TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

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.

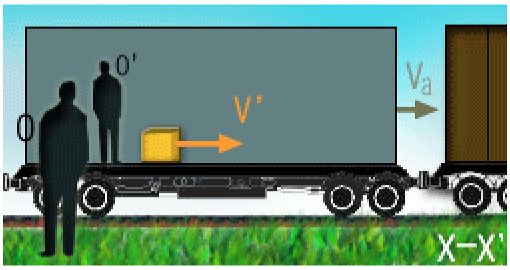
Nosotros trabajaremos sólo con la primera de las dos, la más sencilla y adecuada al currículo de Bachillerato.

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.

Nos proponemos que el usuario pueda comprender:

- Los conceptos básicos de sistemas de referencia inerciales, composición de velocidades y principio de relatividad clásico.
- Las pruebas experimentales que contradecían las nociones clásicas.
- El nuevo principio relativista de Einstein y sus implicaciones sobre la observación de magnitudes físicas desde sistemas de referencia diferentes en movimiento relativo uniforme.
- Algunas de las implicaciones conceptuales de la Teoría de la Relatividad y de su influencia en nuestro conocimiento científico y tecnológico. Incluso veremos alguna de las paradojas que nos hacen comprender mejor la profundidad del cambio intelectual que supuso la Relatividad.

Sistemas inerciales



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.**

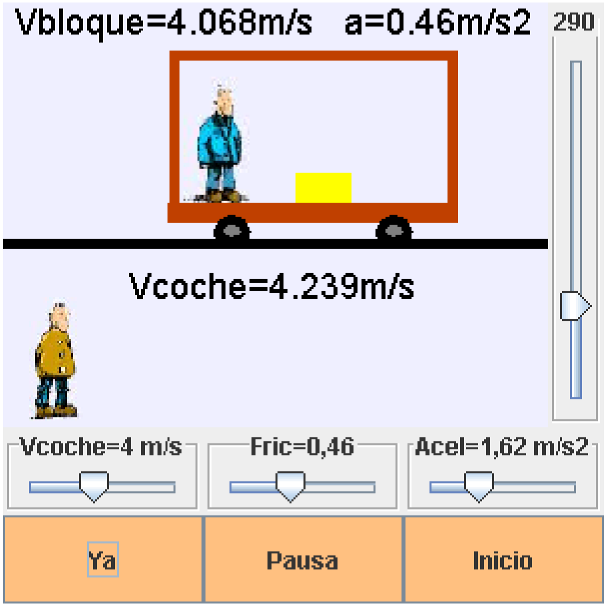
Si desde un sistema de referencia se cumple este principio, el sistema **se considera inercial**. ¿Son todos los sistemas de referencia inerciales?. Para responder esta pregunta es mejor que nos introduzcamos en el siguiente apartado, el Principio de Relatividad.

Principio de la Relatividad

En este caso podemos determinar las características del movimiento y comparar los resultados del movimiento de la caja desde el punto de vista de los dos observadores: el exterior, en reposo, y el interior, en movimiento con el tren.

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.

Es conveniente leer el contenido de la ayuda y seguir las actividades A1, A2 y A3. De esta forma llegaremos a entender claramente el contenido del Principio de Relatividad en su forma clásica, atribuido a Galileo.



Ayuda:

Para entender la simulación

Con los controles al pie de la escena podemos regular la velocidad del coche del tren, el coeficiente de fricción entre la caja y el suelo y la aceleración del tren.

El control vertical a la derecha regula la rapidez de la simulación, para hacerla más cómoda para nosotros, en función del ordenador que poseamos.

El botón Ya inicia la simulación, el de Pausa la detiene e Inicio restaura las condiciones del principio.

Cuando la simulación está en marcha, el sistema nos informa de la velocidad y aceleración de la caja para cada uno de los dos observadores.

NOTA: Debido al redondeo en la presentación de valores numéricos, cuando el programa imprime algún valor en la pantalla debemos aceptar un margen de error

0,01 ó 0,001, según el número de cifras decimales. Este fenómeno puede darse en ésta y en todas las simulaciones del estudio relativista.

A1: Damos al tren una cierta velocidad, por ejemplo 4 m/s, y pulsemos el botón Ya. ¿Que clase de movimiento tiene la caja para el observador exterior? ¿ Y para el que va en el tren ? ¿Qué aceleración tiene la caja en ambos casos?.

Pongámonos en el caso del observador dentro del tren. Para él es evidente que si quiere que la caja acelere debería empujarla. Es decir es un sistema de **referencia inercial**. El observador exterior, el que está en reposo, también afirmará que la caja no se va a mover si no se la empuja. **Ambos sistemas de referencia son inerciales, es decir, si un sistema de referencia es inercial, otro que se mueva con movimiento uniforme respecto al anterior, también lo es.**

¿Y si el tren se mueve con movimiento acelerado? Para responder esta pregunta debemos ir a la siguiente actividad.

A2: Tras pulsar Inicio, demos al tren una aceleración de $1 m/s^2$ aproximadamente. Al apretar el botón Ya, ¿qué tipo de movimiento tiene la caja en los dos sistemas de referencia? ¿Posee la misma aceleración en ambos?.

Fijémonos en lo que ve el observador exterior. ¿En qué sentido ve moverse la caja respecto a él? ¿A qué se debe que la aceleración de la caja sea tan baja?. Para responder a esta pregunta, tal vez debas variar la fricción. ¿Qué fuerza es la responsable de la aceleración de la caja?

Atendamos ahora al observador en el interior. ¿En qué sentido ve moverse la caja respecto a él? ¿Puedes explicar la aceleración de la caja sólo con la fuerza que apreciaba el observador exterior.?

Como hemos podido comprobar, cuando un sistema de referencia se mueve con movimiento acelerado respecto a otro que está en reposo, aparece una misteriosa pseudofuerza, llamada fuerza de inercia que no es una fuerza real, sino una consecuencia del movimiento.´Tal sistema de referencia no será inercial, pues en él un objeto puede sufrir aceleraciones sin que nadie realice una fuerza real.

No pensemos que las fuerzas de inercia son despreciables, bástenos con indicar que ellas son responsables del giro de los vientos en borrascas y anticiclones.

A3: Recapitulemos: Sólo en sistemas de referencia que podamos considerar en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme se cumple el principio de inercia y, por tanto, los restantes principios de la Dinámica.

Por eso, desde diferentes sistemas de referencia inerciales se observarán las mismas fuerzas (responsables de las aceleraciones). Las fuerzas son la forma en que se manifiestan las interacciones físicas entre los cuerpos, por eso podremos concluir que:

Desde diferentes sistemas de referencia inerciales se observarán las mismas leyes físicas. Es decir, la caja se moverá en todos ellos con la misma aceleración bajo las mismas fuerzas. Esto no ocurrirá en el momento en que uno de los dos sistemas tenga movimiento acelerado, apareciendo en ese caso las fuerzas falsas que denominamos de inercia.

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.
Sistemas de 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)..

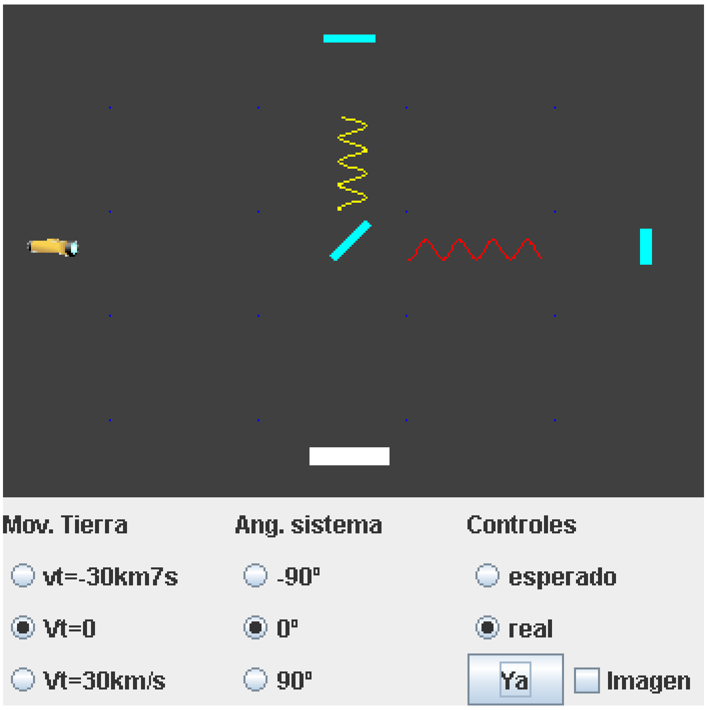
El experimento de Michelson y Morley

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.

Esta sencilla ley de suma de velocidades es lo que Michelson y Morley trataron de medir aplicado a la luz entre 1881 y 1887.

En su aparato, un haz de luz monocromática 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. Pulsando el botón de ayuda accederemos a una descripción del aparato. las actividades A1, A2 y A3 nos permiten reproducir el experimento.



Ayuda: En la simulación podemos ver qué pasaría si la Tierra estuviera inmóvil (Vt=0) o lo que ocurre según coloquemos el sistema en una dirección respecto al movimiento terrestre (Vt=30 km/s) o la opuesta (Vt=-30 km/s). También podemos variar en cualquier momento la posición del sistema con los botones de ángulo del sistema.

Si pulsamos el botón **Ya** veremos el haz luminoso y su bifurcación al pasar por un elemento que en parte deja pasar la luz y en parte la refleja (se usan colores diferentes para evitar equivocaciones). Sendos espejos vuelven a reunir los dos haces que se proyectan juntos sobre una pantalla.

La pestaña **imagen** nos permitirá ver al final del recorrido la figura de interferencia formada entre los dos haces al unirse en la pantalla.

La opción **esperado** sirve para ver qué tenía que ocurrir según las previsiones teóricas, mientras que la opción **real** muestra el resultado obtenido en la experimentación.

A1: **Lo que pasaría si la Tierra estuviera parada:**

Dejamos el control de velocidad en cero (**Vt=0**). Pulsemos el botón **Ya** y veamos cómo transcurre el movimiento de los dos haces. Seleccionemos la opción **imagen** y veremos la imagen que se forma en la pantalla. Las zonas oscuras corresponden a la interferencia destructiva y las más brillantes corresponden a la interferencia constructiva.

Si viramos el sistema 90º en un sentido o en otro, es de esperar que el experimento de el mismo resultado. Comprobémoslo.

A2: **Lo que debería pasar teniendo en cuenta el movimiento terrestre:**

Para tener en cuenta el movimiento terrestre elijamos **Vt=30 km/s** (este es el valor aproximado de la velocidad terrestre en su órbita respecto al Sol. Aparecerán unos vectores indicando la dirección del movimiento.

Como ángulo del sistema tomamos 0º. Pulsamos **Ya** y comprobamos el patrón de interferencia.

Elijamos ahora el ángulo 90º . ¿Se produce el mismo patrón de interferencia? .Probemos también con el ángulo -90º. ¿Cambia ahora también la figura de interferencia?.

Repitamos toda la experiencia para **VT=-30 km/s**.Es decir, tomando el sistema al revés.

Reflexionemos un poco sobre estos resultados. Son evidente consecuencia del movimiento de la Tierra. Mientras que no afecta al camino recorrido por el rayo transversal, sí que afecta al que se mueve en la dirección terrestre.

Hasta ahora hemos simulado lo que se esperaba obtener. En la siguiente actividad veremos qué pasó realmente.

A3: **Lo que pasó en realidad:**

Hasta ahora hemos tenido siempre señalada la opción **esperado** en los botones de la derecha de la imagen. Pinchemos el botón **real** y analicemos qué ocurre con la figura de interferencia para **Vt= 30 km/s** y todos los ángulos del sistema. Después repitamos lo mismo para **Vt=-30 km/s**.

¿ En qué actividad anterior obteníamos los mismos resultados?.

El inesperado resultado real del experimento, reiterado muchas veces entre los años 1881 y 1887 dejó perplejos a los Físicos. ¿Es que la Tierra no se movía? ¿Quizás la Física no puede interpretar la realidad?.

Hubo un físico y matemático, Lorentz, que observó que si los objetos se encogían en la dirección de su movimiento, podría entenderse este resultado. Incluso calculó en qué factor tendría que reducirse el tamaño del aparato de Michelson:

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

Este número γ (gamma) es el factor por el que habría que dividir la longitud del aparato para obtener el resultado previsto. En esta expresión v es la velocidad del objeto en movimiento (la de la Tierra en el caso que nos ocupa) y c es la velocidad de la luz.

Como esta expresión no tenía ninguna justificación teórica, era simplemente una fórmula "ad hoc" para justificar el resultado, no fue tenida muy en cuenta..Sólo la intervención posterior de Einstein permitió comprender qué estaba ocurriendo.

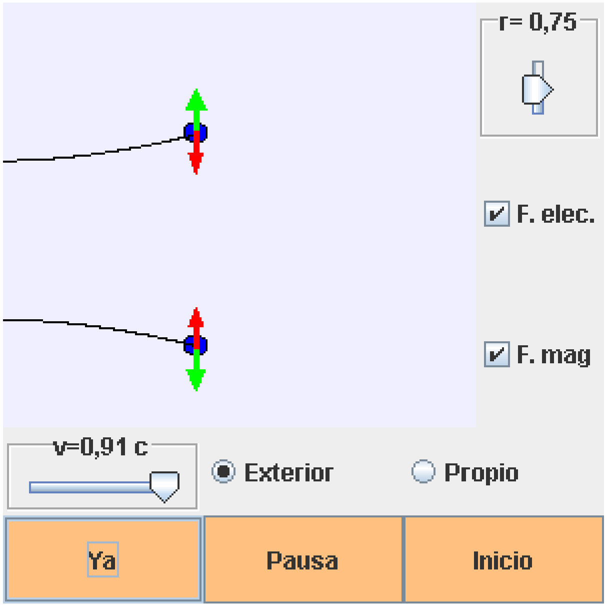
El problema del campo magnético

Dos partículas con carga del mismo signo que marchan en paralelo, con una velocidad igual en un momento dado, 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.

Estas dos fuerzas nos llevan, en la escena de al lado, a una situación de contradicción que sorprendió mucho a los físicos del siglo XIX.

Para comprender esta contradicción pulsemos el botón de ayuda para entender la escena y realicemos las actividades propuestas.



Ayuda: Dos partículas de igual masa y carga eléctrica asoman al lado izquierdo de la escena. Podemos regular la distancia entre ellas con el control **r** situado en la parte superior derecha. Debajo de ese control podemos seleccionar las pestañas F.elec o F.mag que mostrarán respectivamente los vectores fuerza eléctrica y fuerza magnética durante la animación.

En la parte inferior, el control **v** nos permite determinar la velocidad inicial de las partículas (en dirección horizontal). Esta velocidad se mide por comparación con la velocidad de la luz (c=1).

También podemos seleccionar uno de los botones **Exterior** o **Propio,** que nos permiten ver la escena desde el sistema laboratorio (en reposo) o desde el sistema centro de masas, que viaja a la misma velocidad que las partículas.

Los botones **Ya, Pausa, Inicio** se encargan respectivamente de comenzar la simulación, detenerla y restaurar las condiciones del principio .

A1: Demos a las partículas una velocidad 0,6 C (60% de la velocidad de la luz) y pulsemos el botón **Ya**.

¿De qué forma se mueven las partículas?

¿A qué se debe este movimiento?. Para entender este movimiento seleccionemos la opción **F.elec**. Pulsamos **Inicio** y nuevamente **Ya**. ¿Vemos el vector fuerza eléctrica que tiene a separar las cargas?.

¿Es esta la única fuerza? En realidad, sabemos que las partículas cargadas en movimiento engendran un campo magnético, susceptible de afectar a otras cargas en movimiento. Seleccionemos la pestaña **F.mag** y repitamos la experiencia**.** Vemos que la fuerza eléctrica y la fuerza magnética tienen sentidos opuestos ¿Por qué no se anulan?.

¿Cambiaría la situación si las partículas estuvieran a otra distancia?. Para contestar esta pregunta, realiza varias veces el lanzamiento de las cargas con la misma velocidad, pero desde diferentes distancias iniciales.

A2: La única forma de que estas dos fuerzas puedan llegar a igualarse consiste en alterar su velocidad. Repitamos el lanzamiento con diferentes valores de la velocidad hasta que consigamos que la fuerza eléctrica y la magnética se anulen.

¿Cómo se nota que se anulan las dos fuerzas en la trayectoria de las partículas? ¿A qué velocidad se consigue este resultado?

¿Depende tal velocidad de equilibrio de la distancia entre las cargas? Para responder esta pregunta, repitamos la experiencia desde diferentes distancias.

Busquemos en un libro de texto si no los recordamos los valores de la fuerza eléctrica de Coulomb y magnética de Lorentz, y tratemos con ellas de justificar el resultado que hemos obtenido.

A3: Hasta ahora hemos utilizado siempre el sistema de referencia exterior.Pulsemos **Inicio** y seleccionemos ahora el sistema de referencia propio, el que viaja con las partículas.

Ahora, manteniendo la velocidad de la luz, pulsemos el botón **Ya.** ¿Se mantienen las partículas a la misma distancia?. Seleccionemos **F.elec y F.mag**. Repitamos la experiencia. ¿Qué ha pasado con la fuerza magnética? ¿Por qué?

Debemos darnos cuenta de que hemos encontrado un caso, el de la fuerza magnética, que no cumple con el principio de relatividad. No se aprecian las mismas fuerzas en los dos sistemas, en que está en reposo y el que se mueve a la velocidad de la luz con las partículas.

Es más, el resultado parece absurdo: desde un punto de vista las partículas se mantienen siempre a la misma distancia. Desde el otro las partículas se separan inevitablemente. La velocidad de la luz produce resultados paradójicos.

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, incumpliéndose 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: $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ donde v es la velocidad del cuerpo y c es la de la luz.

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.**

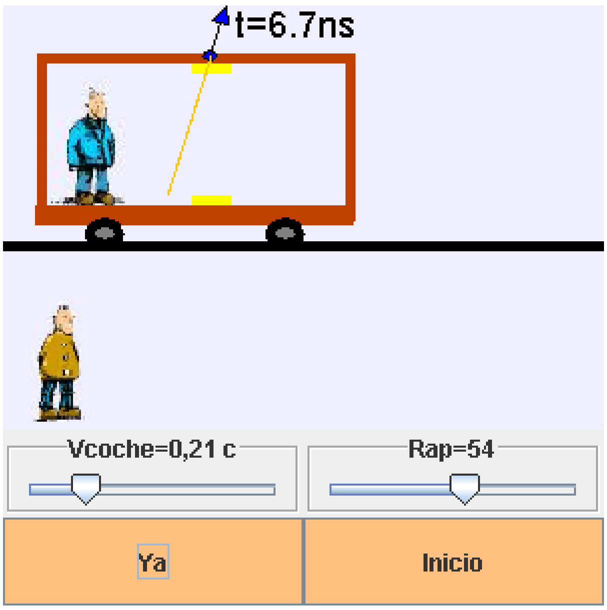
Este principio no parece una modificación muy importante del galileano. Pronto veremos que sus implicaciones son profundas.

Contracción del tiempo

La primera implicación del nuevo principio de Einstein consiste en que **el tiempo no puede transcurrir de la misma forma para diferentes observadores**.

En la escena adjunta 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 pulsemos el botón de ayuda y sigamos las actividades A1, A2 y A3.



Ayuda:

Ayuda para entender la escena:

En uno de los coches de un tren hay un foco, situado en el suelo, que proyecta luz sobre una pantalla en el techo.

La escena nos muestra el camino de uno de los fotones, así cómo su vector velocidad. El fenómeno es estudiado por dos observadores, uno dentro del tren y otro en reposo, en el exterior. Debemos recordar que, según el principio relativista de Einstein, esta velocidad debe tener el mismo módulo para los dos observadores.

El tren se mueve con movimiento uniforme, de forma que los dos sistema de referencia pueden considerarse inerciales.

El usuario puede regular la velocidad del tren con el control **Vcoche**. También puede regular la rapidez con que se desarrolla la simulación, para adaptarla a la capacidad de su ordenador, con el control **Rap**. Es importante precisar que la velocidad está medida en unidades luz, es decir el valor de la velocidad de la luz es c=1 (recordemos que su valor real es de unos 300.000 km/s).

El botón **Ya** arranca la simulación, que se detiene automáticamente cuando el fotón alcanza su destino.

El botón **Inicio** restaura los valores del comienzo.

A1: **El fenómeno con el tren en reposo:**

Manteniendo nulo el valor de la velocidad, pulsamos el botón **Ya.**

Podemos seguir el movimiento del fotón visto desde los dos sistemas de referencia.

Observemos que el valor del tiempo se denomina como **t** para el observador exterior y **to,** también llamado **tiempo propio**, para el observador del tren.

A partir de ahora, llamaremos tiempo propio para cualquier cuerpo en movimiento al que se mide desde ese mismo cuerpo. El tiempo **t** desde el sistema que consideramos en reposo (en realidad no hay ningún sistema en auténtico reposo) se llamará **tiempo absoluto**.

En esta experiencia podemos ver cómo el tiempo es idéntico en los dos sistemas. Podemos concluir que el tiempo medido para cualquier fenómeno es igual en dos sistemas de referencia que estén en reposo uno respecto a otro.

A2: **Cuando el tren se mueve:**

Tras pulsar **inicio**, demos a **Vcoche** el menor valor posible en nuestro control: 0,01 c. Oprimimos el botón **Ya** y podremos notar un efecto extraño ¿No hay una pequeña diferencia de tiempo entre los dos observadores?

Repitamos la experiencia, pulsando siempre **inicio** en primer lugar**,** con una velocidad mucho más elevada, algo así como 0,8 c.

El fotón parte en el mismo instante desde los dos sistemas de referencia, pero ¿ven los dos observadores llegar simultáneamente el fotón a la pantalla?. Vemos que un suceso que sería simultáneo para dos observadores en reposo no lo es cuando uno de los observadores está en movimiento.

También podemos entender el porqué de esta diferencia. Comparemos el camino que ha seguido el fotón para los dos observadores: para el primero es una simple vertical. ¿Por qué para el otro es una recta inclinada? Si no nos damos cuenta inmediatamente de la respuesta repitamos la experiencia con otras velocidades.

Si el fotón ha tenido que seguir caminos de diferente longitud para un observador y otro, pero con la misma rapidez para cada uno de ellos, es evidente que no puede tardar lo mismo. **El tiempo propio de un sistema de referencia móvil es siempre menor que el tiempo medido desde un sistema de referencia en reposo**.

Para cuantificar esta diferencia deberemos continuar con la siguiente actividad.

A3: **Relación entre tiempo propio y tiempo absoluto:**

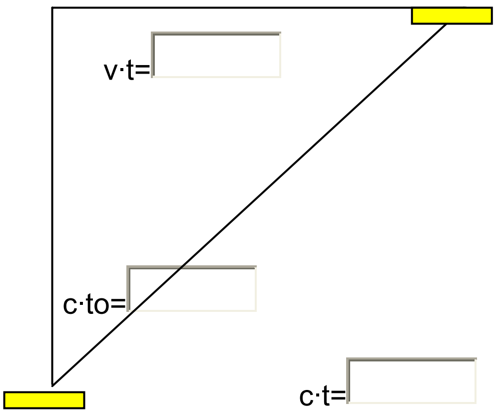
Comenzando como siempre por **inicio,** demos a **Vcoche** un valor grande. A continuación, pulsaremos el botón **Ya** y rellenemos las siguientes casillas con los valores de la experiencia:

Vcoche: ·c (sólo el número, utilizando punto y no coma decimal).

to: ns (nano segundos)

t: ns.

Ahora pulsemos el botón que completa automáticamente los datos del esquema siguiente.



Vemos que para el observador en reposo el fotón recorre una distancia c·to (c es la velocidad de la luz),

Para el observador en reposo el fotón ha recorrido la distancia c·t, debido a que el tren se ha movido un intervalo v·t.

Aplicando el teorema de Pitágoras no nos debería costar mucho demostrar que:

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

Esta expresión se escribe normalmente: **t= γ·t** donde el parámetro **γ** vale:

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

El mismo factor de contracción espacial que necesitaba Lorentz para explicar el experimento de Michelson.

Contracción del espacio

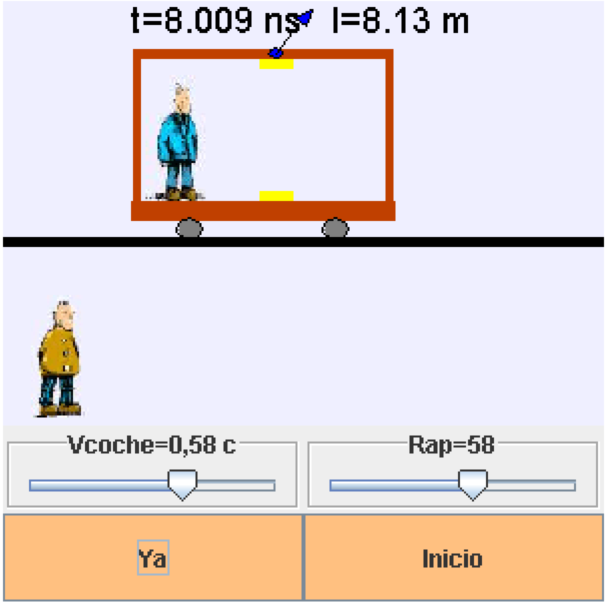
En el apartado anterior hay un detalle que no hemos tenido en cuenta: la contracción de Lorentz de los cuerpos en movimiento, indicada al tratar de la experiencia de Michelson y Morley.

En la escena adjunta 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.

También podemos ver como, en este caso, es la longitud propia la mayor.

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

l = γ · lo donde lo es la longitud propia del objeto (la longitud en el sistema de referencia en que está en reposo) y **γ** es el coeficiente relativista ya empleado al hablar del tiempo.

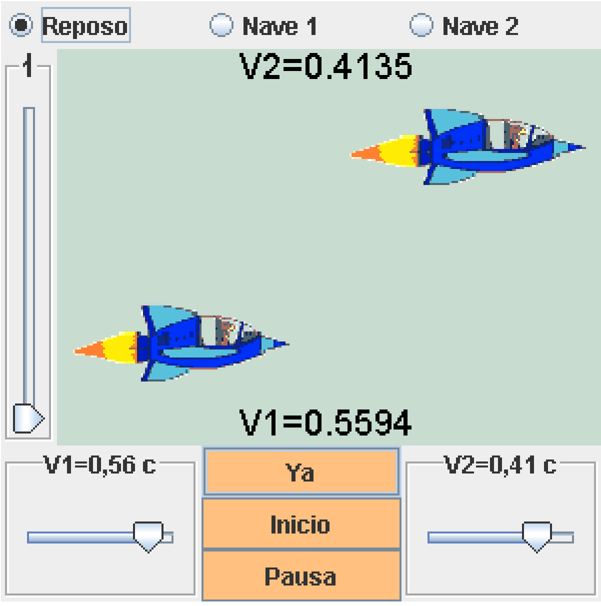


Composición de velocidades

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 adjunta podemos estudiar las velocidades absolutas (respecto al suelo) y relativas (una respecto a otra) de dos naves ultrarrápidas.

En el botón Ayuda se nos explica el funcionamiento de la escena y las actividades A1, A2 y A3 nos apoyan para sacar partido de ella.



Ayuda:

Ayuda para entender la escena:

Observamos dos naves muy rápidas. En la parte inferior de la escena hay dos controles, **v1** y **v2**, que nos permiten controlar el valor de estas velocidades respecto a Tierra.

Las velocidades están medidas en unidades luz, es decir, la velocidad de la luz c=1. La precisión con que se mide estas velocidades es 0,0001, de forma que una diferencia de este orden en el valor esperado de una velocidad puede atribuirse a un error de medida, no a una diferencia real (no debemos considerar diferenta una velocidad 0,3455 de otra 0,3456).

Entre los dos controles de velocidad, el botón **Ya** comienza la simulación, el botón **Inicio** la devuelve a la situación del principio y el botón **Pausa** detiene la simulación.

La barra deslizadora de la izquierda sirve para acomodar la rapidez de la simulación a la velocidad de nuestro ordenador.

En la parte superior de la escena, los botones de opción **reposo, nave 1 y nave 2,** nos permiten elegir el suelo o una de las naves como sistema de referencia.

Cuando la simulación arranca, se imprime en la pantalla la velocidad de cada nave en el sistema de referencia elegido.

A1: **Probando la escena:**

Probemos a dar a una de las naves una velocidad positiva y pulsemos el botón **Ya.** Así podemos distinguir cuál es la nave 1 y la nave 2. ¿Qué le ocurre a la nave si la velocidad se hace muy grande? ¿Por qué?

Ahora, sucesivamente, elijamos entre los botones de la parte superior los botones nave 1 y nave 2.

¿Qué ocurre cuando elegimos como sistema de referencia la nave que está en movimiento?

Ahora podemos probar a dar un valor negativo a la velocidad de la nave. ¿En qué se nota este hecho en la simulación?.

A2: **Adelantamientos en el espacio:**

Demos a las dos naves una velocidad del orden de 0,1 c pero no igual, por ejemplo, 0,1 y 0,12.

Tomamos el sistema de referencia en reposo para ver con exactitud el valor de estas velocidades. Anotemos estos valores y restemos uno de otro. El valor obtenido debería ser la velocidad relativa de uno respecto a otro.

Tomemos como sistema de referencia una de las naves y comprobaremos que este valor que hemos calculado es aproximadamente cierto.

Probemos ahora con dos valores elevados: por ejemplo 0,8 y 0,9. Debería aparecer una velocidad relativa alrededor de 0,1. ¿Es este valor el que se obtiene en realidad?

Parece evidente que al acercarnos a la velocidad de la luz la norma clásica de composición de velocidades se hace inválida.

En la Física clásica la velocidad relativa de un móvil respecto a otro era simplemente la diferencia de velocidades: **Vr=V1-V2**

En el mundo relativista la expresión válida es algo más complicada:

FÓRMULA

Comprobemos cómo esta expresión nos explica perfectamente los valores obtenidos en nuestra escena. También podemos percibir que cuando V1 y V2 son pequeños comparados con la velocidad de la luz, el denominador de la expresión es prácticamente 1 y la expresión clásica resulta correcta.

A3: **El límite de la velocidad relativa:**

Demos a las dos el máximo valor de la velocidad pero con sentidos opuestos. Como el máximo valor que permite el motor de cada nave es el 90% de la velocidad de la luz, desde el punto de vista clásico, una nave debería alcanzar respecto a otra una velocidad 1,8 veces la de la luz. Comprobemos si es esto lo que sucede.

Una vez más debemos emplear la expresión:

$$Vr = \frac{V1 - V2}{1 - \frac{V1 \cdot V2}{c^2}}$$

Para hacerlo adecuadamente deberemos tener en cuenta el signo de las velocidades.

Es fácil darnos cuenta de que en ningún sistema de referencia superaríamos la velocidad de la luz. Más aún, aunque las dos velocidades hubieran sido la de la luz, esta expresión nos permite ver que la velocidad relativa no supera c.

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

Magnitud	Sistema de referencia propio	Sistema de referencia absoluto
Tiempo	**to**	**t= γ· to**
Longitud	**lo**	**l=lo/γ**

Donde el parámetro **γ (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 **V2** respecto a otro de velocidad **V1** debemos emplear la expresión:

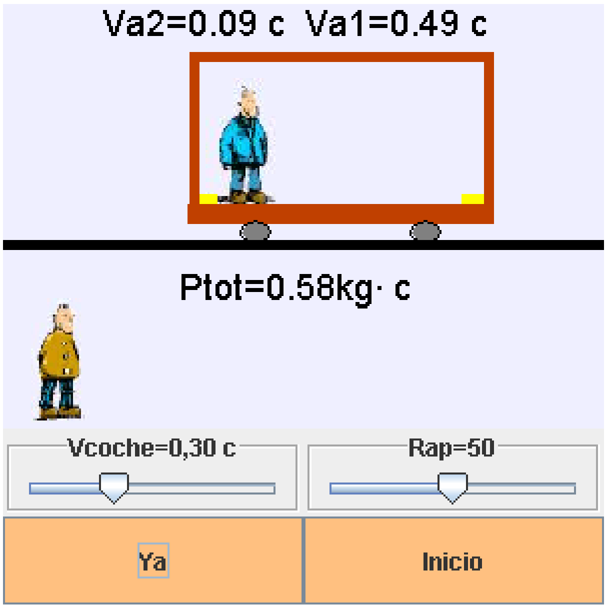
$$Vr = \frac{V1 - V2}{1 - \frac{V1 \cdot V2}{c^2}}$$

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 adjunta demostramos que la conservación del momento dentro de la mecánica relativista exige una profunda alteración de varios conceptos clásicos. Sigamos las actividades de Ayuda, A1, A2 y A3 para comprenderlo.



Ayuda:

Ayuda para entender la escena:

En la escena vemos la desintegración de un bloque de 2 kg de masa en dos fragmentos iguales. Ambos fragmentos parten en direcciones opuestas.

El fenómeno es estudiado por dos observadores, uno inmóvil y otro en el mismo vehículo en que viaja el fragmento que se desintegra.

El control **Vdesintegración** nos permite regular la velocidad con que parten ambos fragmentos, vistos desde el vehículo movil, cuya velocidad podemos alterar con el control **Vcoche**. Ambas velocidades se dan en unidades luz (velocidad de la luz c=1).

El control **Rap** sirve únicamente para variar la rapidez de la simulación.

Los botones **Ya** e **Inicio** sirven respectivamente para arrancar la simulación y devolverla a su situación inicial.

Una vez puesta en marcha, la escena nos informa de la velocidad de cada fragmento para cada uno de los observadores y del momento lineal total del sistema desde el punto de vista clásico, es decir, cada fragmento tiene un momento **p=m·v y** el momento lineal total es la suma de los correspondientes a cada fragmento.

NOTA: El margen de error con que se expresan velocidades y momentos lineales es de 0,01, por eso no deben considerarse significativas diferencias de esa magnitud.

A1: **Cuando los dos observadores están en reposo:**

Pulsemos **Inicio** si es que hemos hecho ya alguna experimentación con la escena.

Manteniendo **Vcoche=0,** es decir que el vehículo está en reposo**,** demos un valor diferente de 0 a **Vdesintegración**, por ejemplo 0,5.

Al pulsar el botón **Ya** ¿con qué velocidad se mueve cada fragmento para cada uno de los dos observadores? ¿Por qué es cero el momento lineal total?.

¿Podemos afirmar que para los dos observadores se conserva el momento lineal total?

Seguramente comprenderemos que esta misma conclusión se habría podido extraer para cualquier otro observador en reposo.

A2: **Cuando uno de los observadores se mueve**:

Pulsamos de nuevo **Inicio** y hacemos **Vdesintegración=0**. Si tomamos ahora **Vcoche=0,3** y pulsamos **Ya**, notaremos una diferencia en el momento total del bloque.

¿En qué consiste esta diferencia? ¿Se puede explicar a qué se debe?

Por supuesto, hasta el momento no ha habido violación de la conservación del momento lineal. Veamos lo que pasa cuando el bloque se desintegra.

Para ello, anotamos el valor actual de Ptot (momentolineal total) para el observador exterior. Ahora, sin cambiar **Vcoche**, vamos aumentando el valor a **Vdesintegración**.

¿Qué va ocurriendo con el momento lineal total del sistema? ¿Se cumple el principio de conservación del momento lineal ?

Evidentemente, si las leyes de la Física para los dos observadores tienen que ser iguales, debemos alterar el concepto de momento lineal. En la siguiente actividad abordamos este paso.

A3: **Momento lineal relativista:**

La magnitud momento lineal de un cuerpo nos mide su capacidad de realizar impulso sobre otro y viene dada clásicamente por:

P=m·v donde m es la masa de cuerpo y v su velocidad. En nuestra escena, la velocidad de desintegración de los bloques viene determinada para el sistema propio del vehículo por la velocidad desintegración introducida por el usuario. Para el otro observador la velocidad de cada bloque viene determinada por las reglas de composición de velocidad relativistas.

Si hemos de introducir alguna modificación en el concepto de momento lineal no podrá ser por tanto en el término velocidad, sino en la otra magnitud implicada la masa.

A partir de ahora supondremos que la masa de un cuerpo no es una constante sino que depende de la velocidad que posea, siendo su valor **m= γ·mo** donde **mo** es la masa del cuerpo en el sistema en el que el cuerpo se v e en reposo y **γ** es el famoso parámetro relativista de valor:

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

Según esto, ¿a qué valor tiende la masa de un cuerpo cuando su velocidad se acerca a la de la luz?

Teniendo en cuenta que la masa nos mide la inercia de un cuerpo a alterar su velocidad, ¿será posible superar la velocidad de la luz?

Una advertencia importante: Si con la nueva noción de masa relativista hayamos el momento total de los dos fragmentos en la escena de la desintegración, observaremos un detalle: para el observador exterior, el momento total tampoco parece conservarse sino que se hace mayor al aumentar la velocidad de desintegración.

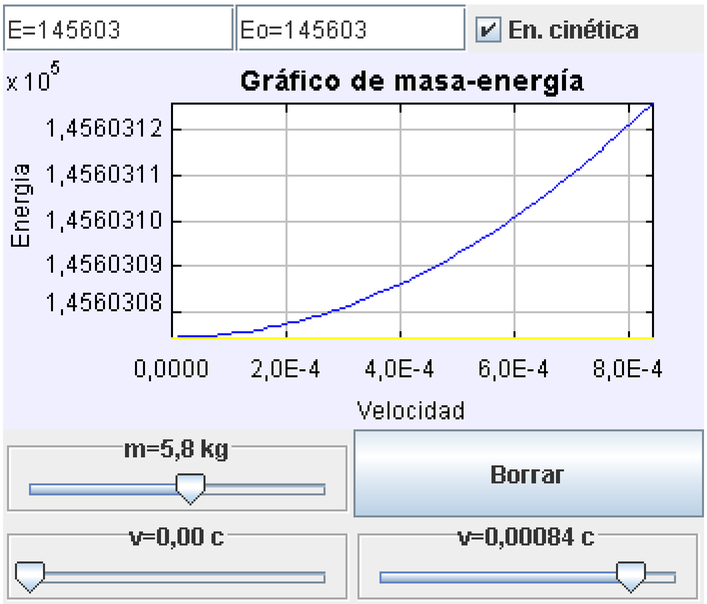
En realidad es que al desintegrarse el cuerpo hay una magnitud que no se conserva ni aún en la física clásica: la energía cinética total de los fragmentos. El aumento de energía que se produce supone, como veremos en el siguiente apartado, una alteración de la masa y, por tanto, del momento lineal de los cuerpos.

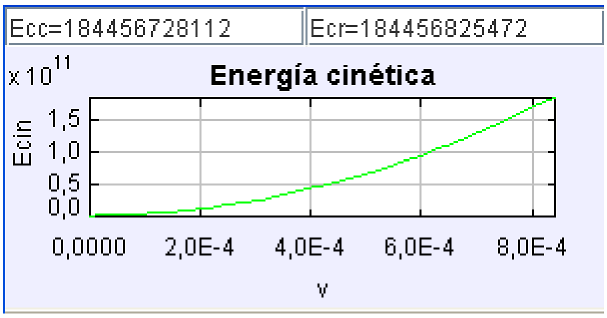
Masa y energía

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.**





Ayuda:

Ayuda para entender la escena:

Si en la expresión **m=γ·mo** de la expresión relativista de la masa, multiplicamos por c^2 en ambos lados obtenemos

$m\cdot c^2=\gamma\cdot mo\cdot c^2$ que tiene en ambos lados dimensiones de energía (las mismas unidades que $1/2\cdot m\cdot v^2$).Como unidad se ha escogido el megavatio-hora (1 megavatio-hora=$3{,}6\cdot 10^{12}$ julios)

Si le restamos el término **$mo\cdot c^2$** obtenemos **$(\gamma-1)\cdot mo\cdot c^2$**.

En la ventana principal de la escena se representan **$E=m\cdot c^2$** (con una línea azul**) y $Eo=mo\cdot c^2$** (con una línea amarilla), ambas en función del valor de la velocidad v de una partícula. Simultanéamente, el sistema nos informa del valor de estas expresiones para cualquier valor de v.

Seleccionando la opción **En. cinética** aparece una ventana auxiliar en la que podemos ver la gráfica de la energía cinética clásica **Ecc** (en color verde) y de la expresión **$E_{cr}=(\gamma-1)\cdot m_o\cdot c^2$,**(en color rojo) también en función de la velocidad. Encima de estas gráficas vemos también el valor de las magnitudes representadas, esta vez en julios.

Disponemos de un control para regular la masa del cuerpo entre 1 y 10 kg y dos controles para regular la velocidad. El primero para grandes valores de la velocidad (hasta 0,9 veces la velocidad de la luz) y el segundo, a la derecha, para valores pequeños de la velocidad. Por debajo de 0,001 c).

El botón **Borrar** permite limpiar la pantalla de las gráficas ya realizadas y retorna a 0 el valor de v.

A1: **Distinción entre E y Eo**:

Vamos a utilizar sólo el control de pequeñas velocidades (el de la derecha). A medida que la velocidad aumenta vemos cómo crecen los números De E y Eo, aunque asombrosamente parecen ser iguales. Si observamos la gráfica veremos que, a medida que aumenta la velocidad, E va creciendo pero la diferencia con Eo está más allá de la sexta cifra decimal Podemos borrar y repetir la experiencia con distintos valores de la masa, para comprobar que en todos los casos obtenemos el mismo resultado.

¿Qué conclusión puedes sacar sobre el valor del coeficiente γ para estos valores? .

Pulsemos **Borrar** y utilicemos ahora el control de velocidades grandes (el de la izquierda). Al aumentar la velocidad ¿Son pequeñas las diferencias entre Ey Eo como en el caso anterior?. ¿Qué relación tiene el coeficiente γ con esta diferencia?.

Bien ya hemos visto que sólo para grandes velocidades hay una diferencia importante entre E y Eo. Sin embargo, el que la diferencia a velocidades menores que 0,001·c sea muy pequeña no quiere decir que no sea significativa.

Pasemos a la siguiente actividad para comprobarlo.

A2: **La energía cinética:**

Pulsemos **Borrar** y volvamos a utilizar el control de las velocidades pequeñas, pero señalando la opción **En.cinética** que nos muestra en pantalla aparte la evolución con la velocidad de la energía cinética clásica y de la diferencia **Ecr=E-Eo**.

Vayamos aumentando el valor de v y observemos la similitud entre los valores de **Ecr** y la energía cinética ¿hasta qué cifra son idénticas?.

Llevemos el control de velocidad hasta su valor máximo 0,001·c (unos 300 km/s, velocidad pequeña comparada con la luz pero 10 veces superior a la de nuestras astronaves). ¿En qué tanto por ciento se diferencian la energía cinética y **Ecr**?

Podemos comprender ahora que **$E_{cr}=(\gamma-1)\cdot m\cdot c2$** , correspondiente a la diferencia entre la masa en reposo y la masa en movimiento de un cuerpo, nos mide la energía cinética del cuerpo.

Si utilizamos el control de grandes velocidades, las diferencias entre la energía cinética clásica y la auténtica energía cinética, **Ecr (energía cinética relativista)**, se incrementan notablemente. Comprobemos en tanto por ciento la diferencia entre las dos expresiones a una velocidad 0,9·c. En realidad, el sentido práctico de este descubrimiento es que para acercarnos a velocidades muy altas hace falta consumir mucha más energía de la prevista en la teoría clásica. Una vez más, la velocidad de la luz aparece como infranqueable.

A3: **Generalizando la relación Masa-energía:**

Recordemos en primer lugar el término Eo asociado a la masa de la partícula pero que no se puede considerar energía cinética porque corresponde a la partícula en reposo.

Einstein postuló que no **$E_o=m_o \cdot c^2$** es la energía en reposo de la partícula, de forma que la partícula que tiene la masa mo puede aniquilarse y convertirse en la cantidad Eo de energía.

En los grandes aceleradores de partículas modernos se ha podido comprobar cómo las partículas se aniquilan con sus correspondientes antipartículas (electrón con positrón, protón con antiprotón...) liberando la energía predicha por esta ley.

En estas máquinas se ha podido efectuar también la experiencia inversa: reunir en un punto la cantidad de energía correspondiente a la creación de un par partícula antipartícula, que se creaban automáticamente. En un apartado posterior veremos algunos ejemplos.

Einstein generalizó la expresión **afirmando que cuando un cuerpo gana cualquier forma de energía, su masa aumenta y cuando pierde cualquier forma de energía, su masa disminuye**. En todos los casos, la expresión **$\Delta E= \Delta m \cdot c^2$** mide la variación de masa **Δm** de un cuerpo cuando su energía varía una cantidad **ΔE**.

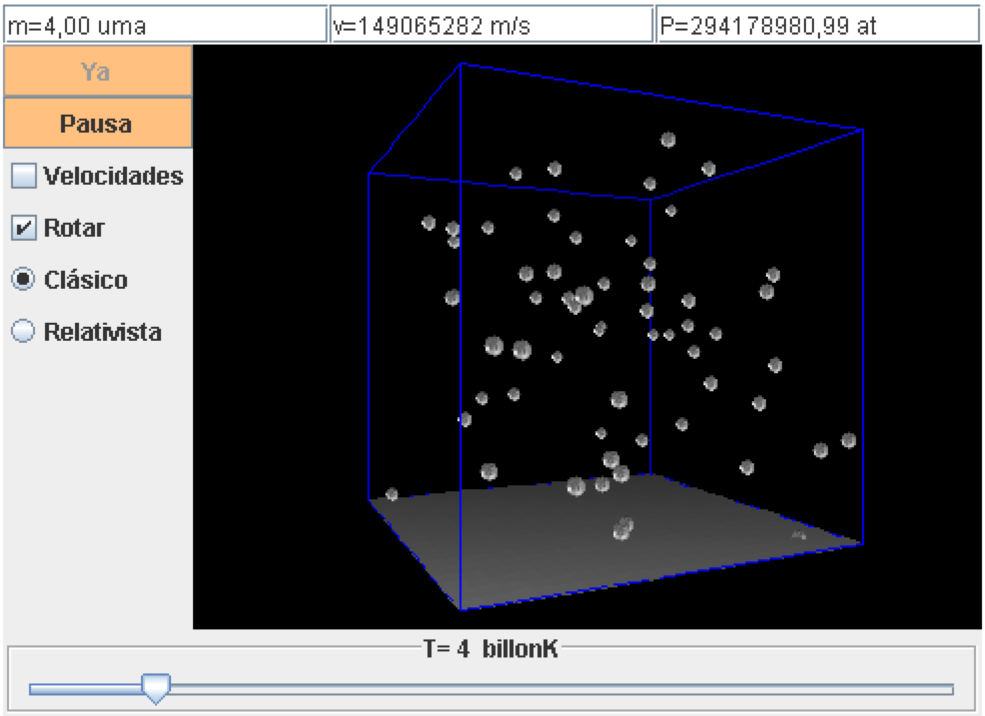
Esta conclusión no vale sólo para la energía cinética, sino para cualquier forma de energía. Lo ilustramos con dos ejemplos:

Energía térmica

y

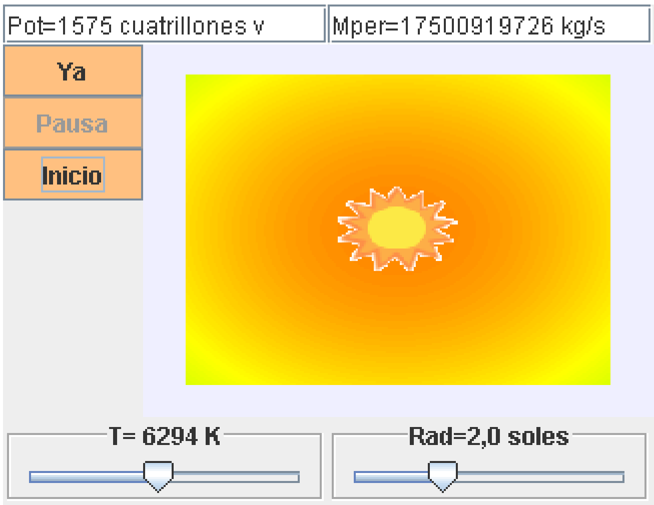
Energía solar

Energía térmica y masa de un gas



Vemos una cierta cantidad de partículas de helio dentro de una caja. Elevando su temperatura billones de grados podemos comparar el valor que toman la masa y la velocidad media de las partículas, así como su presión en el recipiente, desde el punto de vista clásico y desde el relativista. También podemos ver los vectores velocidad de las partículas o rotar el recipiente para ver mejor su interior.

Energía solar



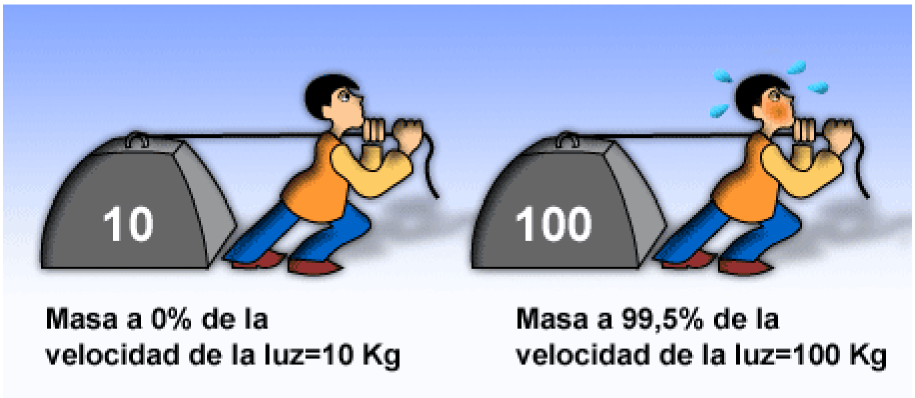
Podemos controlar la temperatura superficial y el brillo de una estrella.

Al pulsar el botón **Ya**, el programa nos informa de la potencia emitida por la estrella en cuatrillones de vatios (en forma de radiación electromagnética) y la pérdida de masa en kilogramos por segundo que supone esa emisión.

El botón **Pausa** detiene la emisión y el botón **Inicio** restaura la situación del comienzo.

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.

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·v** , siempre que admitamos que la masa de una partícula vale: **m=?· mo** donde $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}$ y **mo** es la masa en reposo.
La energía cinética de una partícula vale: Ec= (?-1)·mo·c^2	
Relación masa energía	La masa en reposo de una partícula corresponde a una energía **E=mo·c^2** y cualquier aumento o disminución de energía de una partícula se traduce en una variación de masa dada por: **?E=?m·c^2**

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 contracción del tiempo a gran velocidad hace que sea teóricamente viable.

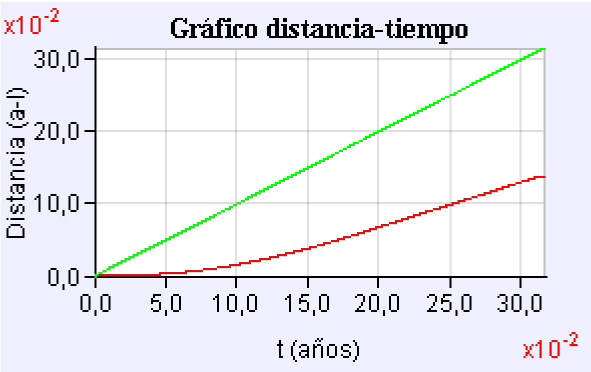
Esta escena simula el viaje de una nave futurista a una de las estrellas no muy lejanas de nuestro Sol.

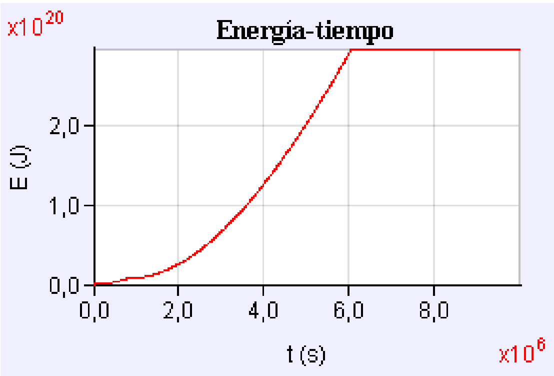
Ayuda:

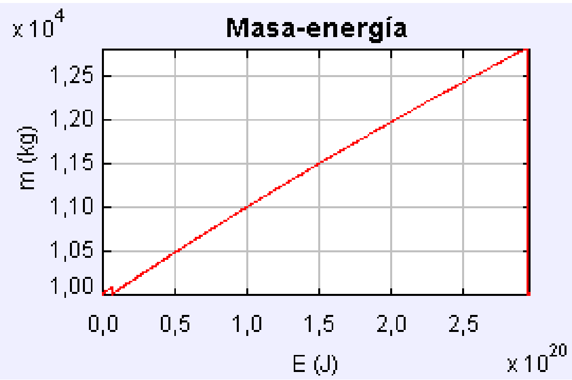
A1:

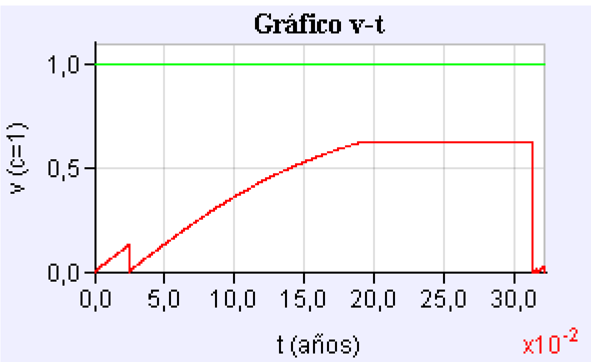
A2:

A3:







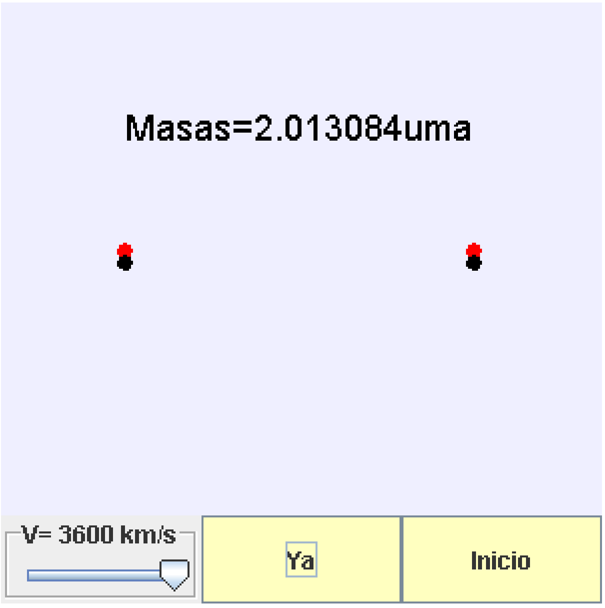


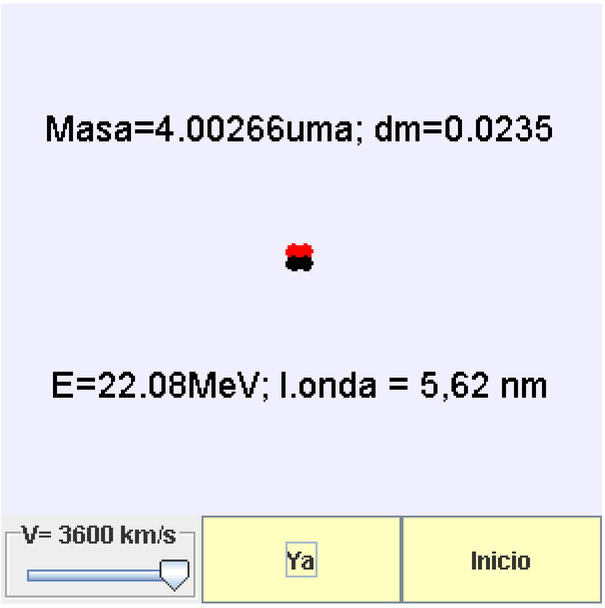
El origen de la energía nuclear

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 adjunta simulamos una de las posibles reacciones de fusión nuclear.





Ayuda:

Ayuda para entender la escena:

Simulamos la unión de dos átomos de deuterio (isótopo del hidrógeno formado por un protón y un neutrón) para dar helio.

El usuario puede controlar la velocidad de partida de los núcleos de deuterio.

El botón **Ya** comienza la simulación, mientras que el botón **Inicio** restaura las condiciones del principio. Después de haber realizado un intento hay que pulsar **Inicio** para realizar otro.

Durante la simulación el programa nos informa de la masa de los núcleos en unidades de masa atómica (1 uma=$1{,}67\cdot10^{-27}$ kg).

Si se logra la fusión nuclear, el programa nos informa de la masa del producto, la variación de la masa total de las partículas, la energía producida y la longitud de onda de uno de los fotones emitidos en ese momento.

En esta simulación suponemos que se emiten dos fotones de direcciones opuestas para permitir que el núcleo final permanezca en reposo.

A1: **Condiciones para la fusión nuclear**:

Inicialmente suponemos que cada átomo de deuterio tiene una velocidad de 1000 km/s hacia el otro. Pulsemos el botón **Ya.**

¿Se produce la fusión nuclear? ¿Qué ocurre exactamente y por qué?

Pulsamos **Inicio**, elevamos la velocidad a 2000 km/s y lanzamos de nuevo las partículas. ¿Obtenemos nuestro objetivo?. De no ser así, aumentaremos la velocidad gradualmente hasta conseguir que las partículas de deuterio se acerquen lo suficiente (hasta una distancia del orden de 10^{-14} m) para que actúen las fuerzas de atracción nucleares.

La dificultad práctica para dar a los núcleos de deuterio esta velocidad está en la base de las dificultades para lograr la fusión nuclear como fuente práctica de energía. ´¿Por qué este tipo de reacciones ocurre continuamente en el Sol?.

A2: **Cuando se logra la fusión:**

Cuando se alcanza la velocidad suficiente los átomos se unen para formarse átomos de 2 protones y dos neutrones, es decir átomos de helio.

¿Qué ocurre en ese momento?

Observemos la masa del helio. ¿Es la misma que la de los dos átomos de deuterio? ¿qué diferencia hay entre la masa total antes y después de la fusión?.

La diferencia de masa se convierte en energía radiante de acuerdo con la ley de Einstein: $E=m\cdot c^2$. Calculemos la energía que se producirá y comparémosla con la que indica el programa (recordando que 1 MeV=$1{,}6\cdot10^{-13}$ J)

Esta energía según el programa se emite en forma de dos fotones idénticos en sentidos opuestos. Recordando que la energía de un fotón es $E=h\cdot f$ donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia asociada al fotón, ¿cómo se calcularía la longitud de onda del fotón?

La longitud de onda de los fotones emitidos en el programa, ¿qué lugar ocupa en el espectro electromagnético?

Si se hubiera emitido un solo fotón, ¿qué hubiera pasado con el núcleo de helio?

A3: **Generalizando lo aprendido**:

Utilizando una tabla periódica, podemos intentar ver cómo se formarían átomos a partir de otros más ligeros por fusión nuclear.

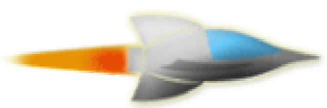
Si se comunica a los núcleos suficiente velocidad inicial, tenderán a fusionarse siempre que el proceso suponga pérdida de energía (todos los cuerpos tienden espontáneamente al estado de mínima energía), es decir, siempre que exista defecto de masa.

Si hacemos la tarea metódicamente y con cuidado, descubriremos que sólo se puede dar la fusión espontáneamente hasta cierto elemento de la tabla periódica. ¿cuál es este elemento?

La existencia de elementos más pesados que éste nos hace suponer que estos elementos se formaron en condiciones muy especiales, más concretamente, durante las explosiones estelares de tipo supernova.

Conclusiones sobre aplicaciones de la teoría relativista

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.

Evaluación

La Teoría de la Relatividad resulta muchas veces difícil de acomodar a nuestro "sentido común", tan lleno de prejuicios. Por eso como actividades de evaluación proponemos:

- Una prueba de autoevaluación, con preguntas sobre los conceptos y algunos ejercicios de aplicación. Llegamos a ella pulsando **prueba**

  .

- Unas actividades de reflexión, en forma de paradojas célebres que han dado mucho que pensar a los físicos. Se proponen como actividades abiertas. El usuario debe encontrar solución a estas paradojas discutiendo con sus compañeros y/o buscando en Internet. Podemos acceder a ellas pulsando **paradojas**

Un sistema de referencia inercial es aquel que:

- A. Tiene mucha inercia, es decir mucha masa.
- B. Cumple el principio de inercia.
- C. Está siempre en reposo.

2. Si un sistema de referencia es inercial, otro que se mueve respecto a él es:

- A. Inercial también.
- B. Inercial si el movimiento es acelerado.
- C. Inercial si el movimiento es uniforme.

3. La velocidad de la luz en el vacío

- A. Es igual para todos los observadores.
- B. Depende de la velocidad del observador.
- C. Depende de la velocidad del foco emisor.

4. El tiempo entre dos sucesos

- A. Es igual para todos los observadores.
- B. Depende de la velocidad del observador.
- C. Depende del tamaño del sistema de referencia.

5. La longitud de un cuerpo

- A. Es igual para todos los observadores.
- B. Depende de la velocidad del cuerpo.
- C. Depende del sentido del movimiento.

6. Si dos cuerpos se cruzan a la velocidad de la luz, su velocidad relativa

- A. Es la velocidad de la luz.
- B. Es nula.
- C. Es dos veces la de la luz.

7. Si aplicamos fuerzas idénticas a dos partículas iguales, una en reposo y otra en movimiento muy rápido:

- A. Las dos tendrán la misma aceleración .
- B. Tendrá mayor aceleración la que está moviéndose.

C. Tendrá mayor aceleración la que está en reposo.

8. Si calentamos extraordinariamente un gas

A. Su masa aumenta.

B. Su masa es siempre la misma.

C. Su masa se reduce al expandirse.

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

A. Es un resultado imposible.

B. Ha habido emisión de energía.

C. Ha habido absorción de energía

10. Si Una partícula emite un fotón

A. Pierde masa.

B. No pierde masa porque la masa de los fotones es 0.

C. Se queda inmóvil.

11. Desde el punto de vista de un investigador de laboratorio, un protón y un neutrón se encuentran en cierto instante a un metro de distancia, con velocidades de igual valor (2·108 m/s) y direcciones iguales, pero sentidos opuestos.

A. v'n= 2,77·108m/s.

B. v'n= 4·108m/s

C. v'n= 2·108m/s.

12. Un haz electrónico, cuyos electrones tienen una velocidad inicial de 106m/s, penetra en un acelerador de partículas donde sufre una diferencia de potencial aceleradora de 3·105 V. Determina la velocidad que alcanzan.
Datos del electrón: carga= -1,6·10-19C; masa= 9,1·10-31kg.

A. v=3,25·108 m/s.

B. v= 2,33·108m/s.

C. v= 1,33·108m/s.

13. Se determina en un laboratorio que cierta partícula nuclear inestable X es improbable que subsista sin desintegrarse más de 10-9s. Estudiando un haz de partículas X, provenientes de cierta reacción nuclear, se observa que han recorrido una distancia de 3 m. antes de desintegrarse. ¿A qué velocidad se mueven las partículas?

A. v=2,985·108m/s.

B. v=3·109m/s .

C. v=1,985·108m/s .

14.Dos hermanos gemelos del futuro siguen vidas muy diferentes: el día que cumplen 20 años uno emprende la aventura del vuelo espacial a una estrella situada a 30 años luz de la Tierra y otro opta para siempre por la vida sedentaria en nuestro planeta. Al

cabo de 60 años y 12 días el hermano aventurero regresa tras viajar a una enorme velocidad. ¿Qué edad biológica tiene en ese momento el viajero? (Supóngase que la rapidez del viaje ha sido constante)

- A. 80 años y 12 días.
- B. 20 años.
- C. Casi 22 años.

15. Una nave espacial de 105 kg de masa tiene un sistema de propulsión (sin pérdida de masa) que le proporciona 10.000 CV de potencia neta. ¿Cuánto tiempo tardará en alcanzar una velocidad 0,99·c?

- A. 7520 horas.
- B. 75,2 años.
- C. 236 millones de años.