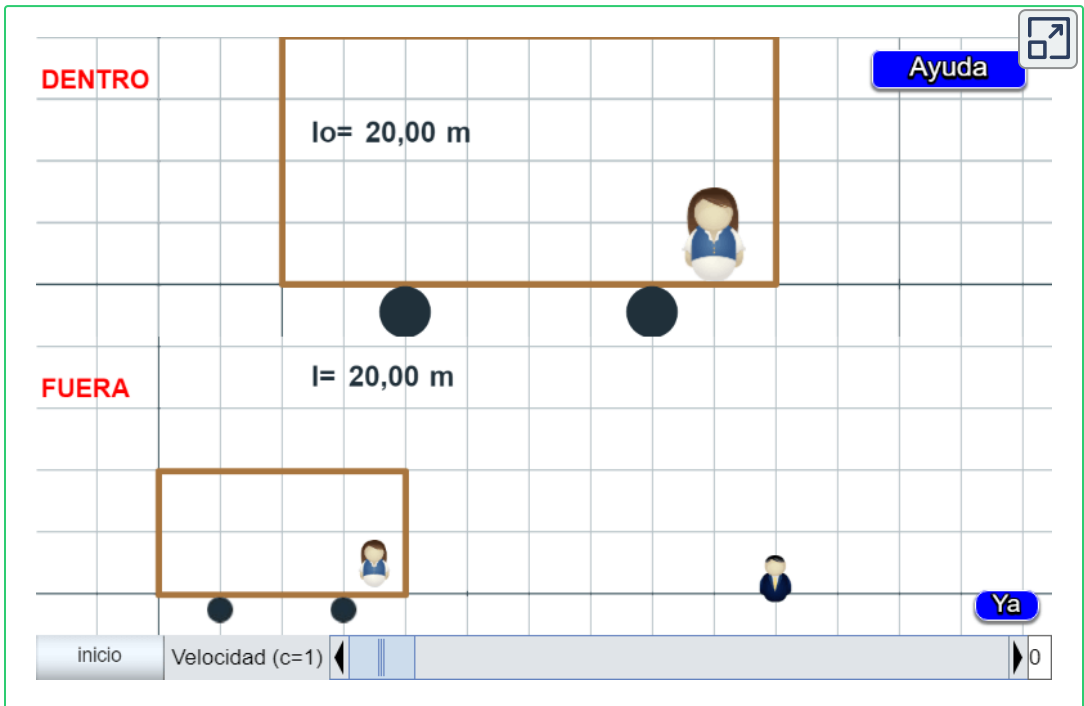
En el apartado anterior hay un detalle que no hemos tenido en cuenta: la contracción de Lorentz de los cuerpos en movimiento, que mencionamos con la experiencia de Michelson y Morley.

En la escena de la siguiente página corregimos este defecto. Dando a la velocidad del tren un valor alto (próximo a c) podemos ver que la longitud del tren, para el observador externo, se hace muy pequeña en la dirección del movimiento, aunque se conserva la anchura.

En resumen, la longitud de un cuerpo en movimiento se ve determinada por la expresión:

$$I = \gamma \cdot l_0$$

donde l_0 es la longitud propia del objeto (la longitud en el sistema de referencia en que está en reposo) y gamma es el coeficiente relativista ya empleado al hablar del tiempo.

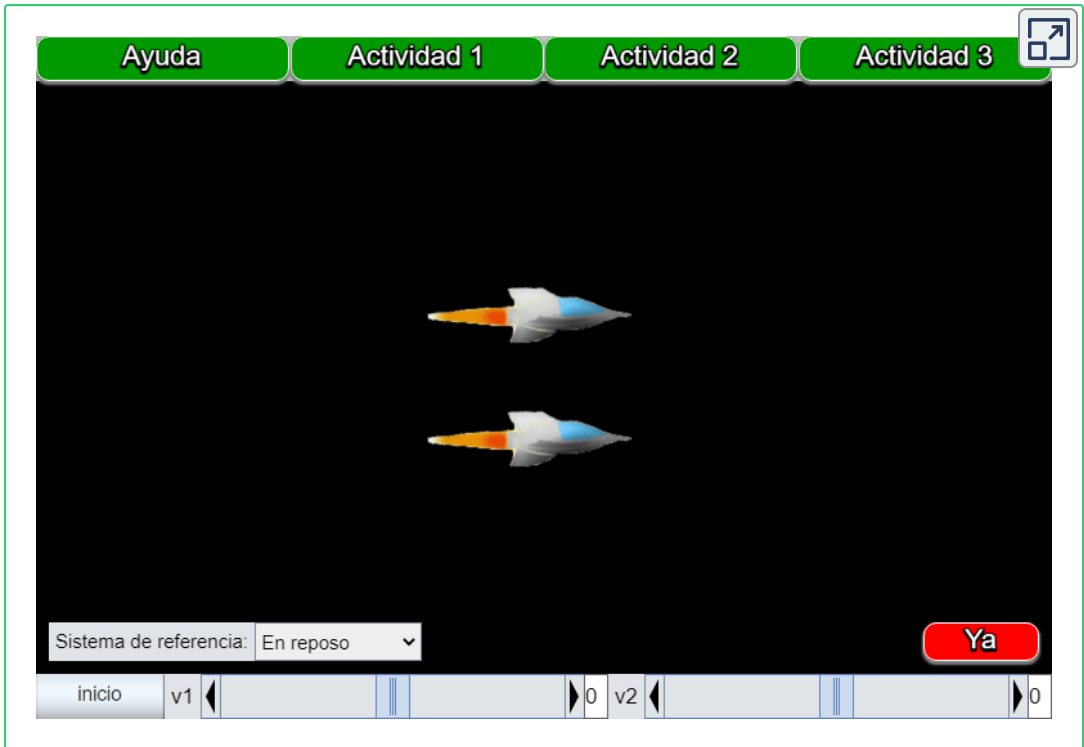


4.3 Composición de velocidades

Si las longitudes y los tiempos se perciben de forma diferente en sistemas de referencia en movimiento relativo, resulta evidente que la ley clásica de composición de velocidades tampoco puede respetarse.

En la escena de la siguiente página podemos estudiar las velocidades absolutas (respecto al suelo) y relativas (una respecto a otra) de dos naves ultrarrápidas.

Haciendo clic el botón Ayuda obtenemos la explicación del funcionamiento de la escena. Por otra parte, las actividades 1, 2 y 3 nos apoyan para sacar partido de ella



4.4 Conclusiones sobre el nuevo principio relativista

El principio relativista de Einstein consta de dos partes:

1. ***Las leyes de la Física deben ser iguales para observadores en cualquier sistema de referencia inercial.*** Posteriormente, en 1916, extendería este postulado a observadores en cualquier sistema de referencia.

2. *La velocidad de la luz en el vacío es una constante igual para todos los observadores.*

Como consecuencia se producen diferencias en magnitudes fundamentales de la Física según el sistema de referencia en que se midan

<i>Magnitud</i>	<i>Sistema de referencia propio</i>	<i>Sistema de referencia absoluto</i>
Tiempo	t_0	$t = \gamma \cdot t_0$
Longitud	l_0	$I = \frac{l_0}{\gamma}$

En las expresiones anteriores, el parámetro gamma vale:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

siendo v la velocidad del sistema móvil y c la de la luz.

Además para hallar la velocidad relativa de un cuerpo de velocidad absoluta V_2 respecto a otro de velocidad V_1 debemos emplear la expresión:

$$v_r = \frac{V_1 - V_2}{1 - \frac{V_1 \cdot V_2}{c^2}}$$

5. Otras magnitudes relativistas

5.1 El momento lineal

Una de las leyes más importantes de la Física que debe ser cierta desde todo sistema inercial es la de la conservación del momento lineal o cantidad de movimiento. De acuerdo con este principio, cuando un cuerpo se desintegra en varios fragmentos, el momento lineal total debe ser igual al que poseía antes de la desintegración.

Con la escena de la siguiente página demostramos que el estudio del momento lineal dentro de la mecánica relativista exige una profunda alteración de varios conceptos clásicos.

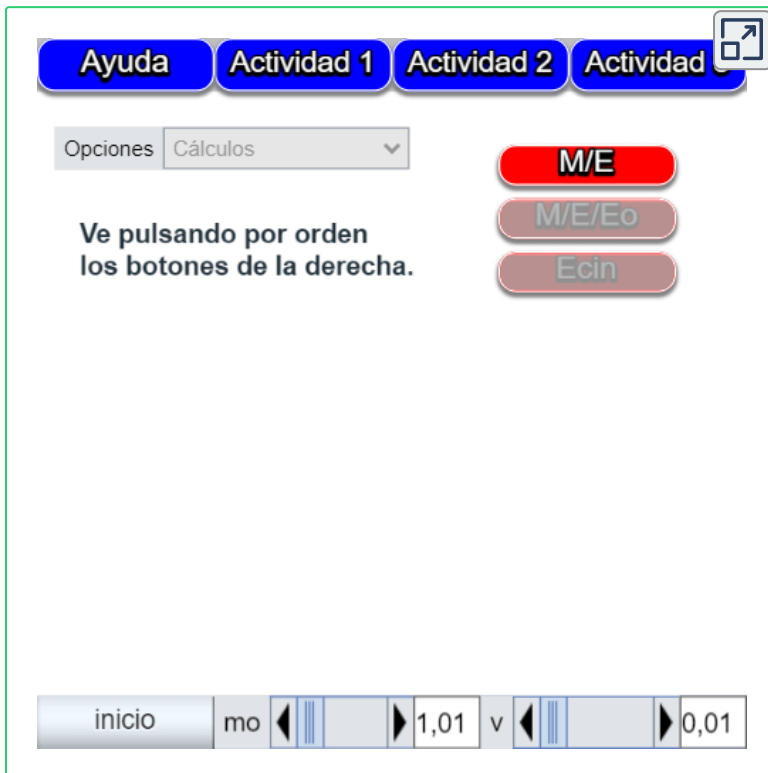
Sigamos las actividades de Ayuda, 1, 2 y 3 para comprenderlo

The screenshot shows a physics simulation interface with a grid background. At the top, there are four green buttons labeled "Ayuda", "Actividad 1", "Actividad 2", and "Actividad 3". A small icon of a square with an arrow is in the top right corner. The interface is divided into two horizontal sections: "DENTRO" (Inside) and "FUERA" (Outside). In the "DENTRO" section, a yellow rectangular object and a person icon are positioned on a horizontal line representing a train. In the "FUERA" section, a smaller yellow rectangular object and a person icon are on a lower horizontal line, representing a ground or another train. Below the "FUERA" section, there is a control panel with a dropdown menu labeled "Cálculo: Clásico" and a "Ya" button. At the bottom, there are two input fields: "inici" and "Velocidad tren" with a value of 0, and "Velocidad desintegración" with a value of 0,1. The "Ya" button is highlighted in green.

5.2 Masa y energía

Cuando aumenta la velocidad de un cuerpo, aumenta su energía cinética. Según la teoría de la relatividad, también aumenta su masa. Este paralelismo se hace muy significativo cuando realizamos el estudio de la simulación adjunta.

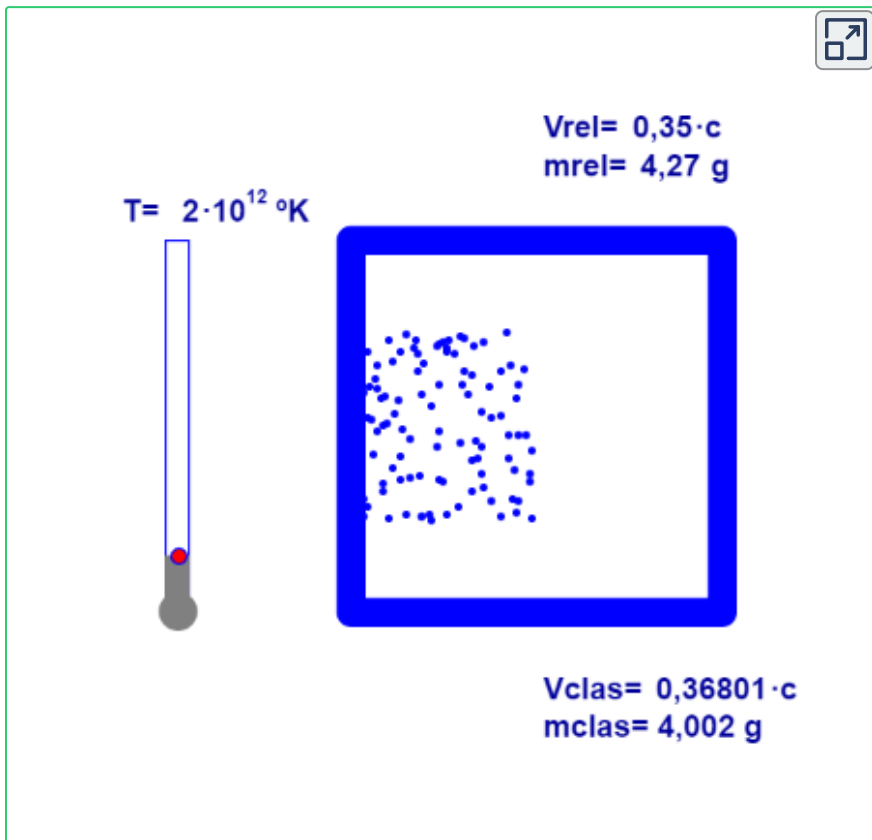
A través de ella, siguiendo las actividades que se proponen, podemos comprender que la masa y la energía son aspectos diferentes de la misma realidad. La masa se puede transformar en energía y viceversa.



Esta conclusión no vale sólo para la energía cinética. Para otras formas de energía, lo ilustramos en las siguientes dos páginas.

5.3 Energía térmica y masa de un gas

Vemos un mol de partículas de helio dentro de una caja. Elevando su temperatura billones de grados podemos comparar el valor que toman la masa del gas y la velocidad media de sus átomos, desde el punto de vista clásico y desde el relativista. Podemos comprobar cómo, calentando un gas, aumentamos su masa

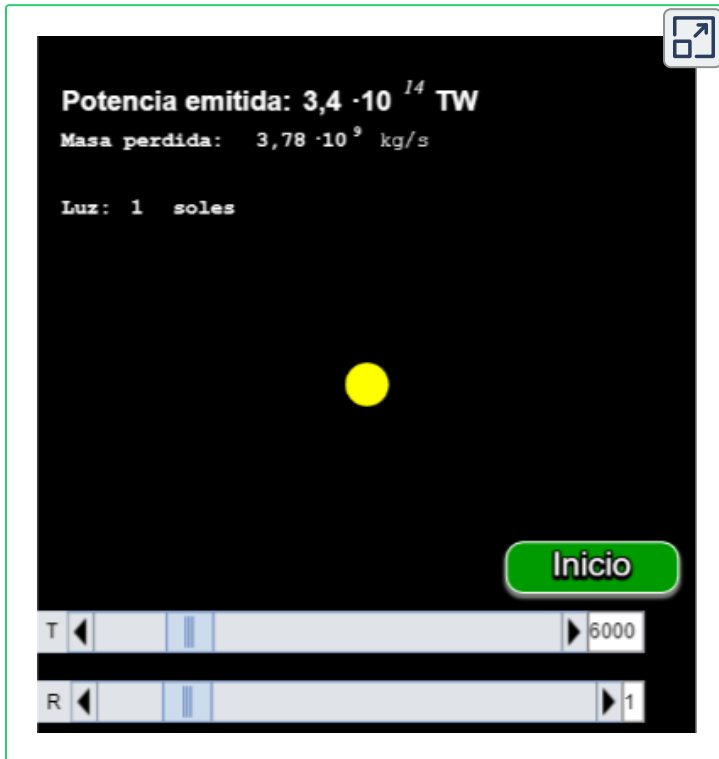


En realidad este efecto sería aplicable a cualquier cuerpo: Cualquier aumento de energía interna, como es el caso de un aumento de temperatura, comporta un aumento de masa, solo perceptible cuando las partículas se mueven a velocidades muy grandes.

5.4 Energía solar

Podemos controlar la temperatura superficial y el brillo de una estrella. El programa nos informa de la potencia emitida por la estrella en teravatios (billones de vatios perdidos en forma de radiación electromagnética) y la pérdida de masa en kilogramos por segundo que supone esa emisión.

Como referencia, también nos relaciona la luz de esa estrella con la de nuestro propio Sol (cuyo radio se toma como unidad).



Si tememos que la estrella pierda demasiada masa en poco tiempo, pensemos que el Sol, por ejemplo, tiene una masa de $2 \cdot 10^{30}$ kg, de forma que tardará muchos miles de millones de años en perder una fracción apreciable de su peso.

5.5 Conclusiones sobre otras magnitudes relativistas



Momento lineal y masa relativista

Podemos admitir para el momento lineal de una partícula la misma expresión que en la Física clásica: $P = m \cdot v$, siempre que admitamos que la masa de una partícula vale: $m = \gamma \cdot m_0$ donde

$$\gamma = \frac{1}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

y m_0 es la masa en reposo.

La energía cinética de una partícula vale:

$$E_c = (\gamma - 1) \cdot m_0 \cdot c^2$$

Relación masa energía

La masa en reposo de una partícula corresponde a una energía $E = m_0 \cdot c^2$, cualquier aumento o disminución de energía se traduce en una variación de masa dada por: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$.

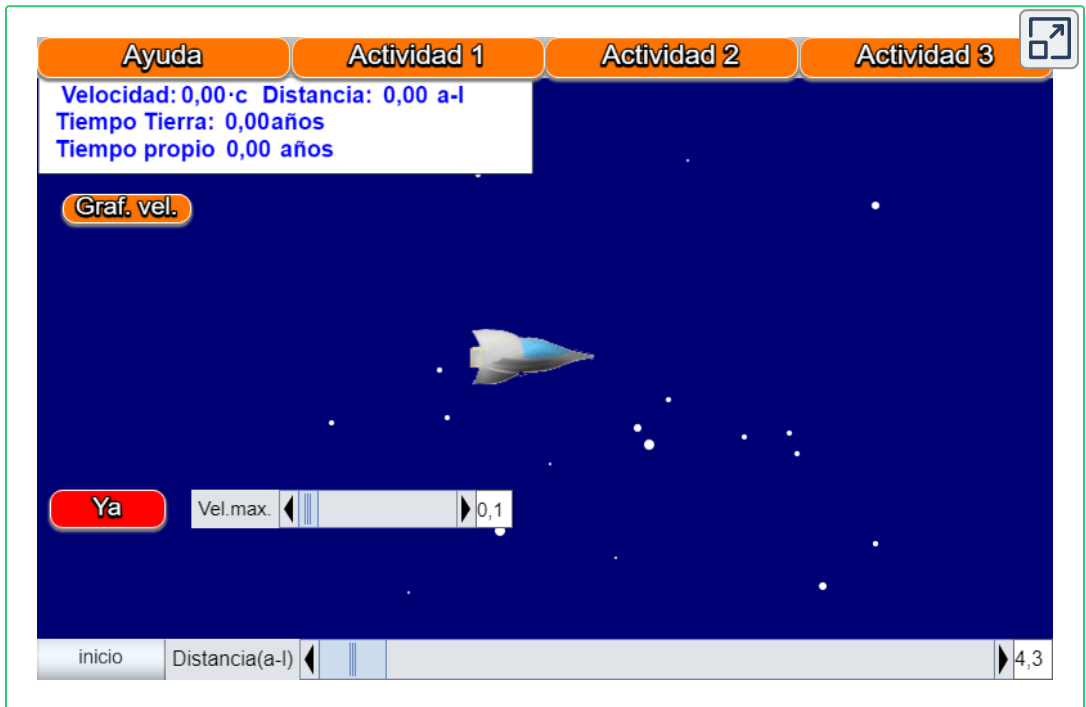
6. Algunos impactos de la teoría

6.1 La posibilidad de viajes interestelares

Siendo la velocidad de la luz el límite previsible para la rapidez de cualquier nave, parece imposible la realización de viajes a otros sistemas solares, puesto que el tiempo de ida y vuelta sería excesivo.

Para consolarnos, la dilatación del tiempo a gran velocidad hace que sea teóricamente viable.

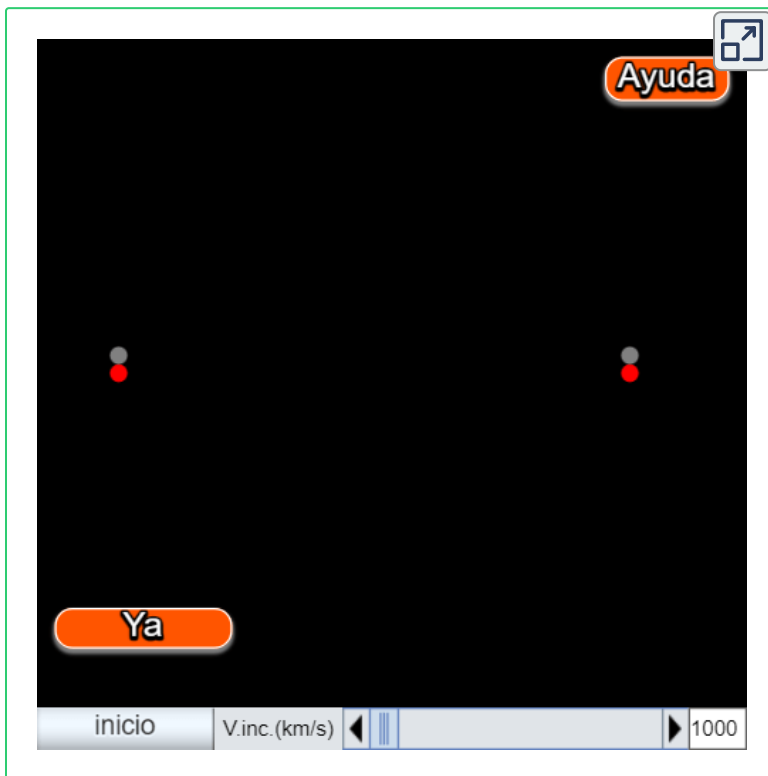
La escena de la siguiente página, simula el viaje de una nave futurista a una de las estrellas no muy lejanas de nuestro Sol.



6.2 El origen de la energía nuclear

Seguro que hemos oído alguna vez que la energía solar proviene de una reacción de fusión nuclear. Se unen átomos de hidrógeno formándose helio y desprendiéndose mucha energía.

Es posible que en el desarrollo de una técnica que nos permita realizar esta reacción esté el futuro energético de la Humanidad; pero ¿de dónde sale esta energía?

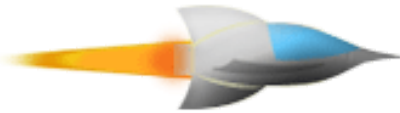


En la escena simulamos una de las posibles reacciones teóricas de fusión nuclear. En la práctica son mucho más comunes otras variantes, pero en la que hemos escogido, su sencillez la hace fácil de entender.

6.3 Conclusiones sobre aplicaciones de la teoría

La teoría de la Relatividad resulta fundamental para estudiar fenómenos de cuerpos a elevadas velocidades, nos ha ensanchado campos de conocimiento tan importantes como la Cosmología y nos ha aportado posibilidades técnicas para el presente y para el futuro.

Ejemplo para el futuro: Los viajes interestelares



Como la velocidad de la luz es inalcanzable, cualquier viaje a otro sistema planetario requiere muchos años entre ida y vuelta. Sin embargo, si la velocidad de una nave se aproxima mucho a la de la luz, el tiempo que transcurra para los astronautas en un viaje interestelar puede ser muy pequeño comparado con el terrestre. ***Podremos realizar viajes a los confines del Universo, con la condición de que a nuestro regreso habrá pasado una enorme cantidad de tiempo terrestre.***

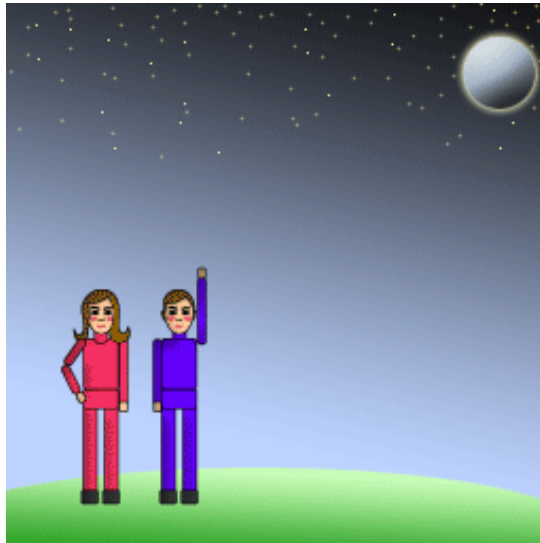
Ejemplo para el presente: La energía nuclear

La unión de núcleos de átomos ligeros a grandes temperaturas permite formar átomos más pesados, cuya masa es ligeramente inferior a la de los componentes. ***El defecto de masa se convierte en energía aprovechable por el hombre.*** El proyecto ITER persigue construir en pocos años el primer reactor nuclear de fusión comercial.

7. Evaluación - Paradoja 1

Los Mellizos

La Teoría de la Relatividad resulta muchas veces difícil de acomodar a nuestro "sentido común", tan lleno de prejuicios. He aquí una paradoja célebre que han dado mucho que pensar a los físicos.



Dos mellizos se separan a los 20 años. Uno de ellos parte para un viaje espacial y vuelve 60 años después. Como el viaje se ha realizado a velocidades relativistas con $\gamma = 20$, para el viajero sólo han pasado 3 años. Su hermano se queja amargamente: ***"Esto es injusto, desde tu punto de vista, tú eres el que ha permanecido en reposo con tu nave y yo el que ha viajado con la Tierra a gran velocidad. Tú deberías ser el viejo y yo el joven"***.

Esta paradoja se utilizó algunas veces para intentar demostrar que la Relatividad llevaba a absurdos. ¿Cuál es su fallo? Cuando la solución será el momento de ir a la siguiente página

8. Evaluación - Paradoja 2

¿Cabe o no cabe?



El cohete de la figura va a penetrar en el hangar de dos puertas, un hangar superblindado e indestructible. Su propietario afirma:

- Cuando esté del todo en el interior las dos puertas se cerrarán automáticamente y quedará capturado.

Su interlocutor responde:

- Es un cohete demasiado grande, nunca estará todo él dentro del hangar.

-Ignorante, -replica el primero- como viaja a velocidades relativistas su tamaño se reduce y será más corto que el hangar.

-El ignorante eres tú,- contesta su amigo- desde el punto de vista del cohete es el hangar el que viaja a gran velocidad y reduce su tamaño. Nunca podrá estar todo el cohete dentro del hangar. **¿Quién tiene razón?**

9. Evaluación - cuestionario



relatividad

No avances en las preguntas hasta haber contestado correctamente la cuestión en la que estás

Pulsa para ver todas las preguntas

1 / 15



Si al unirse dos partículas atómicas, el grupo resultante tiene mayor masa que la suma de sus componentes:

- A. Ha habido absorción de energía
 - B. Es un resultado imposible
 - C. Ha habido emisión de energía
-



