

## Unidad 4

**El mundo relativista*****(a) Relatividad clásica e invarianza de la velocidad de la luz***

## Detalle de contenidos

- **Ecuaciones de transformación de Galileo**  
Sistemas de referencia. Relatividad clásica. Coordenadas de un evento. Ecuaciones de transformación de Galileo para la posición el tiempo y la velocidad en referenciales en movimiento relativo uniforme. Ejemplos.
- **Estado de la física inmediatamente antes de la teoría de la relatividad de Einstein**  
El experimento de Michelson y Morley, el éter cósmico y el movimiento absoluto de la Tierra. El espacio tiempo absoluto de Newton.
- **Ley de la relatividad especial**  
Constancia de la velocidad de la luz ( $c$ ).

***Actividades genéricas y ejemplos a elegir****Actividad A*

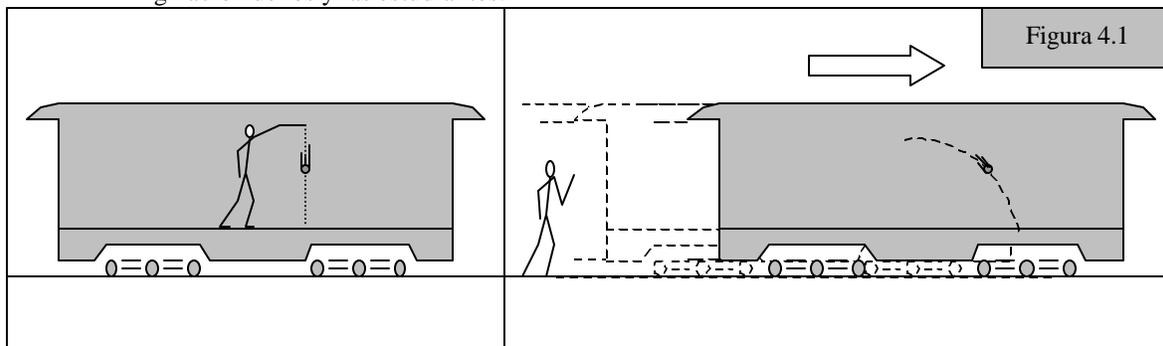
Analizan y discuten las diferencias en la descripción de un movimiento desde dos sistemas de referencia distintos. Reconocen los diferentes sistemas de referencia en que ocurre lo cotidiano.

*Ejemplos*

1)  $\kappa$  Describen en términos generales la caída libre de un objeto en el interior de un tren que viaje a velocidad constante, como es registrado por un observador que viaja en él, y por otro, en el suelo, que lo ve pasar.

**Indicaciones al docente**

Destacar que para el observador situado en el tren el movimiento del objeto que cae es rectilíneo mientras que para el observador en tierra firme, describe una trayectoria curva (una parábola). Hacer ver que mientras para el observador en el tren la velocidad inicial del objeto es cero, para el otro, es la del tren. El análisis de una figura como la siguiente (4.1) puede ayudar la imaginación de los y las estudiantes.



Para introducir la idea es conveniente que los alumnos hagan la experiencia previamente. Ella se puede realizar en un tren, bus, o simplemente en el patio de la escuela. Para ello el curso observa desde unos cuantos metros distancia a un o una compañera corriendo en línea recta a la vez que suelta de una mano una piedra. Verán que ésta describe una trayectoria parabólica como si hubiese sido disparada, mientras que el o la joven que corría ve caer la piedra al lado de sus pies, como si hubiese estado en reposo. Lo importante en una actividad como ésta es que los y las estudiantes reconozcan que un mismo fenómeno, la caída de un objeto, por ejemplo, puede ser descrito desde diferentes lugares (tren, suelo, etc.) en movimiento relativo, que denominaremos *sistemas de referencia*, obteniendo en general diferentes resultados. Es también importante que reconozcan que en este caso las descripciones hechas por dos observadores diferentes de un mismo fenómeno son ambas correctas. En segundo medio se introduce esta idea, razón por lo cual no debe constituir una gran novedad.

Advertir que la relatividad de la que se ha hablado hasta aquí no es invención de Einstein y corresponde a un descubrimiento que hace ya varios siglos por parte Galileo Galilei, y que hoy denominamos relatividad clásica.

---

2) κ Relatan y analizan experiencias que pongan de manifiesto el que existen sistemas de referencia en los cuales los fenómenos se presentan en forma diferente. Distinguen sistemas inerciales y no inerciales. Discuten acerca de la posible existencia de sistemas inerciales en el Universo.

**Indicaciones al docente**

Es conveniente motivar esta actividad leyendo al curso la experiencia del propio Galileo Galilei cuando realizaba un viaje en barco. En la bibliografía del presente documento se mencionan algunas obras de historia de la física en que se puede leer el relato del propio Galileo. Lo que la y el estudiante debe imaginarse a partir de sus propias experiencias es que al despertar en una cabina del navío que se mueve uniformemente, Galileo no puede distinguir atendiendo a sus sentidos si el barco en que se encuentra se mueve o no, él debe salir de su camarote para darse cuenta de su movimiento. Galileo agrega que si realizara experimentos diversos al interior de su camarote estos tampoco le permitirían concluir si el barco se mueve o no. Si de lo alto de un mástil se dejan caer gotas de agua sobre una botella de gollete angosto, igualmente caerán dentro de ella esté el barco en reposo en el puerto o con movimiento uniforme en el alta mar. El estudiante puede recordar situaciones similares que ha experimentado estando en un bus o tren. Más de alguna vez se ha empezado a mover suavemente y hemos creído que es el bus o tren de al lado el que se ha empezado a mover y nos sorprendemos al descubrir que es el nuestro.

Es fundamental que alumnas y alumnos adviertan que lo descrito no es una consecuencia de que la velocidad de un sistema de referencia respecto del otro sea pequeña, sino de que el movimiento sea rectilíneo y uniforme. Cualquier aceleración (cambio en la rapidez del movimiento o de su dirección) pone de manifiesto de un modo inmediato el movimiento del vehículo sobre el que estemos viajando. Con el propósito de que los y las jóvenes se vayan acostumbrando a los “experimentos pensados” que nos sugiere Einstein al explicar su teorías, podemos apelar a su imaginación haciéndoles suponer que se encuentran dentro de un bus, tren o nave espacial que viaja en línea recta y con velocidad constante, bajo la condición de que no podamos ver hacia fuera. ¿Cómo, o con qué experimento, podríamos poner de manifiesto si el vehículo en que nos encontramos se mueve o no?

Una vez realizadas estas discusiones la conclusión del debate debe ser conducido por el maestro en el sentido que alumnos y alumnas reconozcan que hay dos tipos de sistemas de referencia: aquellos en que por el hecho de acelerar, advertimos sus movimientos, y otros en que tal cosa no es posible. Puede hacerse ver que en los primeros: trenes, automóviles, bicicletas, que aumentan su rapidez, frenan o enfrentan curvas, no se cumple la ley de inercia, razón por la cual se los denomina *sistema de referencia no inerciales*. En aquellos en que no es posible advertir sus movimientos, sí se cumple este principio, razón por la cual se los denomina *sistemas inerciales*. En una instancia de evaluación se puede recurrir a ejemplos como un carrusel en reposo o girando, una estación espacial en reposo o girando, una ultracentrífuga, etc.

Un tema central de discusión es si existen o no sistemas de referencia inerciales. Examinar este tema con los estudiantes. Discutir si la sala de clases o la superficie terrestre es o no un sistema de referencia inercial. El y la estudiante debe reconocer que con una muy buena aproximación tanto en la sala de clases como en el patio de la escuela se cumple la ley de inercia, y que allí no sentimos fuerzas extrañas como las que sentiríamos sobre un carrusel girando. Por tanto con un buen grado de aproximación se les puede considerar como sistema de referencia inercial. Puede recordarse que experimentos de gran sensibilidad, como el del péndulo de León Foucault<sup>1</sup> (1819 – 1868), muestran que en rigor nuestro planeta no es un sistema de referencia absolutamente inercial.

El profesor o profesora debe cerrar esta discusión haciendo una rigurosa formulación del principio de relatividad de Galileo: Si las leyes de la mecánica son válidas en un sistema de referencia, entonces también se cumplen en cualquier sistema de referencia que se mueva rectilínea y uniformemente respecto del primero. Establecer que, como lo hace la teoría de la relatividad; en lo sucesivo supondremos que en el Universo existen sistemas de referencia inerciales.

Discutir acerca de la necesidad de contar con un sistema rigurosamente inercial para referir a él la situación de otros sistemas. Discutiendo con alumnos y alumnas su justificación, comentar que el conjunto de estrellas lejanas se toma por un sistema de referencia inercial. ¿Cómo es ello posible si se mueven a grandes velocidades?

### Actividad B

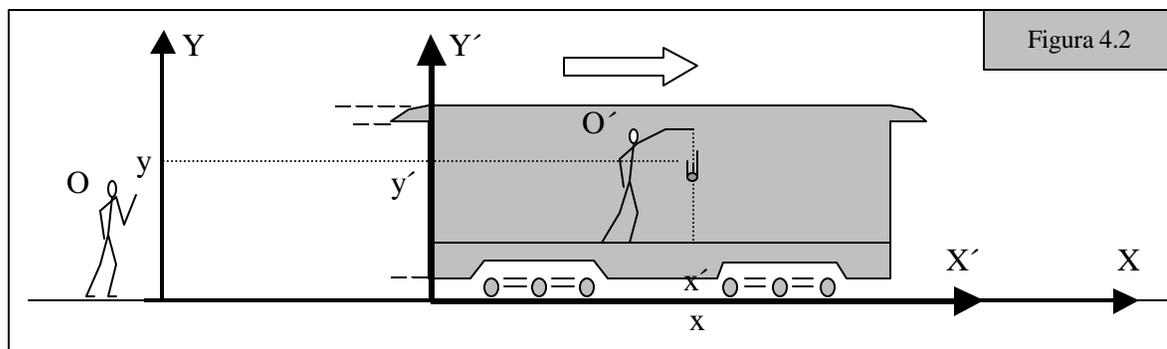
Deducen, analizan y aplican las ecuaciones de transformación de Galileo a situaciones de movimiento relativo rectilíneo y uniforme.

### Ejemplos

- 1) κ A partir de una reflexión sobre experiencias cotidianas, deducen las ecuaciones de transformación de Galileo para sistemas de referencia inerciales (SRI) en movimiento relativo.

#### Indicaciones al docente

Definir el concepto de evento en el *espacio – tiempo*, como un conjunto de valores que fija la posición en que ocurrió un hecho y el momento en que sucedió. Proporcionar a continuación ejemplos: el abrir los dedos en el acto de dejar caer un objeto, el impacto de este objeto en el suelo, el choque de dos moscas, etc. Acordar con alumnas y alumnos el diferenciar ambos SRI primando los valores medidos por el observador en “movimiento” ( $x', y', z', t'$ ) y denotando ( $x, y, z, t$ ) los valores medidos por el observador en el suelo. Suponer que las reglas con las que miden los observadores O y O' están en las mismas unidades y que los relojes que emplean han sido previamente sincronizados.



<sup>1</sup> Véase Programa de Física de segundo medio.

Ejemplificando continuamente con ejemplos de la vida cotidiana y en base al análisis de una figura como la 4.2, construir con alumnos y alumnas las relaciones de transformación de un sistema de referencia inercial a otro,

$$x = x' + Vt$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

llamadas *ecuaciones de transformación* de Galileo. Como se han escrito, entregan las coordenadas de un evento para el observador en el suelo en términos de lo que mide el observador en el tren para el mismo evento. Notar que las relaciones se pueden invertir,

$$x' = x - Vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t,$$

y discutir con alumnas y alumnos el significado de estas nuevas relaciones.

Con la ayuda de una figura como la 4.3 los y las estudiantes deducen que la velocidad con que corre el niño o niña para el observador fijo al suelo es,

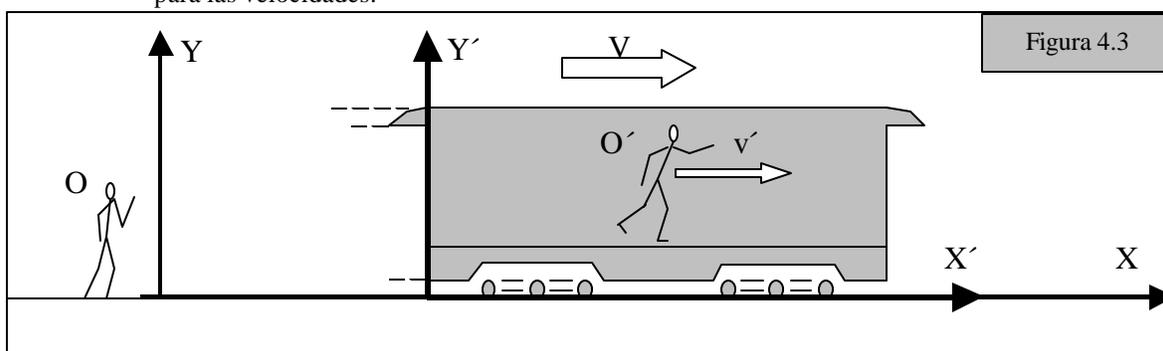
$$v = v' + V$$

y, a la inversa,

$$v' = v - V.$$

Hacer ver que estas relaciones se obtienen de las de más arriba a partir de las definiciones

$\frac{x}{t} = V$ ,  $\frac{x'}{t'} = v'$ . Estas expresiones constituyen las ecuaciones de transformación de Galileo para las velocidades.



Un par de ejercicios para familiarizar a las y los estudiantes con las ecuaciones de transformación de Galileo para eventos y velocidades puede ser suficiente. Por ejemplo; si en la figura 4.3 la persona deja caer una manzana desde una altura de 1,5 metros cuando está a 10 metros de la parte trasera del vagón y cuando su reloj marca las 4:10 ¿cómo describiría este evento el observador O, si el tren viaja en línea recta y con una velocidad constante de 72 km/h (20 m/s)? Suponer que los ejes Y e Y' coincidían cuando los relojes marcaban la hora cero. También se puede preguntar ¿cuál es la velocidad inicial de la manzana para el observador O?

- 2) κ Analizan críticamente la invarianza de las leyes de la mecánica bajo las transformaciones de Galileo (principio de relatividad de Galileo). Analizan el caso de las tres leyes de Newton y la ley de conservación de la energía.

**Indicaciones al docente**

Conviene preparar bien esta actividad pues suele inducir a confusión. Cuidar de no confundir “magnitud física” con “ley física”: la temperatura, la velocidad o el color de un objeto son magnitudes. La expresión  $F = ma$  es en cambio una ley. En este caso particular la invarianza se

puede obtener de la observación que la aceleración y la fuerza no cambian bajo las transformaciones de Galileo. En el caso de la energía cinética, ella cambia al ir de un SRI a otro; sin embargo su constancia en el tiempo es válida en cada SRI.

### Actividad C

## Analizan algunos hitos de la historia de la física previos a la aparición en escena de Einstein.

### Ejemplos

1)  $\kappa$  Comentan y analizan desde un punto de vista cualitativo el célebre experimento de Michelson y Morley, el concepto de éter cósmico y los intentos de medir la velocidad absoluta de traslación de la Tierra.

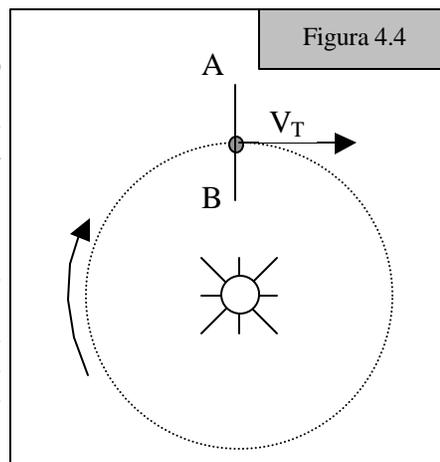
#### Indicaciones al docente

Estos comentarios o análisis los pueden realizar los y las estudiantes a partir del relato del propio profesor o profesora, a partir de la lectura de algún texto adecuado en que se trate el tema en forma simple, a partir de algún video o software para computadora.

Resaltar la siguiente secuencia de aspectos:

- 1) En 1887 Michelson y Morley construyeron un aparato que era capaz de medir diferencias en la velocidad de la luz con una incerteza de apenas unos pocos km/s. Si bien cabe mostrar un gráfico del dispositivo usado por ellos y mencionar superficialmente alguno de sus detalles, fáciles de encontrar en libros y enciclopedias para computadora, no es conveniente profundizar demasiado en el interferómetro mismo.
- 2) Los físicos en ese entonces creían que la luz se propagaba en un medio bastante sutil que debía llenar todo el espacio y que habían bautizado con el nombre de éter cósmico. El fundamento de esta creencia puede explicarse recordando temas tratados en primero medio, como que una onda en una cuerda requiere de la cuerda para su existencia, lo mismo que las ondas en agua requieren del agua para su existencia y el sonido, del aire u otro medio. Ahora bien, como se sabía en aquella época que la luz tenía un claro comportamiento ondulatorio, debía existir un medio que sustentara las vibraciones correspondientes (campos eléctrico y magnético). Se puede explicar que los físicos imaginaban al Universo lleno de una especie de gelatina en la cual estaban insertas las cosas, estrellas y átomos, y que la vibración de esta gelatina era lo que llamamos luz.
- 3) Los astrónomos por su parte estimaban en unos 30 km/s la rapidez orbital  $V_T$  de la Tierra en relación al Sol y consideraban posible que éste también se moviese en el éter cósmico, en alguna forma.

De acuerdo a las ecuaciones de Galileo para la transformación de velocidades un rayo de luz emitido en la dirección de movimiento de la Tierra viajará, respecto del éter, a la velocidad  $c + V_T$ . Aquí suponemos que el Sol está inmóvil en el éter. Por otro lado, un rayo emitido en la dirección perpendicular AB (figura 4.4) viajará con velocidad  $c$ . Michelson y Morley midieron la diferencia entre las velocidades de propagación en ambas direcciones esperando encontrar el valor  $V_T$ . El resultado del experimento fue sin embargo sorprendente e inexplicable: no se advertía diferencia alguna en la velocidad de la luz entre ambas direcciones del espacio. Cuidadosas revisiones de los instrumentos y de la metodología empleada mostraron una y otra vez el mismo resultado.



Evidentemente en el momento histórico en que esto se vivía (finales del siglo XIX) éste era un gran problema para la física. Puede ser oportuno mencionar los muchos intentos por explicar el experimento por parte de varios científicos de la época, entre los cuales destaca Hendrick

Lorentz. Puede mencionarse por ejemplo la hipótesis del arrastre del éter, la contracción ad hoc que según Lorentz experimentaría la materia, etc.

Puede ser adecuado dar a investigar las biografías de Albert Michelson (USA, 1852 – 1931), Edward Morley (USA, 1838 – 1923), Hipólito Fizeau (francés, 1819 – 1896), Hendrick Lorentz (danés, 1853 – 1928), etc. y del propio Albert Einstein (alemán, 1879 – 1955). De todos estos científicos, ligados a los inicios de la teoría especial de la relatividad, y particularmente de Einstein, hay abundante material en libros, enciclopedias para computadoras y en internet.

---

2) κ Comentan y analizan los conceptos de espacio y tiempo que están implícitos en la física tradicional liderada por las ideas de Galileo y Newton.

**Indicaciones al docente**

El análisis que se pide en este ejemplo puede iniciarse planteando algunas preguntas básicas, como por ejemplo, ¿qué se entiende por espacio? ¿qué se entiende por tiempo? ¿son infinitos? ¿dependen de la existencia de materia? Para los efectos del trabajo de esta Unidad orientar a alumnos y alumnas a centrar su atención en el problema de medir distancias y tiempos. Destacar la importancia de la geometría para lo primero. Si dos reglas tienen la misma longitud cuando están una junto a otra, y dos relojes marchan sincronizados al estar uno junto al otro, ¿seguirán midiendo lo mismo las reglas y seguirán sincronizados los relojes si uno se mueve respecto del otro? La respuesta de Galileo y Newton es afirmativa. Si dos amigos deciden viajar y juntarse luego en cierto sitio, es cosa que se pongan de acuerdo en el lugar del encuentro, sincronizar sus relojes y acordar un instante para la reunión y con seguridad se encontrarán. Los kilómetros que recorren los viajeros y las horas que transcurren no se ven alteradas. También se puede decir que dos eventos simultáneos para un observador deben serlo también para cualquier otro observador, en reposo o en movimiento respecto de nosotros. En este punto es siempre necesario recalcar que se trata de una igualdad en lo que se mide y no en lo que se percibe. Ilustrar la idea por medio de un ejemplo: si una puerta y una ventana en una habitación se cierran simultáneamente, una persona que esté justo en medio de ellas escuchará los acontecimientos en forma simultánea. Sin embargo si la persona está más cerca de la puerta, la oirá cerrarse primero porque la señal (sonido) demora menos tiempo en llegar a él, no obstante los acontecimientos son simultáneos. Puede ser interesante en este punto preguntarles a los y las estudiantes cómo proceder para sincronizar sus relojes si están uno de otro a una distancia muy grande, por ejemplo, dos estrellas en la galaxia.

Estas ideas describen básicamente los conceptos clásicos de espacio y tiempo. Ambos obedecen a la lógica asociada a nuestra experiencia cotidiana y extendidas a todo el Universo. Los historiadores de la ciencia se refieren a estos conceptos como espacio y tiempo absolutos, y los asocian a la figura de Newton. Cabe señalar que ambos conceptos se vieron profundamente modificados por la teoría de la relatividad de Einstein.

*Actividad D*

Analizan el significado de la igualdad de la velocidad de la luz en el vacío en todos los SRI.

*Ejemplos*

---

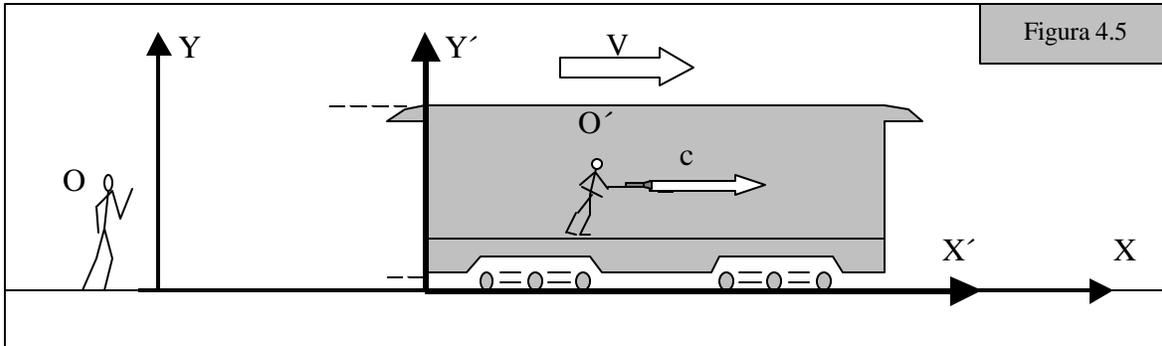
1) κ Enumeran diversas situaciones en las cuales es evidente que la velocidad medida en diferentes SRI da diferentes valores: un perro corriendo en el interior de un tren, una mosca volando en el interior de un automóvil, el sonido en una ráfaga de viento, un pez nadando en un río que escurre velozmente, etc.

---

2) κ Analizan el significado de la frase “la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia inerciales”. Comprueban su inconsistencia con las ecuaciones de transformación de velocidades de Galileo.

### Indicaciones al docente

Conviene volver a los trenes y observadores. Imaginemos un joven arriba de un vagón de tren que viaja rectilínea y uniformemente con la fantástica velocidad  $V = 100.000 \text{ km/s}$  respecto del observador  $O$  con los pies en el suelo (figura 4.5). Si este joven enciende su linterna iluminando en la misma dirección en que viaja el tren, medirá, en relación al tren, una velocidad para el rayo de luz de  $300.000 \text{ km/s}$ . Si el observador  $O$  se las arregla para medir la velocidad del mismo rayo de luz sorprendentemente encontrará el mismo valor y no el que esperaría, según las ecuaciones de transformación para la velocidad de Galileo,  $300.000 \text{ km/s} + 100.000 \text{ km/s} = 400.000 \text{ km/s}$ . Si el joven arriba del tren ilumina en sentido contrario a la dirección en que se mueve, ambos observadores medirán nuevamente el mismo valor:  $300.000 \text{ km/s}$  y no lo esperado desde el punto de vista de Galileo para  $O$ ,  $300.000 \text{ km/s} - 100.000 \text{ km/s} = 200.000 \text{ km/s}$ .



Este es un ingrediente central de la teoría especial de la relatividad de Einstein, quien a los 16 años ya se preguntaba qué ocurriría si viajara a la velocidad de la luz.

Einstein sin embargo va más lejos: en efecto, erradica por completo el concepto de éter cósmico y simplemente sostiene que la luz viaja en el vacío con una velocidad constante de  $300.000 \text{ km/s}$ , independiente del movimiento tanto de la fuente que la emite como del que la mide.

Evidentemente esto contraría el sentido común y es posible que el estudiante declare no comprender. En tal caso puede estar ocurriendo algo diferente que es necesario indagar: es posible que no logre imaginárselo. Si fuera así conviene hacerle ver al alumno que en ocasiones deberá renunciar a intentar imaginarse algunas de las cosas que se plantean en la física y que ésta es una parte importante en la actitud necesaria para asimilar muchos aspectos de la física moderna. En el caso que nos concierne, se trata de velocidades muy grandes, ámbito en el cual no tenemos experiencia cotidiana y cualquier cosa podría pasar.

Otro punto importante de considerar es que si bien hemos hablado de luz visible, la constancia de la velocidad es válida para todas las ondas electromagnéticas, es decir, también en las ondas radiales, microondas, infrarrojo, ultravioleta, rayos X, etc. Seguiremos hablando de luz sólo porque es más cómodo. Comentar que el primer trabajo que publica Einstein sobre estas ideas tenía por título "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento".

Como puede verse, la teoría de la relatividad no dice que todo sea relativo. Ya hay algo en ella que es absoluto: la velocidad de la luz, de la cual se dice también que es un invariante relativista.

## ***(b) Postulados relativistas y sus consecuencias***

Detalle de contenidos
-----------------------

- **Los postulados de la relatividad especial**  
Relatividad de la simultaneidad. Derivación geométrica de la expresión de la dilatación del tiempo. La paradoja de los gemelos.
- **La variación de la masa con la velocidad**  
Descripción y significado de la expresión relativista para la masa de un cuerpo en movimiento. Gráfico de  $m(V)$ .
- **Verificaciones experimentales de la relatividad especial**  
Medición de la vida media de los muones.

<b><i>Actividades genéricas y ejemplos a elegir</i></b>
---

### *Actividad A*

Analizan y discuten los postulados de la relatividad especial. Derivan las consecuencias de aceptar la invarianza de la velocidad de la luz sobre la simultaneidad de eventos y la medición de intervalos de tiempo.

### *Ejemplos*

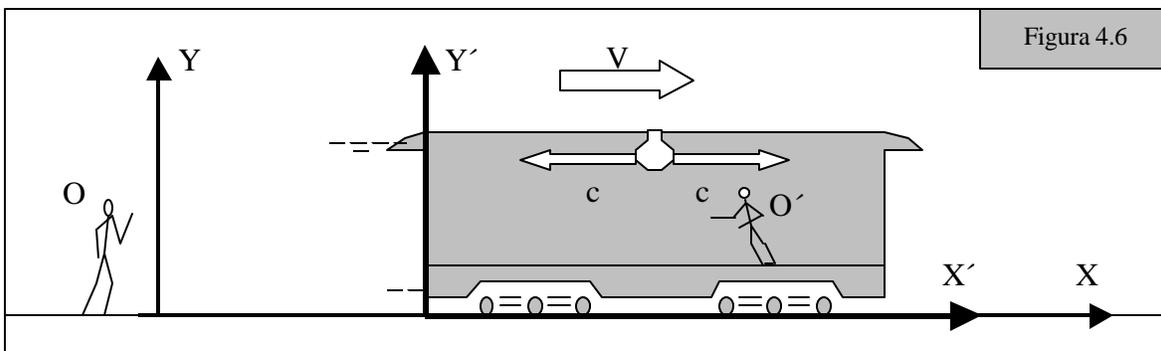
- 1) κ Discuten los contenidos de los postulados de la relatividad especial.

**Indicaciones al docente**

El primer postulado, que la velocidad de la luz es la misma en todos los SRI, es muy contrario a la intuición. En este aspecto convendría recalcar que esa velocidad es tan grande que no ha jugado ningún papel en formar nuestra intuición. Puede ser instructivo comparar las velocidades de la luz y el sonido a través de algunos ejemplos, donde se aprecie que, comparativamente, según nuestra experiencia cotidiana la luz se propaga en forma instantánea. El trueno y el relámpago constituyen un buen ejemplo: entre sus velocidades hay un factor de un millón, del primero percibimos ecos, etc.

El segundo postulado, que las leyes de la física son las mismas en todos los SRI, es más sutil. Recordar que Galileo estableció esta equivalencia sólo para las leyes de la mecánica, y que hay otros ámbitos en que aparecen leyes, como en electromagnetismo. Comentar que el primer postulado se refiere a la luz, un fenómeno electromagnético y no mecánico, por lo cual la teoría de Einstein se propone compatibilizar lo que nos dicen los experimentos sobre la luz, con la mecánica. Hay abundante bibliografía que discute estos postulados. Se prestan para un ensayo de parte de los estudiantes.

- 2) κ Analizando una situación ideal como la que se ilustra en la figura 4.6 comprueban que la simultaneidad de dos eventos (llegada de los rayos de luz a los extremos del vagón) es un hecho relativo.

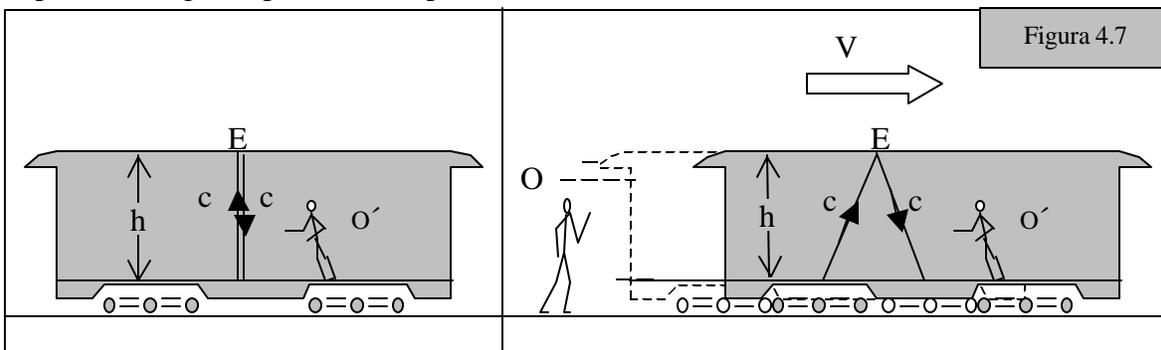


#### Indicaciones al docente

El y la estudiante debe examinar la situación basado en la invarianza que posee la velocidad de la luz para todos los observadores, en este caso O y O'. Si hay una ampolla justo en medio del vagón, es obvio que al encenderla los rayos de luz que viajan en sentidos opuestos alcanzan simultáneamente los extremos del vagón según el observador O' y, en consecuencia, para éste los dos eventos son simultáneos. Para el observador O en cambio, el rayo que viaja en el sentido contrario a aquel en que se mueve el tren debe alcanzar el extremo del vagón antes ya que deberá recorrer una distancia menor porque el fondo del tren se le está aproximando. En consecuencia para O el rayo de luz llega primero a la parte trasera del vagón y después a la delantera. Según O ambos eventos no son simultáneos.

Es preciso decir aquí que de lo que habla la teoría de la relatividad no es de lo que las personas O y O' perciben con sus ojos sino que de lo que registran por ejemplo cronómetros previamente sincronizados que se detienen cuando los rayos de luz llegan a ellos. Preguntar a los y las estudiantes por qué si lo que se plantea aquí es verdadero no lo notó Newton en su época, o nosotros en el diario vivir. Para explicarlo bastará examinar la situación a partir de un ejemplo numérico. En efecto, si se imagina un vagón de largo  $L = 9$  m que viaja a una velocidad de 10 m/s la luz demorará  $\frac{L}{2(c - V)}$  s en llegar al extremo que se aleja y  $\frac{L}{2(c + V)}$  s al extremo que se acerca. En otras palabras, O detecta entre los eventos examinados una diferencia de tan solo  $\frac{VL}{(c^2 - V^2)} \approx 10^{-15}$  s, completamente indetectable sin la ayuda de instrumentos muy sofisticados.

- 3) κ Con la ayuda de una figura como la 4.7 deducen el retraso que un reloj en reposo respecto del vagón experimenta respecto de uno en tierra.

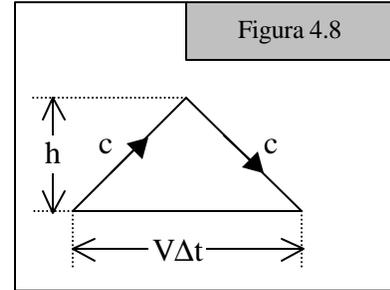


#### Indicaciones al docente

Supóngase que una persona en el vagón enciende una linterna orientada verticalmente hacia el techo de modo que el rayo de luz se refleja en un espejo E y luego regresa al punto de partida.

Para la persona en el vagón (O') el tiempo que demora el rayo en ir y venir es  $\Delta t' = \frac{2h}{c}$ , llamado "tiempo propio" por corresponder al sistema de referencia en que se realiza el experimento

De la misma situación el observador fijo al suelo (O) hace una descripción distinta: el rayo parte de un punto del espacio y llega a otro. Recorre en total una distancia mayor aunque con la misma velocidad  $c$ , que puede calcularse con ayuda del teorema de Pitágoras, como se ilustra en la figura 4.8. La base del triángulo que se muestra corresponde a la distancia que recorre el vagón en el tiempo  $\Delta t$  que, según O, demora el rayo de luz desde que parte hasta que llega.



Para O la luz recorre una distancia  $d = 2\sqrt{h^2 + \left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2}$  en un tiempo  $\Delta t = \frac{d}{c}$ . Para

O' en cambio, la luz ha recorrido la distancia  $2h$  en el tiempo  $\Delta t' = \frac{2h}{c}$ . Usando estas rela-

ciones se obtiene  $\Delta t = \frac{2}{c} \sqrt{\left(\frac{c\Delta t'}{2h}\right)^2 + \left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2}$  de donde, despejando  $\Delta t$  se obtiene:

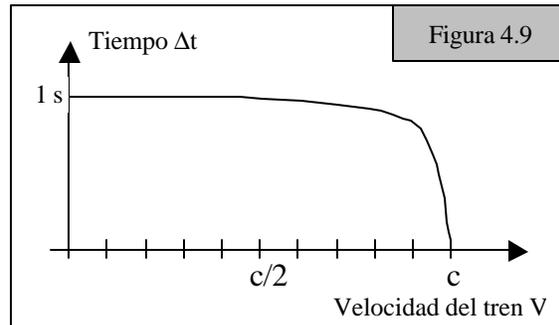
$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Los tiempos transcurridos no tienen la misma duración para los observadores

O y O'.  $\Delta t'$  es mayor que  $\Delta t$ , razón por la cual decimos que para O el tiempo de O' se ha dilatado. Notar que si V se aproxima a c el tiempo en el vagón tiende a transcurrir infinitamente lento. Por otro lado, como la expresión depende del cuadrado de  $v/c$ , si  $V \ll c$  el efecto se puede despreciar. Ejemplos numéricos como los siguientes aclaran el significado de esta importante relación típicamente relativista.

Si las personas que están arriba del tren miden para un cierto proceso una duración de  $\Delta t' = 1$  s, y el tren viaja con una rapidez de 100.000 km/s (un tercio de la de la luz) calculando  $\Delta t$  por medio de la última expresión encontramos que  $\Delta t = 1,06$  s. En otras palabras para O los procesos que ocurren en el tren demoran un 6 % más en producirse y por lo tanto cabe decir que arriba del tren el "tiempo se dilata". En este ejemplo se observa que, a pesar que el tren viaja muy rápido, unas 10.000 veces la velocidad más rápida alcanzada por el hombre en viajes espaciales (unos 11 km/s), el efecto relativista es bastante pequeño. Si por otro lado imaginarnos al tren viajando con una velocidad mayor que la de la luz, la cantidad subradical se hace negativa y por lo tanto el tiempo se convierte en una cantidad compleja: se obtienen tiempos que contienen  $i = \sqrt{-1}$ , que no tienen significado en el mundo físico.

Este aspecto es un indicio de la imposibilidad de superar la velocidad de la luz que establece la teoría de la relatividad. Es instructivo que las y los estudiantes construyan un gráfico como el de la figura 4.9 y lo analicen desde el punto de vista de los aspectos antes señalados.



Por último es importante esclarecer dos cosas: 1) la dilatación del tiempo es un efecto recíproco; en otras palabras, para el observador  $O'$  es el observador  $O$ , con estación y todo, el que se aleja de él y por lo tanto es el tiempo de  $O$  el que se dilata; 2) todo lo dicho es para sistemas de referencia inerciales que se mueven uno respecto del otro con velocidad constante. El caso de sistemas de referencia acelerados es cubierto por la *teoría general de la relatividad*, que será tratada más adelante.

- 4) Idean un experimento que permita verificar la dilatación del tiempo que predice la teoría de la relatividad y discuten su efectividad.

**Indicaciones al docente**

Posiblemente los y las alumnas propondrán muchas buenas ideas que permitirían realizar una verificación de este tipo. Analizarlas críticamente con ellos y luego describir de un modo general su primera verificación experimental, a través del decaimiento de los muones.

A través de la asignatura de química el y la estudiante debe conocer la existencia de electrones, protones y neutrones. Comentar que existen muchas otras partículas, la mayoría inestables, es decir, que decaen convirtiéndose en otras partículas a medida que transcurre el tiempo. El tiempo necesario para que la probabilidad de que una partícula haya decaído es de 50 % se denomina vida media. En el caso de los muones cuando son creados en reposo en el laboratorio la vida media es de  $2,2 \times 10^{-6}$  s. Ahora bien, lo interesante es que estas partículas se forman naturalmente también en la alta atmósfera y descienden a una velocidad muy alta, cerca de  $0,99c$ , lo cual permite que, para los observadores en tierra, su tiempo de vida media se dilate a cerca de  $16 \times 10^{-6}$  s. A la gran velocidad con que descienden si el tiempo no se dilatara recorrerían apenas unos 600 m hasta desintegrarse, y por lo tanto sería muy poco probable encontrarlas a nivel del suelo, mientras que si consideramos su tiempo dilatado, recorren cerca de 4.800 m. En el año 1941 B. Rossi y D. Hall realizaron el experimento en el Monte Washington de New Hampshire (USA), midiendo la abundancia de muones en la base y en la cumbre y encontrando perfecta concordancia con las predicciones relativistas. Los muones ( $\mu$ ) fueron descubiertos en 1938 por Carl Anderson en la radiación cósmica. Se obtiene en la desintegración de un meson pi ( $\pi$ ), quien origina también un neutrino muónico ( $\nu_\mu$ ); es decir:  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ .

Con posterioridad al experimento antes descrito se han realizado otros que han mostrado con mayor exactitud concordancia con la teoría de la relatividad. Por ejemplo en 1972 Hafele y Keating dieron evidencia directa de este fenómeno midiendo el retraso de relojes de cesio en un jet, en relación a los localizados en el Observatorio Naval de Estados Unidos. En 1976 en los laboratorios del Consejo Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) en Génova, se realizó un experimento con muones acelerados hasta velocidades de  $0,9994c$ , corroborando una vez más la predicción relativista de la dilatación del tiempo.

- 5) Analizan críticamente la paradoja de los gemelos.

**Indicaciones al docente**

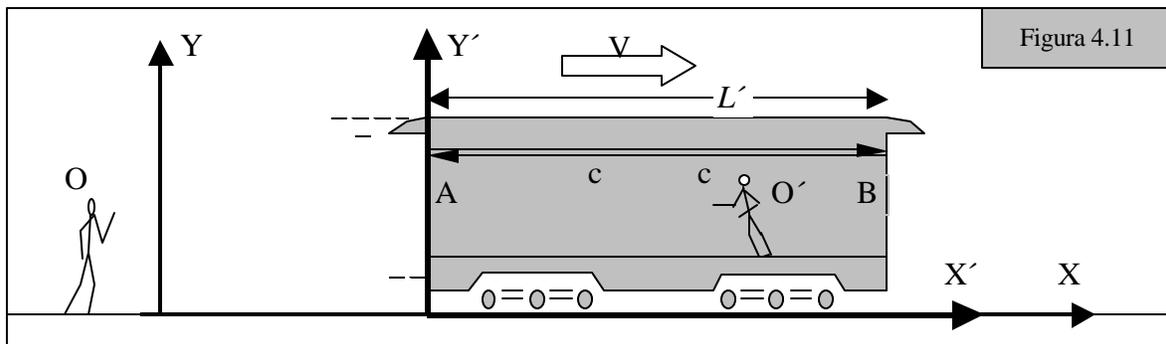
Primero inducir a los y las estudiantes a interpretar en un sentido biológico el resultado del ejemplo 3. Si el tiempo transcurre más lento en el vagón de la figura 4.7, el observador  $O'$  debería envejecer más lentamente que  $O$ . La discusión puede luego apoyarse en una figura como la 4.10 que representa a la Tierra, y una nave espacial que se aleja a gran velocidad. Dos hermanos gemelos acuerdan participar en la experiencia. Mientras uno se queda en la base en tierra firme, el otro se va de viaje, digamos, a la estrella Alfa-centauro, a 4,3 años luz de distancia.



Si el que se va de viaje lo hace a una velocidad  $V = 297.000 \text{ km/s}$  (99 % de la velocidad de la luz) y el viaje ida y vuelta dura para él cerca de 8,7 años, según lo visto en el ejemplo 3 para el hermano que se queda en tierra transcurrirán 62 años aproximadamente, de modo que cuando se vuelvan a encontrar, los gemelos ya no tendrán la misma edad.

Al analizar este tipo de situaciones los estudiantes se desconciertan dado que en un primer análisis los cálculos parecen correctos, a lo que se agrega el que han leído o visto en películas de ciencia ficción que tal cosa es posible. Su desconcierto aumenta cuando se les hace pensar que el viajero ha sido el hermano situado en la Tierra. Darse cuenta que la teoría especial de la relatividad no es aplicable a este caso no les resulta fácil. Debe quedarles claro en todo caso que tanto la partida como el regreso de cualquiera de los hermanos, implica un cambio de velocidad: ya sea el acelerar inicial, o el frenar y acelerar luego en sentido contrario, situaciones en que la teoría especial de la relatividad nada puede decir.

- 6) A partir de la situación que se ilustra en la figura 4.11 deducen la expresión relativista de la contracción de las distancias.



#### Indicaciones al docente

Esta actividad puede iniciarse con la pregunta: ¿qué longitud tiene el vagón? Según el sentido común hay una sola respuesta, por ejemplo 9 m. Luego conviene hacer un análisis detallado teniendo presente la igualdad de la velocidad de la luz en ambos sistemas. Designar por  $L'$  el largo del vagón para  $O'$ . Imaginar después un rayo de luz que es lanzado del extremo A del vagón hacia B donde hay un espejo que lo refleja al punto A nuevamente. Si  $\Delta t'$  es el tiempo que demora la luz en ir y volver; es decir, en recorrer la distancia  $2L'$ , tenemos que  $\Delta t' = \frac{2L'}{c}$ .

Examinar a continuación el mismo fenómeno desde el punto de vista de O. Para éste,  $L$  es el largo del vagón, el rayo de luz en ir de A a B demora  $\frac{L}{c - V}$  y al ir de B a A  $\frac{L}{c + V}$ , por lo tanto el tiempo que para O demora el rayo en ir y volver es  $\Delta t = \frac{L}{c - V} + \frac{L}{c + V} = \frac{2cL}{c^2 - V^2}$ . Considerando por último la expresión para la dilatación

del tiempo  $\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$ , simplificando y ordenando se encuentra que  $L = L' \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$ .

Este importante resultado merece una detenida reflexión que es conveniente provocar en los y las estudiantes. Por ejemplo hacer primero un cálculo numérico como el siguiente: si la longitud del vagón es 10 m para  $O'$  ¿cuánto mide para O fijo al suelo si el tren viaja con una velocidad constante de 100 km/s? Introduciendo estos valores en la fórmula anterior se encuentra que la longitud del vagón resulta ser: 9,428 m. Segundo ¿es el tren el que se reduce para el observador O? Para la teoría de la relatividad no se trata de una contracción sufrida por la materia como consecuencia del movimiento, como H. Lorentz se vio tentado a pensar, sino que se trata de algo mucho más profundo: lo que se contrae es el espacio. Tercero: Hágase ver que también se

trata de un fenómeno recíproco; es decir,  $O'$  ve a  $O$  en la estación alejarse con velocidad  $V$  y lo mide a él con la estación y todo contraído del mismo modo. Cuarto: por último construir el gráfico de  $L$  en función de  $V$  y mostrar que a velocidades corrientes el efecto es insignificante y que sólo cuando  $V$  se aproxima a  $c$  la contracción se hace importante, con lo que nuevamente aparece la prohibición relativista de alcanzar, ni menos sobrepasar, la velocidad de la luz.

- 7) Discuten algún método que permita a un viajero superar la velocidad de la luz.

**Indicaciones al docente**

Es muy posible que el o la joven crea encontrar la solución del problema con una idea como la que se ilustra en la figura 4.12. Sobre un camión que viaja a 250.000 km/s respecto del suelo corre un ciclista a una velocidad de 100.000 km/s en relación al camión, pues el ciclista, según las transformaciones de velocidad de Galileo, llevaría respecto del suelo una rapidez de 350.000 km/s, mayor que la de la luz. Comentar el hecho que en la teoría de la relatividad las velocidades no se suman al estilo de Galileo, de modo que si  $V_1$  es la rapidez del camión respecto del suelo y  $V_2$  la del ciclista respecto del camión, la velocidad del ciclista respecto del suelo no es  $V = V_1 + V_2$ , sino

$$V = \frac{V_1 + V_2}{1 + \frac{V_1 V_2}{c^2}}$$

Destacar que al remplazar la rapidez del camión y la del ciclista del ejemplo se encuentra que  $V = 273.913$  km/s,

menor que la velocidad que predicen las ecuaciones de transformación de Galileo y, lo que es más importante, menor que la velocidad de la luz. Es interesante que los y las alumnas prueben que la expresión relativista para la suma de las velocidades da siempre por resultado  $V < c$  si  $V_1$  y  $V_2$  son también menores que  $c$ . En otras palabras la teoría de la relatividad insiste en ponernos dificultades para movernos libremente a la velocidad que queramos. Los o las estudiantes con mayores habilidades matemáticas podrían encargarse de demostrar la expresión para la suma de velocidades a partir de las fórmulas relativistas para la dilatación del tiempo y la de la contracción del espacio. Es importante hacer notar que si las velocidades son mucho menores que la de la luz, la expresión coincide con la fórmula de suma de velocidades intuitiva, la de Galileo.

Es importante también comentar que todas las relaciones matemáticas que emanan de los postulados relativistas, por extrañas que parezcan a nuestra lógica sustentada en la experiencia diaria, han sido verificadas experimentalmente con un extraordinario grado de exactitud.

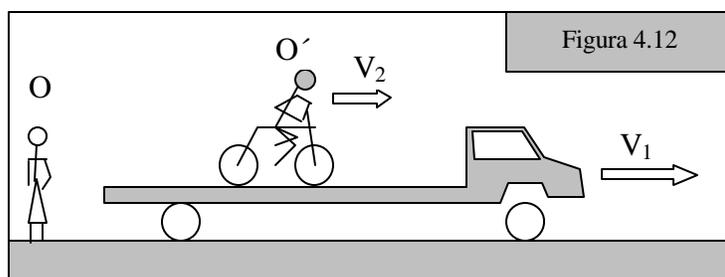


Figura 4.12

- 8) Discuten si la masa de un cuerpo será o no dependiente de la velocidad.

**Indicaciones al docente**

Con seguridad gran parte de los estudiantes apoyará la idea de que la masa de un cuerpo debe ser la misma en todos los sistemas de referencia, pues se la considera una característica intrínseca de cada objeto. Comentar que de los postulados de la teoría de la relatividad especial se desprende que si  $m_0$  es la masa de un cuerpo en el sistema en que está en reposo, para el observador para el cual el cuerpo se mueve con una velocidad constante  $V$  la masa será

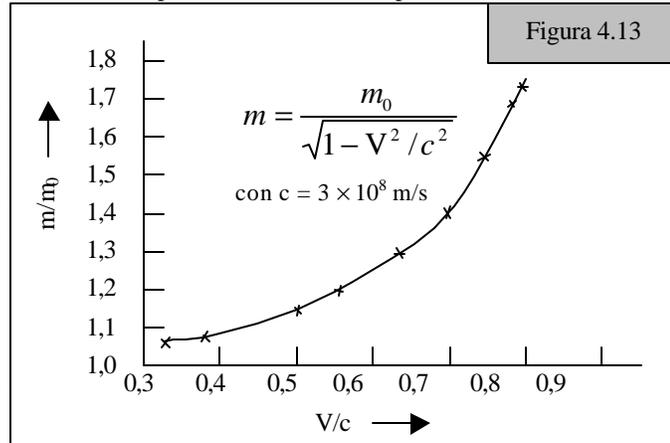
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

muy grande, cercana a  $c$ , y cuando es mayor que  $c$ .

Conviene también realizar algunos cálculos para fijar ideas. Por ejemplo suponer que un electrón, cuya masa en reposo es de  $1,9 \times 10^{-31}$  kg, es acelerado en un acelerador lineal de partí-

culas hasta alcanzar una rapidez  $0,99c$ ; ¿cuál es su masa para los físicos en el laboratorio? El ejemplo puede ser adecuado para describir cómo son y cómo funcionan los aceleradores de partículas, y comentar que en ellos los físicos comprueban a diario las expresiones relativistas.

Mencionar también que en 1909, sólo cuatro años después de publicado el trabajo de Einstein en que se proponía su teoría, Alfred Bucherer (1863 – 1927) obtuvo la primera verificación experimental de la variación de la masa con la velocidad (cruces en la figura 4.13), midiendo con ayuda de un campo eléctrico y magnético la masa y velocidad de electrones emitidos por sustancias radioactivas.



- 9) Discuten la validez de la segunda ley de Newton a la luz de la teoría de la relatividad.

#### Indicaciones al docente

Es suficiente que alumnos y alumnas adviertan que si se es consecuente con los postulados de la relatividad la expresión  $F = ma$  no puede ser válida en la física relativista. Una de las maneras de hacerlo ver es que una fuerza pequeña que actúe constantemente sobre un cuerpo en la misma dirección de su movimiento, aumentará indefinidamente su velocidad sin ningún tipo de limitación. Puede señalarse que la expresión relativista de la fuerza es muy complicada para ser considerada en un curso de este nivel.

Puede mencionarse sin embargo que la expresión relativista del momentum es

$$p = \frac{mV}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \text{ y hacer ver su coincidencia con la fórmula clásica cuando } V \rightarrow 0.$$

### (c) *Relación entre masa y energía*

#### Detalle de contenidos

- **Energía cinética relativista**  
Expresión relativista para la energía cinética. Comparación con la expresión no relativista. Gráfico de energía en función de la velocidad.
- **La ecuación  $E = mc^2$**   
Significado físico e impacto cultural.
- **El efecto Compton**  
Reacciones entre partículas elementales. El fotón de luz y su naturaleza corpuscular.

#### Actividades genéricas y ejemplos a elegir

##### Actividad

Analizan y discuten la expresión de la energía cinética en la teoría de la relatividad y la relación entre masa y energía de un cuerpo.

##### Ejemplos

- 1) κ Proponen posibles expresiones para la energía cinética de un objeto en movimiento sugeridas por los resultados ya discutidos, de la teoría de la relatividad. Analizan la expresión que resulta de la correcta elaboración de la teoría.

##### Indicaciones al docente

Conviene recordar que en la física de Newton la energía cinética de un cuerpo de masa  $m$  que viaja con velocidad  $V$  es  $E_C = \frac{1}{2} mV^2$ . Una posible extensión sería reemplazar la constante

$m$  por  $m(V)$ . Explicar que si se hace el cálculo de la energía que se le entrega a un objeto que se acelera hasta la velocidad  $V$ , la respuesta teniendo presente la variación de la masa es

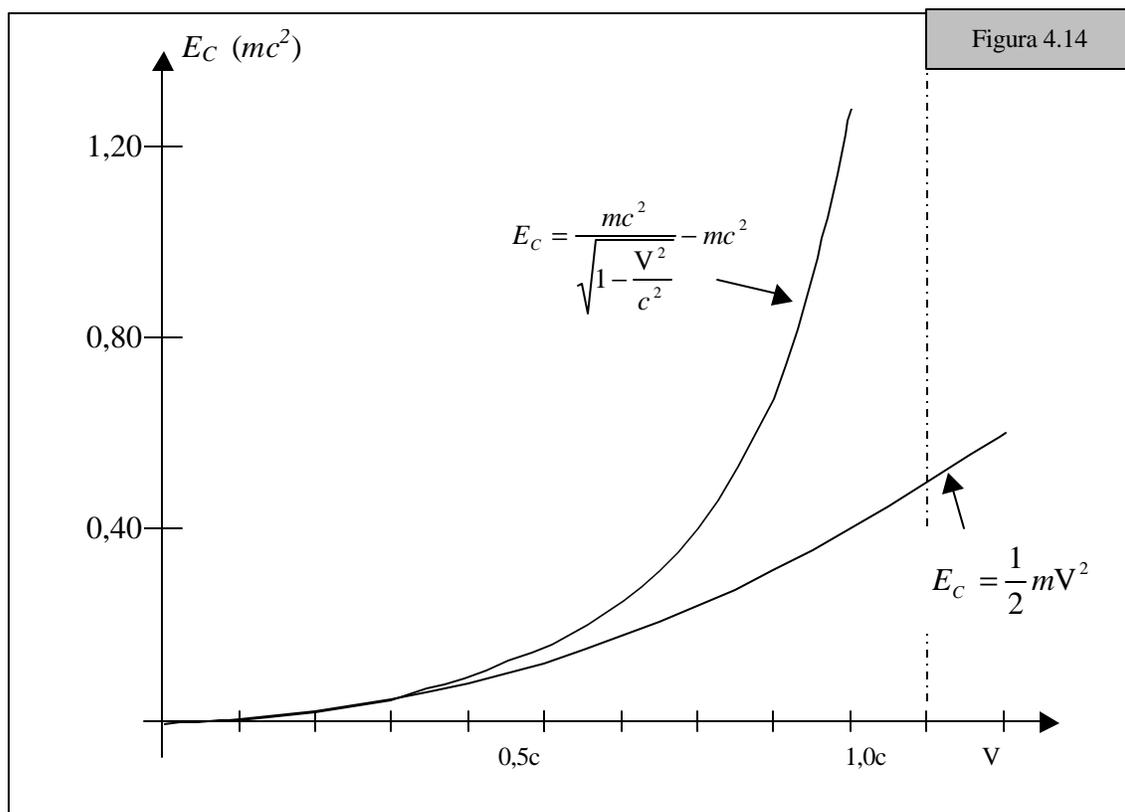
$$E_C = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} - mc^2.$$

Como esta expresión y la fórmula clásica son aparentemente tan distintas, y los conocimientos matemáticos de las y los estudiantes posiblemente no les permitan utilizar expansiones en serie y hacer así una comparación analítica entre ellas, es recomendable que realicen en una misma gráfica las dos curvas. El resultado será como el que ilustra la figura 4.14, donde se ve claramente la coincidencia entre las energías cuando la velocidad  $V$  es pequeña comparada con  $c$ .

Es importante destacar también que por mucho que se incremente la energía, la velocidad no sobrepasa la de la luz. Si el gráfico se extendiera para mayores energías se apreciaría que la curva relativista se aproxima asintóticamente a la vertical  $V = c$ , sin llegar nunca a tocarla. Antes de Einstein se pensaba que al aumentar la energía cinética de una partícula se podría incrementar sin límites su velocidad, pero ahora sabemos que la naturaleza nos impone un límite.

Comentar que la expresión para  $E_C$  revela que la parte que depende de la velocidad se le sustrae una constante,  $mc^2$ , que se interpreta como una energía propia de la masa  $m$ , que no depende del estado de movimiento. Esta es la magnitud importante en las reacciones nucleares como las que producen el calor y la luz del Sol, en la obtención de energía nuclear, en la radioactividad, etc.

Es importante insistir que estos hechos se comprueban experimentalmente a diario en los aceleradores de partículas, en los cuales es posible acelerar protones y electrones hasta velocidades muy próximas a  $c$ .



- 2)  $\kappa$  Calculan la energía contenida en un cuaderno o en ellos mismos debido a su masa, empleando la expresión de Einstein  $E = mc^2$ . La comparan con energías de procesos cotidianos como recoger un lápiz del suelo y estiman la utilidad que podría tener si se la pudiera utilizar.

#### Indicaciones al docente

Como complemento a la actividad anterior se recomienda presentar la fórmula  $E = mc^2$ , verdadero símbolo de la teoría de la relatividad, como otra de las consecuencias de los postulados de la relatividad. Insistir que Einstein la encontró al calcular la energía de un cuerpo de masa  $m$ , siguiendo sus postulados, y se aplica aún cuando el cuerpo esté en reposo y lejos de cualquier otro cuerpo, es decir, sin energía cinética ni potencial. Decir que para referirse a ella se habla de energía de masa.

Para el desarrollo de la actividad conviene destacar los siguientes aspectos:

- 1) se trata de una tremenda cantidad de energía. El análisis de algún ejemplo numérico como el siguiente es indispensable. Un cuaderno escolar posee una masa del orden de 0,4 kg. Por lo tanto su energía de masa es  $E = 0,4 \text{ kg} \cdot (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 3,6 \times 10^{16} \text{ joule}$ . Para que los estudiantes tengan una noción de lo que significa esta energía podemos pedirles que calculen la energía involucrada en levantar un cuaderno del suelo y comparar ambas energías. O se

puede preguntar hasta qué altura podría elevarse un tren de carga con 100 vagones de 300 toneladas cada uno utilizando la energía de masa del cuaderno. La respuesta (aproximadamente 12.000 km) sin duda los sorprenderá. También puede plantearse una pregunta como la siguiente: ¿cuántas ampolletas de 100 watts pueden mantenerse iluminando continuamente durante 100 años con la energía de masa del cuaderno? La respuesta (aproximadamente 114 mil) también sorprende;

- 2) que la existencia de esta tremenda cantidad de energía haya permanecido inadvertida no es extraño debido a que es fruto de la estructura nuclear, la cual se empezó a estudiar recién en el siglo XX;
- 1) que la variación de masa ocurre a nivel del núcleo atómico y en las interacciones entre las partículas elementales. Este descubrimiento permitió la construcción y detonación de la bomba atómica, la bomba de hidrógeno y la construcción y utilización para obtener energía útil, de reactores nucleares (que son como una bomba atómica que explota lentamente y en forma controlada) y explica también cómo funcionan las estrellas. Comentar que antes de la teoría de la relatividad la larga vida y evolución de las estrellas constituía un gran misterio, pues en su centro se está produciendo una significativa transformación de masa en calor y radiación.

Este es un buen momento para hacer reflexionar a los y las jóvenes acerca del hecho que el conocimiento entrega poder, el que se puede usar para bien de la humanidad, o para fines destructivos. Destacar los usos pacíficos de la energía nuclear (obtención de energía, medicina) y mencionar el impacto político de los arsenales bélicos nucleares durante la segunda mitad del siglo XX.

Conviene hacer ver a los estudiantes que la energía nuclear puede usarse en beneficio de las personas. Por ejemplo, puede proporcionar energía eléctrica, la cual para países que no tiene hidrocarburos o con pocas fuentes hidrográficas puede significar la solución del problema energético.

Destacar que los elementos radioactivos que se producen en los reactores nucleares son de gran utilidad en el diagnóstico y terapia de muchas enfermedades graves, con muy buenos resultados.

- 
- 3) Diseñan, aplican y analizan una entrevista o encuesta a personas del entorno, consultando su opinión acerca de los usos pacíficos (medicina, generación de energía), los usos bélicos (la bomba atómica, su rol en la segunda guerra mundial y en la política del período posterior), la contaminación que produce su uso, etc.

**Indicaciones al docente**

Aún cuando el propósito de una actividad como ésta es otro que la realización y aplicación de encuestas, es conveniente preocuparse que las preguntas, así como la actitud de los encuestadores, sean imparciales. Lo importante aquí es que alumnos y alumnas se vean expuestos a un análisis valórico objetivo de la situación.

- 
- 4) Realizan una investigación bibliográfica acerca de los usos pacíficos de la energía nuclear.

**Indicaciones al docente**

Es interesante que al menos uno de los trabajos que resulten de esta actividad sea expuesto al curso, y comentado entre todos.

- 
- 5) A partir de un análisis del efecto Compton discuten el comportamiento corpuscular de la luz.

**Indicaciones al docente**

Puede ser adecuado iniciar esta actividad recordando la historia de las teorías acerca de la naturaleza de la luz. Mencionar por ejemplo que para Isaac Newton la luz estaba compuesta de partículas, que algunos experimentos y mediciones sugirieron que tendría naturaleza ondulatoria (Huygens, Thomas Young, etc.), y que con J. C. Maxwell (1831 – 1879) y H. Hertz esta visión

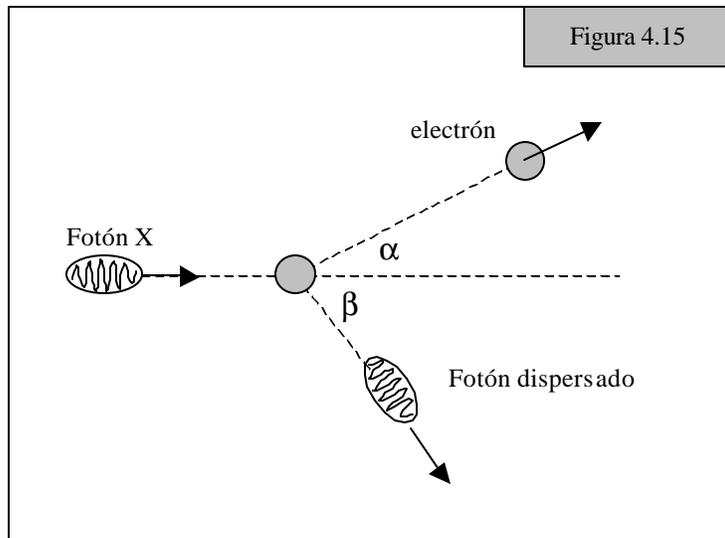
se convierte en un hecho establecido. Hacer ver que hasta comienzos del siglo veinte onda y corpúsculo eran conceptos excluyentes. La luz era una cosa o la otra.

A continuación es conveniente relatar que en el mismo año que Einstein nos lega su teoría especial de la relatividad (1905) y en la misma revista (Anales de Física), publica otro trabajo que lo terminará haciendo merecedor del premio Nobel en 1921. Se trata del efecto fotoeléctrico, según el cual la luz es capaz de sacar electrones de un metal. Con el propósito de explicar el que la energía de los electrones depende de la frecuencia de la luz con que se lo ilumine y no de su intensidad, Einstein propone entender la luz como una partícula a la cual posteriormente se

llamará fotón, y que posee la energía  $E = hf$  y la cantidad de movimiento  $p = \frac{hf}{c}$ . Indicar

que  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J-s es la constante de acción de Planck y  $f$  la frecuencia de la radiación.

Señalar que Arthur Holly Compton (USA, 1892 – 1962) quien en 1923 confirmó experimentalmente por medio de rayos X estas revolucionarias ideas. En el proceso descrito en la figura 4.15 se conserva la energía y el momentum lineal asociado a las partículas, considerado desde el punto de vista vectorial.



Es importante agregar que estas ideas de Einstein contribuyeron a crear, junto a la teoría de la relatividad, el otro pilar que hoy nos permite comprender el Mundo. Esta es la Física cuántica, según la cual la luz tiene intrínsecamente la doble naturaleza onda – corpúsculo y el futuro sólo se puede predecir en forma probabilística. Con el fin de motivar a los estudiantes conviene señalar que en la Formación Diferenciada de cuarto medio se tratará esta interesante rama de la física.

Como dato curioso puede mencionarse el que, aún cuando el propio Einstein generó ideas que se convertirían en las bases de la física cuántica, nunca creyó en que se trataba de una teoría definitiva. Con la célebre frase “Dios no juega a los dados” Einstein expresa su opinión contraria al componente probabilístico de la teoría que nacía.

## *(d) La antimateria en el Universo*

### Detalle de contenidos

- **Las partículas elementales**

Los electrones, protones, neutrones, neutrinos, etc. y sus principales características. Breve reseña histórica del descubrimiento y detección del electrón, del neutrino, el top quarks, u otra partícula relevante.

- **Las antipartículas**

Postulado de la existencia a partir de la relatividad especial. Su descubrimiento y características principales. Aniquilación con las correspondientes partículas.

### Actividades genéricas y ejemplos a elegir

#### Actividad

Describen a grandes rasgos la historia del descubrimiento de las partículas elementales al igual que sus principales características y el modo en que configuran la materia.

#### Ejemplos

1)  $\kappa$  Analizan un listado con los nombres, símbolos, y principales propiedades de las partículas que se conocen. Describen las formas en que se detectan y el modo en que integran la materia que nos rodea.

##### **Indicaciones al docente**

En muchos textos de física figuran datos como los que se registran en el cuadro siguiente, que es el que interesa que los y las alumnas consideren.

En el análisis que se realice conviene mencionar aspectos como los siguientes:

- 1) el que la palabra de origen griego “átomo” significa indivisible Sin embargo lo que hoy llamamos átomo está formado por otras partículas más pequeñas: electrones, protones y neutrones. Mencionar que el estado natural de los átomos es eléctricamente neutro, por lo que posee tantos electrones como protones, pudiendo tener un número variable de neutrones (isótopos). Cuando un átomo pierde un electrón, se transforma en un ión de carga positiva;
- 2) mencionar que la primera partícula elemental descubierta fue el electrón en 1897, relatando las instancias y el aparataje empleado. Dar similares antecedentes acerca del neutrino, partícula elemental que puede fascinar a los estudiantes. Destacar que su existencia fue predicha por Wolfgang Pauli (1900 – 1958) en 1930, y recién confirmada experimentalmente en 1956. Mencionar también la importancia de la radioactividad, la radiación cósmica y más recientemente los cada vez más poderosos aceleradores de partículas en los cuales es posible observar colisiones muy violentas en condiciones controladas;
- 3) en los inicios de la física de partículas la radiación cósmica fue la principal fuente de partículas con altas energías. Los y las alumnas se sorprenderán de saber que constantemente se encuentran sometidos al bombardeo de partículas de muy alta energía. Concretamente, a nivel del mar, cada una de nuestras manos extendidas de forma horizontal es atravesada por una de estas partículas, en promedio, una vez por segundo. Esta radiación es debida a un fenómeno que fue un enigma durante las primeras décadas del siglo XX y cuyo estudio ha

tenido consecuencias de gran trascendencia. Por un lado, dio lugar al descubrimiento de nuevas partículas provocando un cambio radical en nuestra concepción de la estructura microscópica de la materia. Pero además está aportando una valiosa información acerca de la estructura del Universo. El nombre se lo dio Robert Millikan (1868 – 1953) en 1925, aún cuando su existencia se empezó a registrar alrededor de 1910. La figura 4.16 muestra una típica avalancha de partículas generadas al interactuar esta radiación con la atmósfera.

Mencionar también que cada segundo atraviesa nuestro cuerpo cerca de un millón de neutrinos provenientes del Sol y del cosmos;

- 4) la detección e identificación de estas partículas se ha realizado con diferentes métodos e instrumentos. De valor histórico son el contador Geiger, el contador de destellos o fotomultiplicador, la cámara de niebla y la cámara de burbujas. Estos últimos contienen un gas o líquido donde, al pasar estas partículas, queda un claro rastro que se puede registrar fotográficamente. Como las partículas o tienen carga positiva, negativa o carecen de ella, basta disponer al contador entre los polos de un imán para apreciar desviaciones hacia un lado o el otro de estar electrizadas, o de seguir rectilíneamente de ser neutras. Véase figura 4.17. En el caso de las partículas con carga eléctrica, la magnitud de la desviación que experimentan permite determinar la relación entre su masa y velocidad;
- 5) mencionar el llamado “modelo standard” de la materia, el que incluye como elementos sólo a unas pocas partículas elementales (no compuestas) el electrón, el neutrino, el fotón y los quarks. Existen muchas otras partículas que son compuestas, como el protón y el neutrón, (ambos formados por tres quarks);
- 6) mencionar que el protón y el neutrón están compuestos cada uno por tres quarks (protón: udu, neutrón: dud). Comprobar en base al cuadro siguiente que su carga es 1 y 0 respectivamente.

Categoría	Nombre	Símbolo	Antipartícula	Masa en reposo	Vida media (s)
Fotón	Fotón	$\gamma$	Ella misma	$0 \text{ MeV}/c^2$	Estable
Leptón	Electrón	$e^-$	$e^+$	0.511	Estable
	Neutrino (e)	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0 (?)	Estable
	Muón	$\mu^-$	$\mu^+$	105,7	$2,2 \cdot 10^{-6}$
	Neutrino( $\mu$ )	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0 (?)	Estable
	Tau	$\tau^-$	$\tau^+$	1784	$4 \cdot 10^{-13}$
	Neutrino( $\tau$ )	$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_\tau$	0(?)	Estable

Quarks	Nombre	Símbolo	Antipartícula	Masa	Carga eléctrica <sup>2</sup>	
					partícula	antipartícula
Up	Up	u	$\bar{u}$	310	2/3	- 2/3
	Down	d	$\bar{d}$	310	- 1/3	1/3
Charm	Charm	c	$\bar{c}$	1500	2/3	- 2/3
	Strange	s	$\bar{s}$	505	-1/3	1/3
Top	Top	t	$\bar{t}$	>22.500	2/3	- 2/3
	Bottom	b	$\bar{b}$	5000	-1/3	1/3

2)  $\kappa$  Especulan a qué se podría llamar antimateria y comentan su predicción y algunas de sus características.

#### Indicaciones al docente

<sup>2</sup> Se expresan en unidades de carga del electrón.

Se recomienda iniciar el tema discutiendo la idea que alumnos y alumnas ya tienen acerca de la antimateria. Relatar luego las circunstancias de su predicción por parte de Paul Dirac (1902 – 1984). Destacar que este físico inglés construyó una teoría relativista (cuántica) del electrón, y en ella apareció el antielectrón (hoy llamado positrón) como una solución inesperada de las ecuaciones.

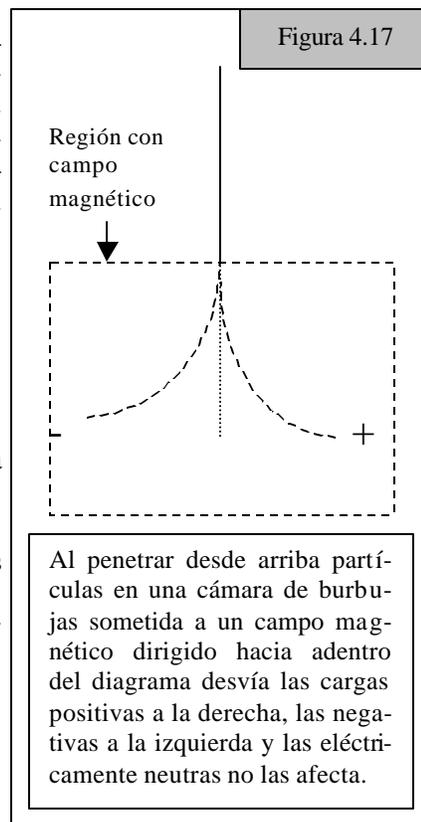
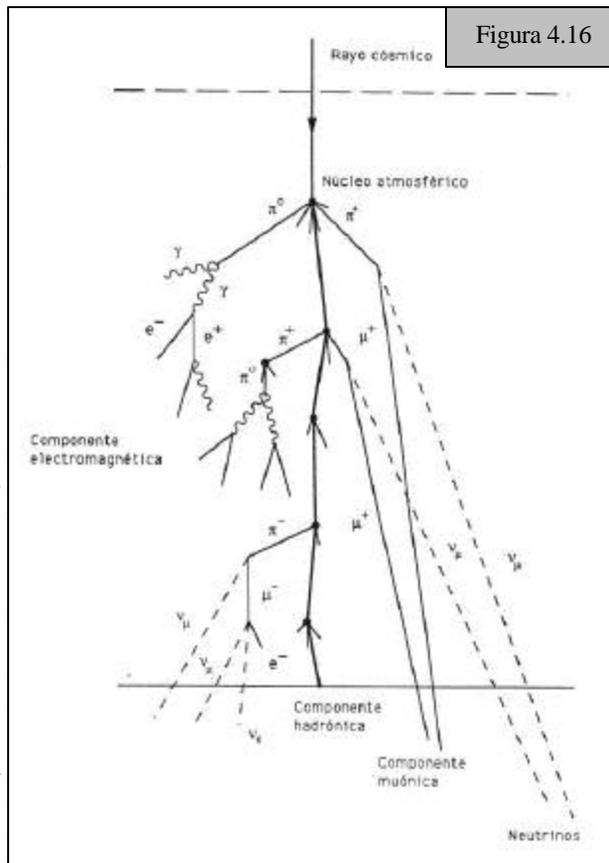
Un argumento de la física clásica que permite visualizar la “aparición de la antimateria” en las ecuaciones es el siguiente. Primero notar que en la mecánica, más fundamental que la velocidad es el momentum, el cual está sujeto a una ley de conservación, como la energía. Teniendo presente esto, buscar entonces una expresión para la fórmula  $E = mc^2$  en que no aparezca la velocidad, sino el momentum. La solución es  $E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$ , como se puede fácilmente demostrar. Para obtener la energía hay entonces que extraer la raíz cuadrada, de donde se obtienen dos soluciones: una negativa y una positiva. En particular, si la partícula no se mueve,  $E = \pm m_0 c^2$ . La con energía de masa positiva es la partícula, y la con energía negativa, su antipartícula. Así como un electrón tiene su antipartícula (el positrón), todas las demás (neutrinos, quarks, etc.) tienen también cada una su antipartícula. Mencionar que en algunos casos, como el fotón, la partícula y su antipartícula son idénticas.

Indicar una fundamental propiedad de la antimateria: cuando se encuentra con su pareja de materia ambas se aniquilan liberándose su energía de masa ( $2m_0 c^2$ ), por ejemplo, en fotones. Destacar que nuestro Universo está hecho de materia, aunque continuamente se está formando antimateria en el choque de la radiación cósmica con la Tierra, en el interior del Sol, en las sustancias radioactivas, etc. lo que pronto se aniquila con algún par. Mencionar que el año 1996 en USA, los físicos lograron construir por un muy breve tiempo átomos de antihidrógeno (figura 4.18).

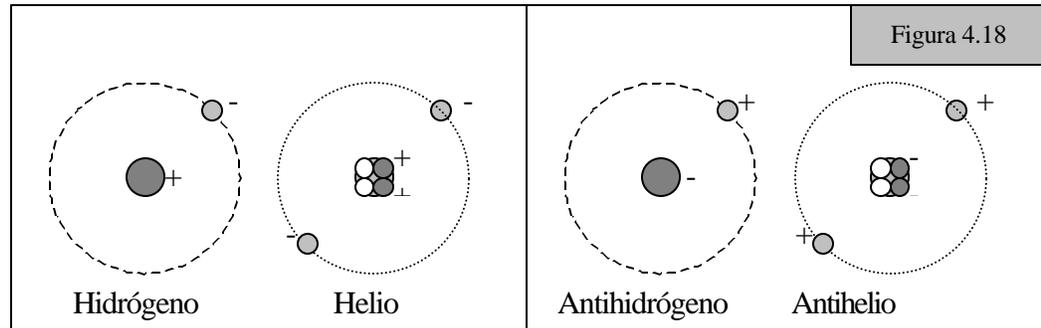
- 3) Especulan sobre la posibilidad de que existan astros en el Universo hechos de antimateria y sobre una posible manera de detectarlos.

#### Indicaciones al docente

Después de las elucubraciones de los y las estudiantes al respecto destacar que, hasta donde sabemos, el Sol, las estrellas, galaxias y otros objetos en el espacio están hechos de materia. Esta asimetría del Universo, el hecho que no haya tanta materia como antimateria,



sorprende aún a los científicos. Gracias a ella existimos en forma de materia y no sólo como un gas de fotones, por ejemplo. Si llegara un antiastronauta a la Tierra sería fatal darle la mano...



## (e) Teoría de la gravitación de Einstein

### Detalle de contenidos

- **Anomalía del movimiento del perihelio del planeta Mercurio**  
Descripción del movimiento de la órbita de Mercurio. Diferencia entre lo que se observó y lo que predice la mecánica de Newton. Explicaciones teóricas.
- **Principio de equivalencia**  
Comparación entre dos sistemas de referencia: Uno acelerado y otro en un campo gravitacional. Enunciado del principio de equivalencia. La curvatura del espacio y la desaparición del concepto de fuerza de gravedad.
- **Verificación experimental de la curvatura del espacio**  
Observación de las estrellas en el eclipse de 1919. Lentes gravitacionales. Agujeros negros. Evolución posible del cosmos.

### Actividades genéricas y ejemplos a elegir

#### Actividad A

Describen a grandes rasgos el problema relativo al movimiento anómalo del planeta Mercurio.

#### Ejemplos

- 1) κ Describen el movimiento anómalo del planeta Mercurio y especulan sobre posibles efectos que lo expliquen.

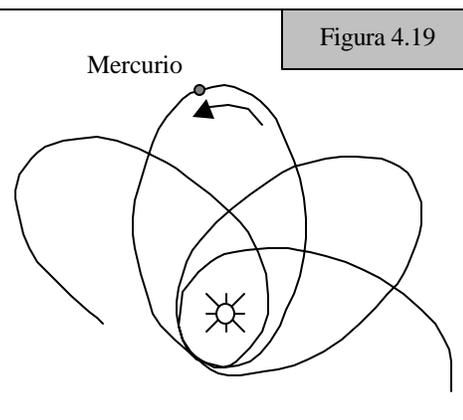
##### Indicaciones al docente

Una figura como la 4.19 puede ser útil para explicar en qué consiste esta anomalía en la órbita del planeta más cercano al Sol que consiste en una muy pequeña diferencia entre el movimiento observado del eje de la órbita del planeta Mercurio, su perihelio, y lo que predicen los cálculos basados en la ley de gravitación universal de Isaac Newton. Luego de una discusión acerca de las posibles causas, mencionar que los intentos por explicar esta diferencia, que sólo es de unos pocos segundos de grado ( $43''$ ) por siglo, habían fracasado durante el siglo XIX:

la existencia de un planeta pequeño más cercano aún al Sol, que fue bautizado como Vulcano y buscado por mucho tiempo, la de un tenue anillo que rodearía al Sol, etc. Hubo que esperar hasta 1916, año en que Einstein con su teoría general de la relatividad logró de explicar esta anomalía.

Representación exagerada del movimiento del planeta Mercurio alrededor del Sol. El eje mayor de su órbita gira en torno del Sol a medida que el planeta se traslada.

Como tarea dar a construir en cartón un modelo que muestre este movimiento.



### Actividad B

Analizan el principio de equivalencia de la relatividad general y sus consecuencias.

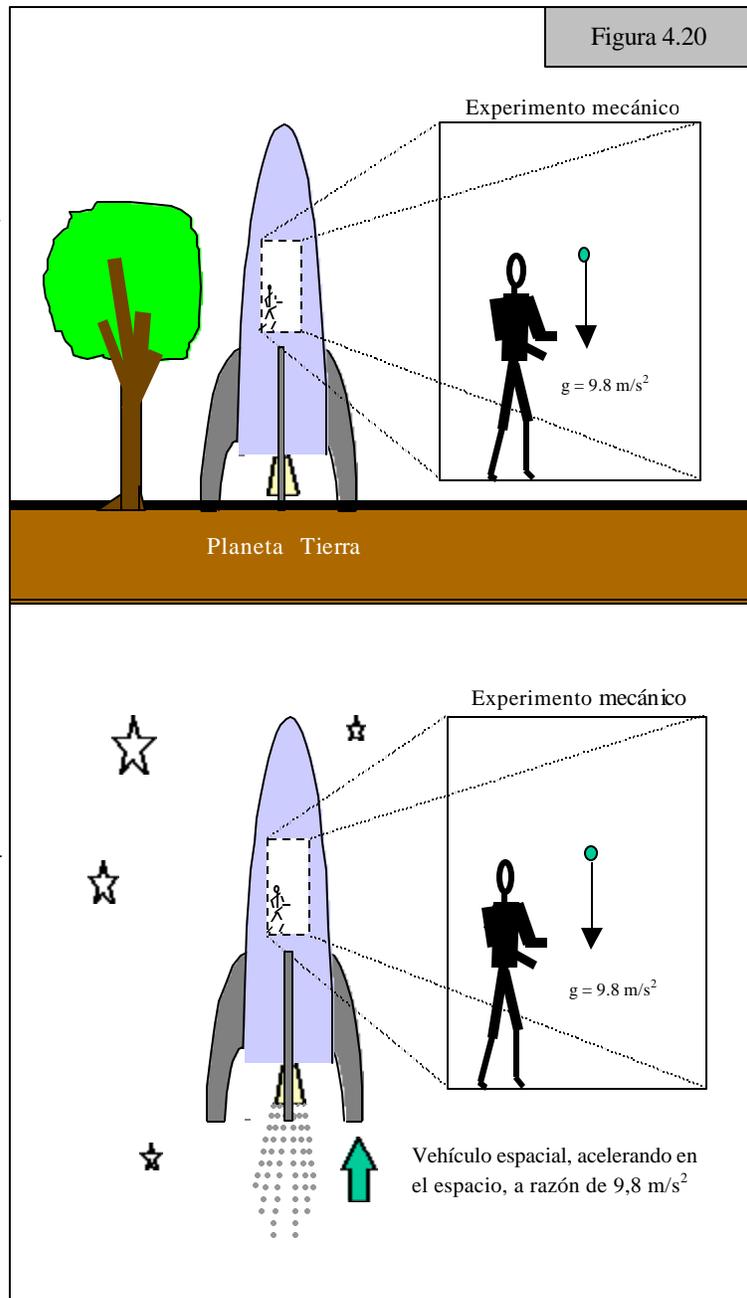
### Ejemplos

- 1) κ Comparan lo que ocurre en un sistema de referencia inmerso en un campo gravitacional con otro que acelera en relación a un sistema de referencia inercial.

#### Indicaciones al docente

Comentar en primer lugar que la masa de un cuerpo aparece tanto como una medida de su inercia en la segunda ley de Newton, como en la magnitud de la fuerza con que se atrae con otro cuerpo en la ley de gravitación universal. Estas masa, la inercial y la gravitatoria, ¿serán iguales? Discutir el punto con los alumnos y luego indicar que para extender su teoría de la relatividad especial al caso de movimiento acelerado Einstein postuló la igualdad de ambas masas (principio de equivalencia). Suponiendo válido este principio, se puede entrar a discutir una situación como la que sugiere la figura 4.20. Si el astronauta se encuentra encerrado en su cabina e imposibilitado de ver hacia fuera y sentir los motores de su propio cohete, no podrá distinguir haciendo experimentos de mecánica al interior de su cabina, en qué situación se encuentra posado en el planeta Tierra o viajando por el espacio con una aceleración de  $9,8 \text{ m/s}^2$  respecto de un SRI.

De la misma manera, si va en caída libre (como el ascensor al que se le cortó el cable que lo soporta), el astronauta no podrá distinguir si cae o está en un SRI donde no actúan fuerzas. Indicar



que Einstein postula que en un tal sistema en caída libre las leyes de la física adquieren la misma forma que en un SRI.

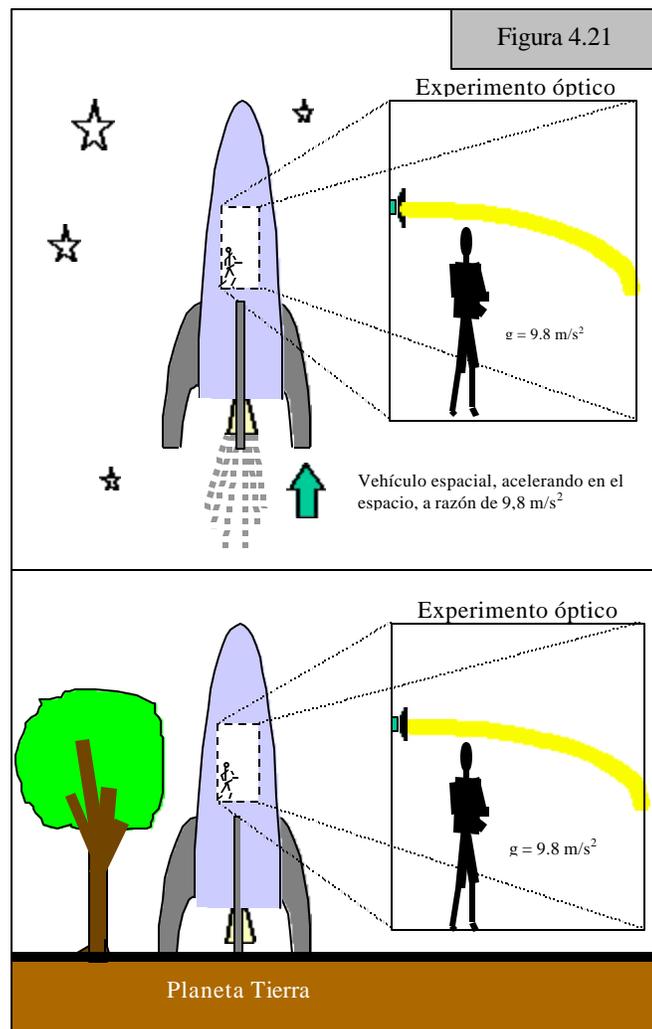
- 2) κ Especulan sobre lo que ocurriría en la misma situación ilustrada en el ejemplo anterior si en vez de realizar experimento de mecánica se estudia lo que ocurre con la propagación de un rayo de luz.

**Indicaciones al docente**

Después de recoger las ideas de los y las estudiantes acerca de si un rayo de luz se propaga en línea recta o no en las cercanías de la Tierra, es conveniente que se vuelva sobre las consecuencias del principio de equivalencia que se ilustró en el ejemplo anterior. Para Einstein el astronauta tampoco podría diferenciar entre una aceleración inercial y una gravitacional realizando experimentos que involucren a un rayo de luz (no mecánico).

Una consecuencia bastante fácil de entender con ayuda de una figura como la 4.21, es la siguiente:

Al lanzar el astronauta horizontalmente un rayo de luz dentro de la cabina cuando el cohete acelera en el espacio respecto de un sistema inercial, verá que sigue una trayectoria curva (una parábola) semejante a la que seguiría un objeto masivo, sólo que menos pronunciada debido a la elevada de la velocidad de la luz. Ahora bien, si el astronauta se encuentra en la cabina de su cohete cuando éste está en reposo en el campo de gravedad de la Tierra, según el principio de equivalencia de Einstein, el astronauta debe observar que el rayo de luz describe la misma trayectoria que en el caso anterior pues no puede distinguir entre ambas situaciones. En otras palabras, el principio de equivalencia, eje central de la teoría general de la relatividad publicada por Einstein en 1916, predice que las masas, por ejemplo la de la Tierra, desvían a los rayos de luz que pasen cerca de ella.



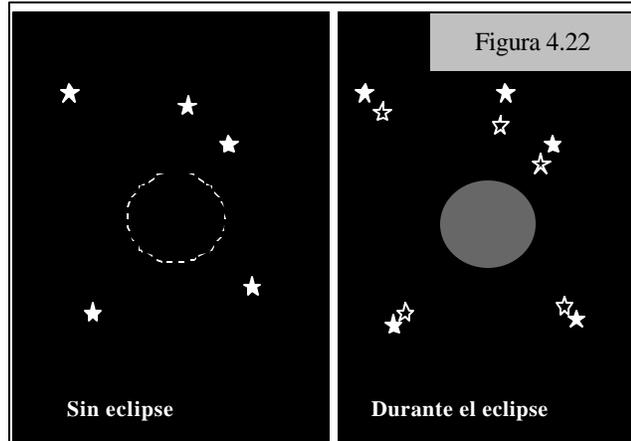
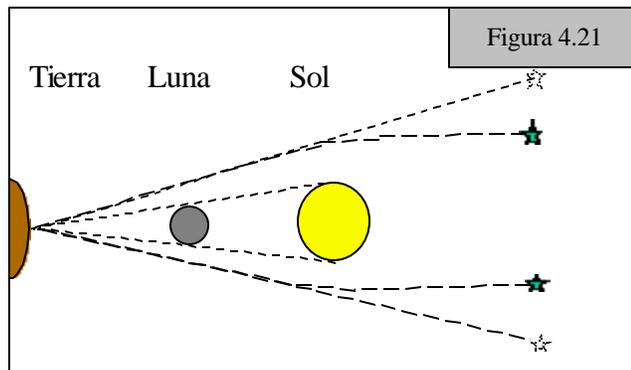
- 3) Formulan hipótesis destinadas a explicar porqué en la vida cotidiana no observamos el efecto relativista según el cual la gravedad desviaría a la luz y proponen experimentos destinados a dirimir sobre la veracidad de esta predicción.

**Indicaciones al docente**

Después del análisis hecho por los y las estudiantes es conveniente que se den orientaciones como las siguientes. El fenómeno no lo observamos debido principalmente a que el campo gravitacional de la Tierra es muy pequeño y las distancias recorridas por la luz muy pequeñas incluso para ser medida por instrumentos de alta precisión. Un simple cálculo lo muestra: en recorrer Chile de alto a bajo (4500 km) un rayo de luz demora  $4.500/300.000 = 0,015$  s, sufriendo en ese lapso una desviación de apenas  $\frac{1}{2} g(0,015)^2 \approx 1$  mm. Hacer ver que en astros mucho más masivos que la Tierra, por ejemplo las estrellas, las galaxias, etc., el efecto sí puede ser medido.

Basado en figuras como las 4.21 y la 4.22 se puede ilustrar la primera verificación de la teoría general de la relatividad. De esta interesante experiencia conviene destacar los siguientes puntos:

- 1) la luz proveniente de una estrella y que pase muy cerca del Sol debiera desviarse según lo muestra la figura 4.21;
- 2) como las estrellas no son visibles de día puede aprovecharse un eclipse de Sol para detectar dicha desviación;
- 3) esta fue la observación que realizó el físico inglés Arthur Eddington (1882 – 1944) en un eclipse total que se produjo poco después de la predicción de Einstein, y que tuvo lugar el 29 de mayo de 1919, en la Isla del Príncipe, Golfo de Guinea. Otro inglés, Andrew Crommelin (1865 – 1939), observa con el mismo propósito el eclipse pero desde la selva del Brasil. Sin aportar una gran exactitud en las mediciones, las fotografías tomadas por ambas expediciones mostraron una concordancia con la predicción relativista lo suficientemente buena como para que se lo considerara una verificación de las sorprendentes ideas de Einstein.



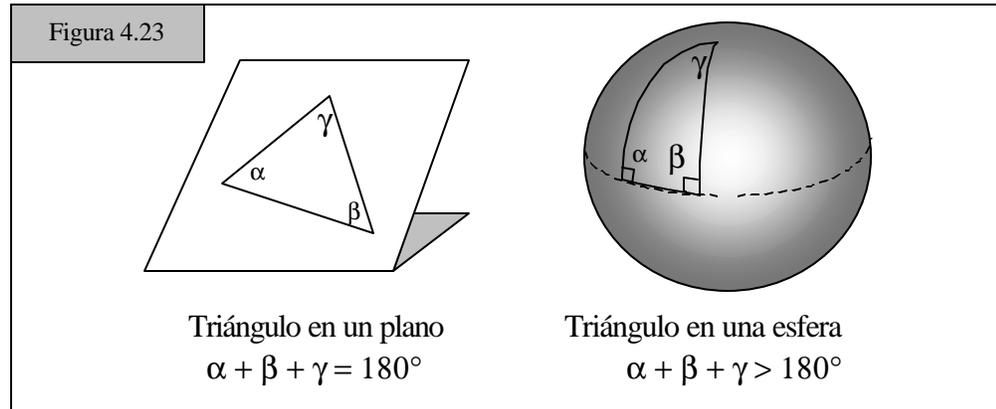
- 4) Posteriores mediciones tanto ópticas como radioeléctricas han mostrado una concordancia notable con la predicción relativista. La observación en 1979 del primer lente gravitacional detectado en el cosmos constituyó otra espectacular comprobación de la teoría general de la relatividad.

- 4) Analizan el concepto de curvatura del espacio y lo simulan por medio de una tela que represente el espacio, pelotas que lo deformen y bolitas que orbitan en él.

#### Indicaciones al docente

Es conveniente iniciar la discusión con una reflexión acerca de la geometría plana, o geometría de Euclides. Discutir la geometría sobre una esfera (geometría curva) y hacer ver, por ejemplo con un triángulo con dos vértices en el ecuador y uno en el polo sur, que la suma de los ángulos interiores es mayor que  $180^\circ$  (ver figura 4.23). Mencionar luego que en la teoría de la relatividad general la presencia de una masa curva el espacio para otra masa en el vecindario y, por ejemplo, los planetas describen elipses y no líneas rectas en las cercanías del Sol. No es entonces necesario hablar de fuerza gravitacional, sino en vez, de curvatura del espacio. En presencia

de materia el espacio ya no es euclideo y la distancia más corta entre dos puntos deja de ser una recta, por ejemplo, para convertirse en un trozo de elipse.

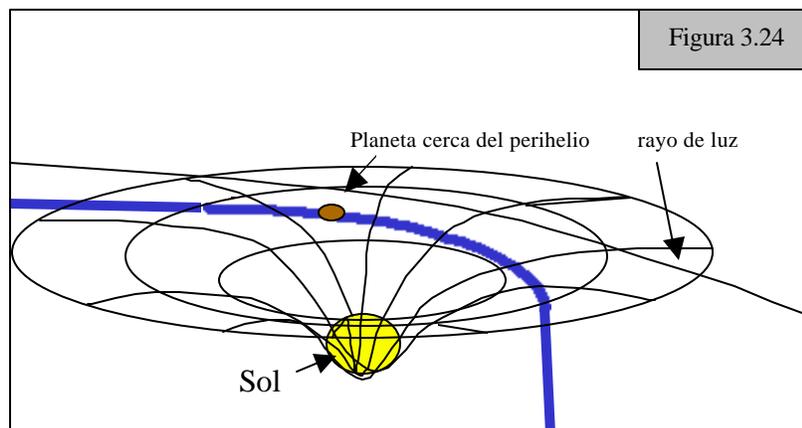


Para la simulación de un espacio curvo se puede usar una sugerencia del propio Einstein. Hacer que un grupo de alumnos estire desde sus bordes una sábana o cortina en cuyo centro se ha colocado una pelota de fútbol u otro objeto pesado que represente al Sol. Los alumnos pueden intentar dejar orbitando bolitas. En el anexo D se proporciona un ejemplo de montaje más permanente para trabajar una actividad como esta en grupos pequeños.

Para un mejor aprovechamiento de esta actividad se recomienda seguir la siguiente línea de análisis:

- 1) el espacio tiempo es un continuo de cuatro dimensiones que se curva en presencia de masas. Como esto escapa a nuestra imaginación utilizamos figurativamente el caso de dos dimensiones para ilustrar el fenómeno de la curvatura del espacio. Así, la tela misma representa el espacio tiempo en que nosotros existimos;
- 2) la figura 3.24 representa figurativamente el espacio curvo en las inmediaciones de una estrella como el Sol, e ilustra el modo en que afecta la trayectoria de un planeta o un rayo de luz;

- 3) si se calcula la órbita del planeta Mercurio en base a la teoría general de la relatividad, los resultados dan cuenta de la pequeña desviación que había sido detectada por los astrónomos;



- 4) gracias a sondas dejadas en la Luna y Marte, mediciones recientes de los movimientos de en estos astros y de la Tierra han permitido obtener verificaciones muy rigurosas de la teoría general de la relatividad;
- 5) destacar por último que la interpretación de la gravedad es en la teoría de Einstein muy distinta a la de Newton. En esta última, por ejemplo, la Tierra se mueve en torno del Sol debido a una fuerza que éste le aplica a distancia. Igualmente una manzana cae debido a una fuerza que le aplica la Tierra. Según la teoría de Einstein en cambio, no hay fuerza, los objetos, planetas, cometas o manzanas, se mueven siguiendo la curvatura del espacio en que se encuentran;