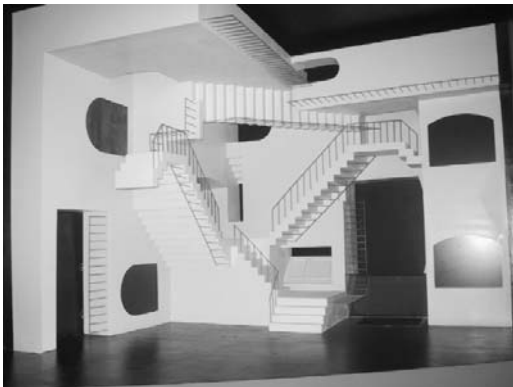


Gedankenexperiment de una exposición

La exposición temporal *Albert & Blas Einstein y Cabrera*, del Museo Elder de la Ciencia y la Tecnología de Las Palmas de Gran Canaria, comienza presentando una maqueta versión 3D de la obra "Relatividad" de M.C. Escher. Las *ventanas* de la obra contienen pantallas que emiten imágenes que representan cómo se ha manipulado la imagen de A. Einstein en los medios, en el cine, en la publicidad, etc.



Maqueta de una versión 3D de la obra "Relatividad" de M.C. Escher

También aparece dentro de la obra un *teatro virtual* donde se hace una presentación de la exposición, tratando de motivar al visitante con el famoso símil de R. Feynman:

Descubrir las leyes físicas es como tratar de aprender las reglas del ajedrez a base de observar partidas

y con frases que parecen hablar de un mundo fantástico, donde ocurren y se preguntan cosas inverosímiles: ¿Te gustaría visitar tu ciudad dentro de 1000 años?

Y es que la exposición pretende conmemorar el 2005: Año Mundial de la Física, conmemorar los 100 años del *annus mirabilis* de Albert Einstein y de paso, el cincuentenario de su muerte. La publicidad institucional del *World Year of Physics 2005* dice:

¡Ayúdanos a que el 2005 sea otro año milagroso!

y pensábamos que sí, que era la oportunidad de divulgar el conocimiento básico de la obra de Einstein, de acercarlo de verdad al gran público, a los jóvenes, a los escolares, no sólo universitarios, sino de secundaria y de bachillerato.

Nos propusimos una exposición que fuera un gran laboratorio donde experimentar (con experimentos reales y experimentos pensados, "Gedankenexperiment de una exposición"), una exposición en la línea habitual en nuestro Museo: interactiva y participativa. No era poco: gran laboratorio, experimentos pensados, interactividad, participación, historias... Ir más allá del icono de que Einstein fue *mal estudiante*, llevaba el pelo poco arreglado y decía que *todo era relativo*.

Jacinto Quevedo
museos.suma@fespm.org

Para presentar y explicar la relatividad especial, verdadero objeto de la efemérides, se buscaron ideas en clave divulgativa y con poquitas matemáticas. Ya G. Gamow en su "Biografía de la física" y sus cuentos de Mr. Tompkins nos allanaba el camino, al igual que el librito de L. Landau; incluso el clásico "Cosmos" de Sagan, sin olvidar las popularizaciones en "Tío Alberto" de R. Stannard, eran referentes importantes. Y nos quedamos con el primero y el último.

¿Se detiene realmente el tiempo para alguien que se mueve a la velocidad de la luz? ¿Qué motivaría a Einstein en Berna para empezar a sospechar del tiempo?

Gamow había sido el maestro de la popularización de la teoría de la relatividad y de la teoría cuántica, ¡vaya personaje!, casi de su boca salieron además, por primera vez, términos como ADN o Big-Bang. Aquí decidimos, con sus cuentos, hacer el mayor esfuerzo: hicimos dos guiones adaptados y produjimos sendas películas en dibujos animados 3D "Velocidad máxima" y "Un universo de juguete". R. Stannard sabía utilizar el lenguaje y los símiles adecuados para motivar y acercar el conocimiento de la relatividad a los jóvenes, su *Uncle Albert* es un clásico. Y además Stannard vino por aquí; en Canarias había expuesto en una conferencia organizada por la Fundación Canaria Orotava de historia de la Ciencia, *el fascinante mundo de Albert Einstein*. Allí motivó a la joven audiencia con las preguntas alocadas: ¿Saben ustedes cómo llegar a ser más viejos que sus padres? ¿Se imaginan que podrían pesar tanto como diez aviones Jumbo sin tener que engordar? ¿Saben cómo escachar a una persona dejándola más plana que un CD, sin que sienta nada en absoluto?...

Aquí la decisión fue crear unos personajes de comics (Albert y Blas) que fueran protagonistas y que contestaran a todas esas preguntas.



Con estos mimbres nos pusimos manos a la obra; quedaban por preparar múltiples módulos interactivos, plataformas audiovisuales y el Laboratorio, al que al final pusimos el nombre de *Experimenta*.

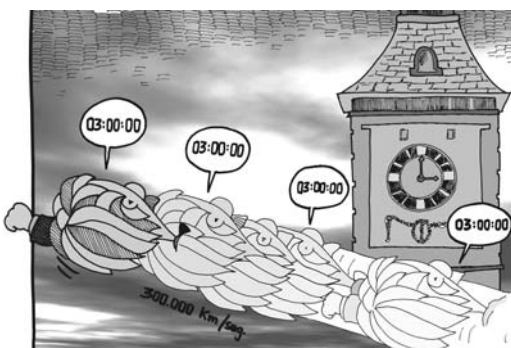


Módulos del Laboratorio Experimenta: cálculo de la velocidad de la luz y experimento de Michelson y Morley

La pregunta de Albert



Cuando Albert Einstein era un adolescente tenía un amigo muy instruido, llamado Max Talmud, que le regaló “El libro popular de la ciencia natural” de Bernstein; en ese libro Albert vio descrita la enorme velocidad de la electricidad a través de los hilos y de la luz a través del espacio. Y se imaginaba a sí mismo (primer *Gedankenexperiment*) a las tres de la tarde, alejándose a la velocidad de la luz del reloj de la torre de su ciudad.



El reloj le parecía parado porque viajaba junto a la luz que reflejaba su esfera mostrando las tres en punto.

¿Se detiene realmente el tiempo para alguien que se mueve a la velocidad de la luz?

Esta pregunta se la planteó Albert Einstein muchas veces, y se decía: *Algo raro sucede a la velocidad de la luz*. Más aún, surgen más y más paradojas cuando uno va muy rápido, cerca de la velocidad de la luz.

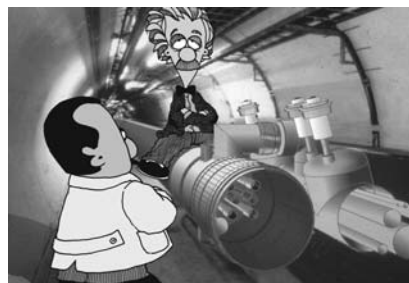
¿Qué motivaría a Einstein en Berna para empezar a sospechar del *tiempo*?



Aventura en el CERN

La Relatividad empieza considerando qué sucede cuando uno va rápido. Y quiero decir muy rápido, a velocidades cercanas a la de la luz: 300.000 kilómetros por segundo.

¿Cómo se puede alcanzar tales velocidades? Pues en una máquina como ésta, situada en las afueras de Ginebra, Suiza, en el Laboratorio Europeo de Física de Altas Energías, conocido como CERN.



Tomemos unas minúsculas partículas subatómicas y pongámoslas en este tubo hueco. Entonces las impulsamos mediante intensos campos eléctricos para acelerarlas.

El tubo parece recto pero no lo es. Mirándolo desde este ángulo vemos que tiene una ligera curvatura. De hecho, es parte de un círculo. El tubo se enrolla alrededor de sí mismo para formar un enorme círculo, de 27 km de circunferencia. La máquina es tan grande que tardaríamos unas cuatro horas en darnos un paseo a lo largo de ella.

Está enterrada bajo el suelo, así que no se puede ver desde la superficie.

Se hace que las partículas giren alrededor del tubo muchas veces alcanzando más y más velocidad. Es algo parecido a un lanzador de martillo olímpico, haciendo girar el martillo alrededor de la cabeza varias veces para aumentar su velocidad antes de lanzarlo.



Lo primero que descubrimos es que hay una velocidad límite. No podemos conseguir que algo vaya más rápido que la velocidad de la luz.

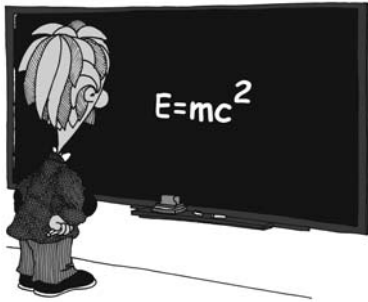
No importa lo fuerte que impulsemos las partículas, ni durante cuánto tiempo mantengamos el impulso; 300.000 km por segundo es el límite.

¿Por qué? Una buena manera de verlo es decir que cuanto más rápido viaja un objeto más pesado se hace.

$$E = mc^2$$

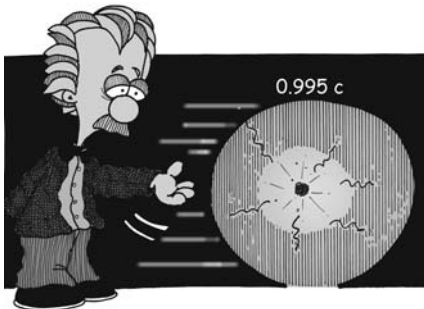
La Teoría de la Relatividad explica cómo la energía pesa, tiene masa. Eso se resume en la ecuación más famosa de Einstein:

$$E = mc^2$$



E es la energía y m es la masa que acompaña a esa energía; c^2 es la velocidad de la luz al cuadrado y se incluye para permitirnos escribir la masa en unidades de energía.

Así que mientras la partícula se va acelerando debe volverse más pesada a causa de la energía extra que ahora posee. No puede captar la energía extra sin que además coja la masa extra que va con la energía.



Y eso a su vez significa que es más difícil conseguir acelerarla todavía más. Es como empezar empujando una carretilla y terminar intentando empujar un camión de diez toneladas.

Cuando se mueven al 90% de la velocidad de la luz las partículas pesan el doble de lo normal. Y cuando se aproximan a la velocidad límite, la masa se convierte en infinita.

Un acelerador lineal de 3 km de longitud acelera minúsculos electrones a velocidades tan cercanas a la de la luz que emergen por el otro extremo con una masa 40.000 veces superior a la que tenían cuando partieron. Si a ustedes los aceleráramos a la misma velocidad que esos electrones acabarían pesando el equivalente a diez aviones Jumbo.

¿Qué creen que le pasa a la masa de esos electrones cuando llegan al reposo de nuevo? Al parar pierden toda la energía que tenían, lo que significa que pierden toda la masa que iba con esa energía. Así que la masa de los electrones vuelve a ser la que era originalmente.

Energía y masa van juntas. Si tienes energía, tienes masa; si tienes masa, tienes energía.

Bomba atómica

Esta moneda de 1€ tiene masa, pero ¿que significa eso?



Significa que tiene energía, incluso aunque no se mueva. Tiene una forma empaquetada de energía.

¿Cuánta energía puedo obtener con este euro? ¡Suficiente para devastar 100 Km a la redonda! Si la energía contenida en él fuese liberada de repente sería equivalente al estallido de una bomba nuclear.

Pero no se preocupen, está empaquetada de forma segura. No podemos disponer de ningún modo de esa energía.

Sin embargo hay ciertas circunstancias especiales donde una pequeña fracción de la energía empaquetada en forma de materia puede ser liberada. Eso ocurre cuando la parte central de un átomo —llamada núcleo— se divide o fusiona con otro núcleo atómico para formar otros tipos de núcleo.

Ésa es la fuente de energía de las bombas nucleares y de las centrales nucleares: energía en forma de materia que se convierte en otras formas de energía, tales como calor, luz y otros tipos de radiación.



Así que eso fue lo primero que descubrió Einstein acerca de lo que ocurre cuando se viaja muy rápido: que no se puede en ningún caso alcanzar la velocidad de un rayo de luz a causa del incremento de masa.

Pero todavía está por llegar una sorpresa aún mayor:

La velocidad afecta al tiempo



El tiempo pasa más lentamente para un astronauta en una nave espacial que se desplaza a gran velocidad que para un controlador de la misión en tierra. El reloj en la pared de la nave espacial va despacio y también el parpadeo de las luces en el panel de control.

Todo lo referente al cuerpo del astronauta va despacio: su frecuencia respiratoria, su pulso cardíaco, incluso el ritmo de su envejecimiento.

¿Es consciente él de esos cambios? No.

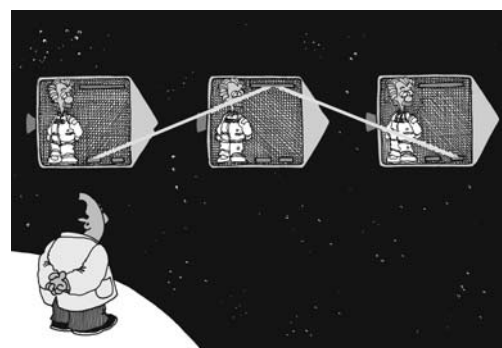
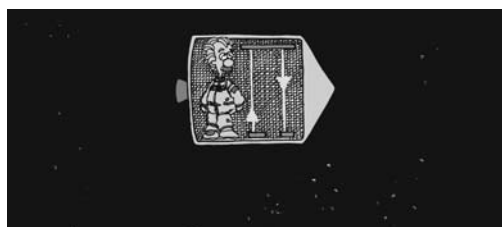
La cuestión es que si todo lo que hay en la nave espacial se ha ralentizado, entonces sus procesos cerebrales se habrán ralentizado también, en la misma proporción, y por lo tanto, también sus pensamientos.

Si miras un reloj lento con un cerebro lento, entonces el reloj parecerá normal.

De hecho, la vida en la nave espacial continuará normalmente en cuanto a lo que concierne al astronauta. Sólo desde el punto de vista del controlador de la misión todo lo que ocurre allá arriba se ha ralentizado.

Dilatación del Tiempo en la Relatividad Especial: una Demostración Simple

Imagina (*Gedankenexperiment*) un cohete moviéndose a una velocidad y alejándose de la Tierra. A bordo del cohete, dos espejos enfrentados de forma que un rayo de luz puede rebotar entre los dos a lo largo de una línea que es perpendicular al movimiento del cohete. Nos lo podemos imaginar como un reloj, donde cada rebote de la luz es un *tic* del reloj.



Definiciones:

c = velocidad de la luz.

v = velocidad del cohete medida en la Tierra.

t_{tierra} = intervalo de tiempo entre clics medidos en la Tierra.
 t_{cohete} = intervalo de tiempo medido a bordo del cohete.

El haz de luz viaja de un espejo al otro a través de una distancia $c \cdot t_{cohete}$ medido a bordo del cohete. Mientras, el cohete se mueve hacia delante la distancia $v \cdot t_{tierra}$ medida en la Tierra. Durante el mismo intervalo, el haz de luz debe por lo tanto moverse una distancia $c \cdot t$ mayor que la vista desde la Tierra.

Recordando, Velocidad (v) = distancia (d) / tiempo (t)

De modo que,

$$d = v \cdot t$$

Pero la velocidad de la luz c es la misma para todos los observadores (lo aprendí en el Laboratorio *Experimenta*). Por lo tanto, t_{cohete} debe ser menor que t_{tierra} . En otras palabras, los intervalos de tiempo correspondientes son más cortos a bordo del cohete que en la Tierra.

Aquí está la solución cuantitativa, usando sólo unas pocas líneas de simple álgebra y el Teorema de Pitágoras para un triángulo rectángulo:

$$(c \cdot t_{cohete})^2 + (v \cdot t_{tierra})^2 = (c \cdot t_{tierra})^2$$

Despejando:

$$(c \cdot t_{cohete})^2 = (c \cdot t_{tierra})^2 - (v \cdot t_{tierra})^2$$

Dividiendo cada término por c^2 :

$$(t_{cohete})^2 = t_{tierra}^2 - (v^2/c^2) t_{tierra}^2 = (1 - v^2/c^2) t_{tierra}^2.$$

Sacando la raíz cuadrada en ambos miembros:

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

El factor de la raíz cuadrada es menor que 1, así que t_{cohete} (cualquier intervalo en el cohete) debe ser menor que t_{tierra} (el correspondiente intervalo en la Tierra).

El efecto es enorme para velocidades que se aproximan a la de la luz. Por ejemplo, si viajamos al 99% de la velocidad de la luz, entonces $1 - (0,99)^2 = 0,02$, la raíz cuadrada de esto es 0,14, así que nuestro t_{cohete} sería solamente un 14% de t_{tierra} . Por tanto, si un viajero del espacio abandonara la Tierra al 99% de la velocidad de la luz, y volviera 100 años más tarde, cronometrándolo desde la Tierra, sería solamente 14 años más viejo según su reloj biológico.



Módulo interactivo: Reloj de luz

De aquí proviene la famosa ...

Paradoja de los gemelos

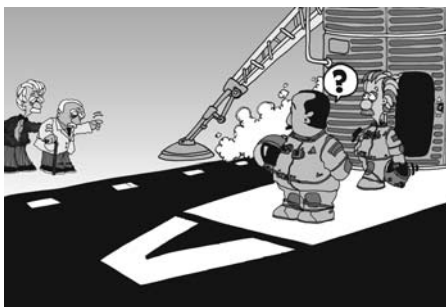
Supongamos, por ejemplo, que ustedes mismos tuvieran una de esas naves espaciales de gran velocidad. Podrían invitar a sus padres y a sus maestros para hacer un viaje de crucero en ella. Los suben a bordo pero ustedes no viajan con ellos. Luego los lanzan a una velocidad cercana a la de la luz.



Mientras tanto ustedes llevan una vida normal. Los años pasan. Ustedes crecen, dejan la escuela, consiguen un trabajo, tienen niños, los niños crecen.

Entonces un día, recuerdan de repente a sus padres y profesores. Ellos todavía están volando alrededor del universo. Ustedes deciden hacerlos regresar.

Ellos salen de la nave no mucho más viejos que cuando se subieron a ella. Mientras tanto ustedes han ido envejeciendo de forma normal. Resulta que ahora ustedes tienen más años que los que ellos tenían cuando inicialmente se subieron a la nave. De modo que ahora son ustedes más viejos que sus padres y profesores.



Según voy de un lado a otro me muevo en relación a ustedes, lo que significa que mi tiempo va más lento que el suyo. Estoy envejeciendo más lentamente, pensando más lentamente, mi reloj está yendo más despacio.

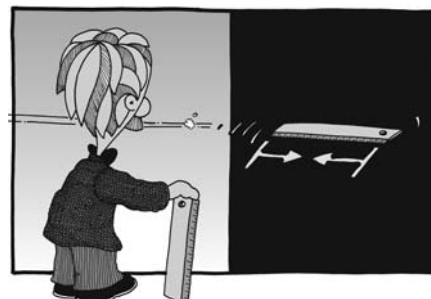
¿Entonces significa eso que ahora que ya no me estoy moviendo necesito ajustar mi reloj para recuperar ese tiempo perdido y de ese modo sintonizarlo con sus relojes?

No, y la razón es que al tipo de velocidad a la que me estaba moviendo el efecto es muy, muy pequeño.

Los astronautas experimentan el efecto de envejecer un poco menos que el resto de nosotros... Como el astronauta ruso Sergei Avdeyev, que estuvo en órbita un total de 748 días durante tres viajes en la estación MIR y es alrededor de un cincuentavo de segundo más joven que si hubiera permanecido en la Tierra todo el tiempo.

Hay una cosa más sobre lo que ocurre a altas velocidades. No sólo afecta al tiempo, también afecta al espacio

Cuanto más rápido va una nave, más pequeña se hace. Cuando va al 90% de la velocidad de la luz la nave se encoge a la mitad de su longitud normal.



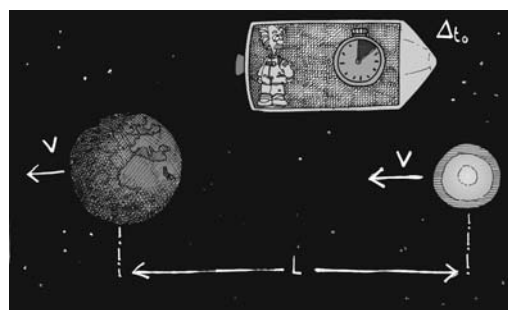
Y no sólo la nave, sino todo en su interior, incluyendo el astronauta (es el espacio mismo el que se contrae). A la velocidad de la que estamos hablando, el astronauta queda reducido a la mitad de su anchura normal.

Él no sentiría nada. Todos los átomos de su cuerpo se han encogido a la mitad de su tamaño normal, así que sólo necesitarán la mitad de la talla normal del cuerpo para encajar cómodamente.

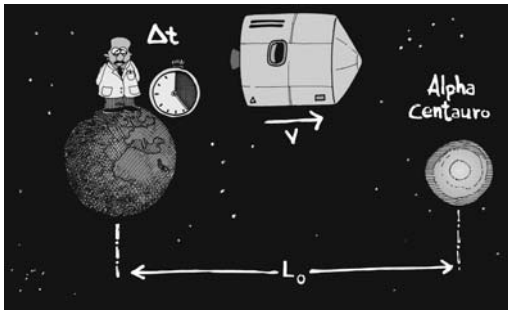
Cuanto más rápido va una nave más pequeña se hace. Cuando va al 90% de la velocidad de la luz la nave se encoge a la mitad de su longitud normal.

Él ni siquiera podrá ver que las cosas se han contraído. Eso es así porque su retina, en la parte trasera del ojo, que contiene la imagen de lo que él está mirando, se ha contraído en la misma proporción. De esa manera, la escena que él está viendo todavía ocupa la misma fracción de la retina que ocuparía normalmente, por lo que al cerebro le parece normal.

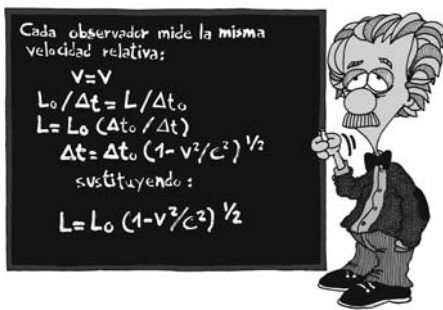
Incrementando la velocidad hasta casi la velocidad de la luz, la nave podría contraerse hasta ser más estrecha que un CD, y el astronauta seguiría dentro sin sentir nada en absoluto.



Un observador en la Tierra mide L_0 (el observador en tierra está en reposo respecto a la línea que va desde la Tierra a la estrella, así que mide la longitud L_0)



El astronauta mide el intervalo Δt_0 (Como el reloj del astronauta está presente tanto al principio como al final del evento —salida de la Tierra y llegada a la estrella— mide un intervalo de tiempo Δt_0)



El tiempo de vida de un Muón



Módulo: Detector de Muones

Los Muones son partículas inestables que se producen cuando la atmósfera absorbe los protones emitidos por el Sol. Cada segundo llega, aproximadamente, un muón por $c \cdot m^2$ a la superficie de la Tierra.

Los muones viajan a poco menos de la velocidad de la luz,

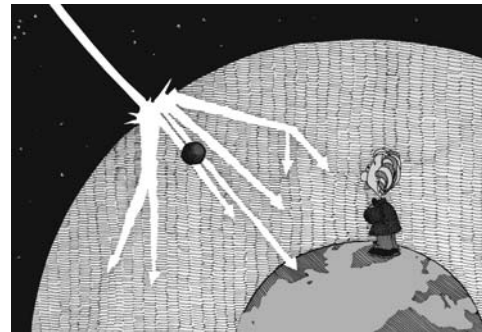
$$v = 0,99 c$$

Los observadores que se encuentren en reposo con respecto a los muones miden que su tiempo de vida medio es de $2,2 \mu s$; este es el intervalo de tiempo transcurrido entre su creación en la alta atmósfera y su desintegración.

$$\begin{aligned} \Delta t_0 &= 2,2 \mu s \\ \Delta t &= \Delta t_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \\ v / c &= 0,99 \\ [1 - (0,99)^2]^{1/2} &= 0,14 \end{aligned}$$

$$\Delta t = \Delta t_0 / 0,14 = 2,2 \mu s / 0,14 = 15,6 \mu s$$

Un observador en tierra mide un tiempo de vida del muón en movimiento de $15,6 \mu s$.



Ambos observadores miden la misma velocidad relativa v .

Para el observador terrestre, el espesor de la atmósfera es de 10.000 m y la vida del muón $5 \cdot 10^{-5}$ s.

Para el observador en movimiento con el muón el espesor de la atmósfera es de 450 m y la vida del muón es de $2 \cdot 10^{-6}$ s.

El evento comienza con el nacimiento de un muón y acaba con su desintegración.

Un observador sobre la Tierra se mueve con respecto al evento, por tanto mide un tiempo dilatado:

$$\Delta t = 5 \cdot 5 \cdot 10^{-5} s$$

El mismo observador mide una distancia más larga L_0 .

Un observador que viaje con el muón mide una distancia más corta :

$$\Delta t_0 = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} s,$$

y la distancia contraída L .

Cuatro dimensiones mejor que tres

Ahora bien, todo esto suena muy confuso: la gente sin poder ponerse de acuerdo sobre los intervalos de tiempo y las distancias. Pero las cosas no son tan malas como parece, no cuando las vemos de la manera en que Einstein las vio.

Echen un vistazo a este bastón.



¿Qué ven desde ahí? Ven un bastón corto, porque ustedes están alineados en la dirección en la que apunta el bastón. Lo ven de modo oblicuo.

Observen esta otra figura. Ahora ven un bastón largo. Eso es porque lo están viendo de costado.



¿Les preocupa a ustedes el hecho de estar unos y otros en desacuerdo sobre la apariencia del bastón? ¿Acaso no están viendo la misma cosa?

Por supuesto que no les preocupa. Se dan cuenta de que lo que pueden ver no es nada más que la proyección bidimensional del bastón en un plano perpendicular a su línea de visión.

Pero el bastón no existe en dos dimensiones, existe en el espacio tridimensional.

Si quieren saber cuál es la verdadera naturaleza del bastón, tienen que tener en cuenta no sólo la longitud proyectada sino además su extensión a lo largo de la línea de visión en la tercera dimensión.

Para unos, el bastón se extiende un buen trecho en la tercera dimensión; mientras que para otros en cambio, tiene muy poca extensión a lo largo de su línea de visión. El resultado es que cuando cada uno de ustedes utiliza sus propias medidas individuales de la longitud proyectada perpendicularmente a su línea de visión con la longitud proyectada a lo largo de su línea de visión, tanto los unos como los otros llegan al mismo valor para la longitud verdadera del bastón en el espacio tridimensional.

Dado que ustedes están de acuerdo en la longitud tridimensional, ya no se preocupan más por las diferentes apariencias del bastón. Las reconocen como lo que son: meras proyecciones de la realidad, contempladas desde diferentes puntos de vista.

La genialidad de Einstein fue encontrar que había una explicación parecida para los diferentes tiempos y distancias que encontramos a altas velocidades.

Propuso que en vez de tener un espacio tridimensional y una dimensión temporal separada, deberían combinarse en un simple espacio-tiempo de cuatro dimensiones.

De esa manera una distancia medida en el espacio de tres dimensiones sería meramente una proyección tridimensional de lo que realmente es tetradimensional.

De manera similar, una medida de tiempo sería meramente una proyección unidimensional de la realidad tetradimensional, a lo largo del eje del tiempo.

Ya no necesitamos preocuparnos más sobre si el astronauta y el controlador de la misión tienen ideas diferentes sobre la distancia entre la parte frontal y la trasera de la nave, o sobre los intervalos de tiempo.

Como la gente que mira el bastón, esos intervalos y distancias diferirán dependiendo del punto de vista de cada uno. En el caso del bastón, eso depende de dónde están sentados en la sala con relación al bastón. En el caso de la nave espacial, depende de cuál es su velocidad relativa.

La cuestión realmente importante es que, cuando insertan sus propias medidas individuales de tiempo y espacio en la fórmula para calcular la longitud en cuatro dimensiones, llegan

al mismo resultado para la longitud o intervalo tetradimensional.



El hecho de que todo el mundo esté siempre de acuerdo en las medidas en cuatro dimensiones es lo que nos hace creer que la realidad es realmente tetradimensional.

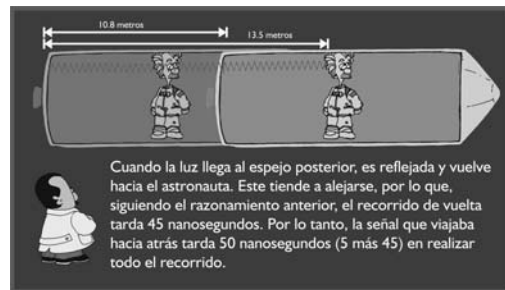
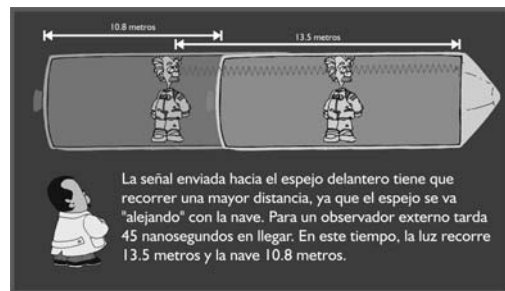
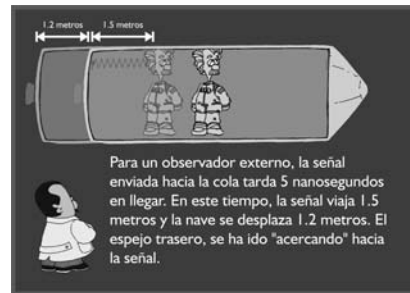
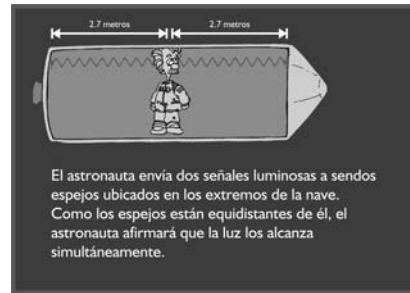
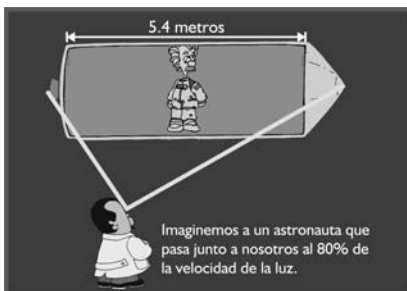
Para calcular distancias de acuerdo con la geometría ordinaria, tenemos una fórmula que involucra tres términos: cada uno muestra la contribución a la distancia total proveniente de cada una de las tres proyecciones espaciales.

Para hacer cálculos en cuatro dimensiones, simplemente tenemos que añadir un cuarto término para representar la contribución de la proyección sobre el eje del tiempo.

Dodecaedro

En la exposición se incluye un expositor en forma de dodecaedro, en las cinco caras laterales superiores se presentan cinco informaciones que tratan de clarificar los diagramas clásicos que se usan en las explicaciones sobre la relatividad especial.

Simultaneidad universal ¡no!

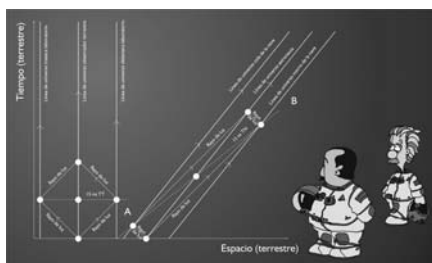


En este *Gedankenexperiment* observamos, pues, que los rayos de luz retornan al astronauta a la vez, exactamente igual que él. Pero él percibe que los rayos alcanzan simultáneamente los espejos anterior y posterior, ya que se halla en el centro de la nave. Nunca coincidiremos en si la llegada de la señal a cada uno de los espejos se produjo simultáneamente o no. La cuestión no radica en quién está equivocado, sino en que cada uno tiene su propio marco de referencia.

El diagrama del abuelo*

* Se refiere a Max Born, premio Nobel de Física y abuelo de la cantante Olivia Newton-John.

Este esquema representa el diagrama espacio-temporal del escenario anterior. La línea de universo del astronauta y las del morro y la cola de su nave son las que aparecen inclinadas. Tomemos una regla, mantengámosla horizontal y hagamos un barrido desde la parte inferior a la superior del diagrama. Las intersecciones de las líneas de universo con la regla representarán el modo en que la escena tiene lugar desde nuestro punto de vista. Observemos cómo el astronauta y su nave se mueven de izquierda a derecha a medida que movemos lentamente la regla hacia arriba. Los rayos de luz que el astronauta envía hacia el morro y la cola de la nave y luego recibe de vuelta son líneas inclinadas 45 grados, puesto que viajan a 0,3 metros por nanosegundo. La llegada del rayo de luz a la cola de la nave (el suceso A) ocurre, para nosotros, antes que la llegada del rayo de luz al morro (suceso B). Pero para el astronauta, que se considera en reposo, ambos sucesos son simultáneos, como indican los pequeños relojes y la línea inclinada de trazos (con la etiqueta 15 ns TN , que lo une).



En la misma figura se muestra un experimento equivalente, realizado por un observador terrestre. La línea de universo de este observador asciende en vertical, ya que permanece inmóvil respecto a nosotros cuando movemos la regla hacia arriba. La línea que une los relojes terrestres, que representa 15 nanosegundos de tiempo terrestre (y etiquetada con 15 ns TT), es horizontal pues se halla en reposo respecto a nosotros.

El espacio-tiempo es como una barra de pan. Si corto el pan horizontalmente, tendré rodajas que representan diferentes

instantes de tiempo terrestre. Dos sucesos serán simultáneos si se hallan en la misma rebanada. Pero un astronauta en movimiento cortará el pan de otra manera, inclinando el cuchillo. Los sucesos que estén en una misma rodaja inclinada serán simultáneos para él. Esto explica también por qué el astronauta y nosotros discrepamos sobre la longitud de la nave. Simplemente estamos cortando la línea de universo tetradimensional de manera diferente.

El “-” marca la diferencia. Universo tretradimensional

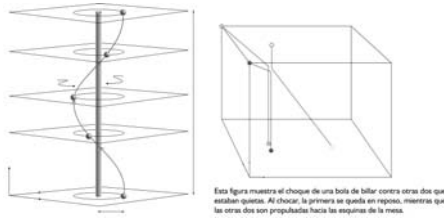
El libro de H.G. Wells “La máquina del tiempo” fue verdaderamente profético por considerar el tiempo como una cuarta dimensión. Einstein utilizaría esta idea en su teoría de la relatividad especial. Para localizar un suceso en el universo hacen falta cuatro coordenadas.



Si deseo invitar a alguien a una fiesta, le debo proporcionar cuatro coordenadas. Por ejemplo, la fiesta será en la Calle Popa, esquina con Pascal, en el piso 5 a las doce menos diez. Las dos primeras coordenadas informan a mi invitado sobre el punto de la superficie terrestre al que debe acudir; la tercera, la altura que debe alcanzar sobre ese punto, y la cuarta, en qué momento llegar. Cuatro coordenadas, cuatro dimensiones.

Podemos visualizar nuestro universo tetradimensional utilizando un modelo de tres dimensiones, dos espaciales y una del tiempo. Imaginemos una película del Sistema Solar que mostrara el movimiento giratorio de la Tierra alrededor del Sol. Si cortamos esa película en fotogramas y los apilamos unos sobre otros, obtendremos una representación adecuada del espacio-tiempo.

Si fuésemos capaces de pensar en cuatro dimensiones, veríamos que la Tierra no es simplemente una esfera; en realidad es una hélice, un gigantesco trozo de espagueti girando en espiral, a lo largo del tiempo, alrededor de la línea de universo del Sol.



Módulo interactivo XYT

Para comparar separaciones en el espacio y separaciones en el tiempo, usaremos unidades en las que la velocidad de la luz es igual a 1 (los años-luz y los años son unidades de esta clase).

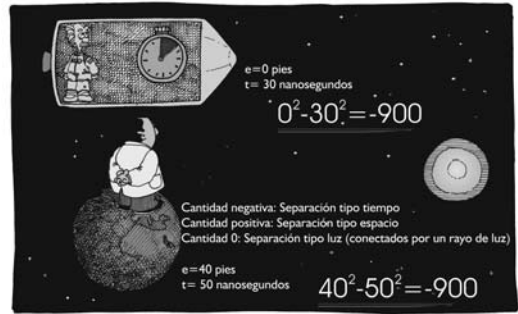
Einstein propuso que en vez de tener un espacio tridimensional y una dimensión temporal separada, deberían combinarse en un simple espacio-tiempo de cuatro dimensiones.

La luz viaja a la velocidad de 1 año-luz por año. Si usamos pies y nanosegundos, la luz recorre un pie en un nanosegundo.

La de la luz es una velocidad *mágica*, una velocidad sobre la que todos pueden ponerse de acuerdo, así que será ideal para comparar las separaciones en el espacio y en el tiempo.

Un viajero espacial y un observador externo nunca se pondrán de acuerdo en las distancias ni en los tiempos, pero sí en los *intervalos*, en la separación de dos sucesos en el tiempo y en el espacio.

$$\text{Intervalo}^2 = \text{distancia}^2 - \text{tiempo}^2$$



El *menos* asociado al tiempo es fundamental, separa futuro y pasado, permite la causalidad en nuestro mundo y dificulta viajar libremente en el tiempo.

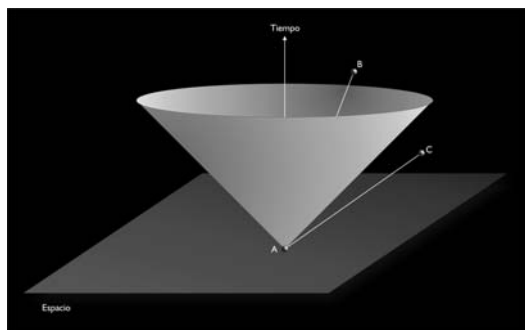
Los relojes y las varas de medir de los dos observadores pueden diferir, con tal de que convengan que la velocidad de la luz vale 1 en sus unidades.

Geometría minkowskiana. Universo tetradimensional

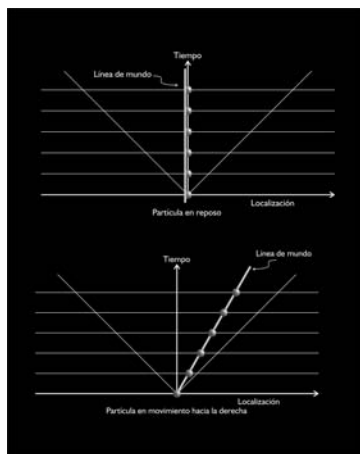
Las ondas luminosas se propagan, como ondas circulares en la superficie del agua, a la velocidad de 1 año-luz por año. Si queremos ver cuál es el aspecto del universo en un momento concreto, bastará con cortar una rebanada horizontal en nuestro diagrama tridimensional y echarle un vistazo. En un instante determinado, las ondas de luz emitidas parecerán un círculo alrededor de nosotros.



Un cono de luz divide los sucesos entre los que están casualmente relacionados y los que no lo están. Si ocurre un suceso en A puede influir en los sucesos que se encuentran dentro de dicho cono de luz, como el suceso B, pero no en los situados fuera del cono de luz, como C, porque la señal no puede viajar de A a C.



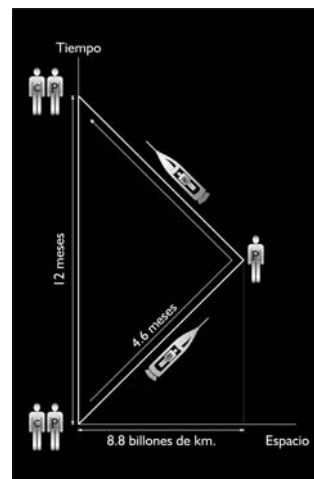
La *línea de universo* de una partícula no es más que el trazado de su posición cuando aumenta el tiempo. En este diagrama aparece la línea de universo de una partícula en reposo. Sigue en la misma ubicación cuando aumenta el tiempo, así que su línea de universo es vertical.



Este diagrama, en cambio, muestra la línea de universo de una partícula moviéndose a una velocidad uniforme hacia la derecha, así que se desplaza hacia ese lado a medida que aumenta el tiempo, así como su línea de universo.

En ambos diagramas, las líneas con 45 grados de inclinación, son líneas de universo de la luz, que pueden viajar a 1 metro en 1 metro de tiempo de viaje de la luz. Nada puede viajar más deprisa que la luz, así que nada tiene una línea de universo que se incline más que ese ángulo.

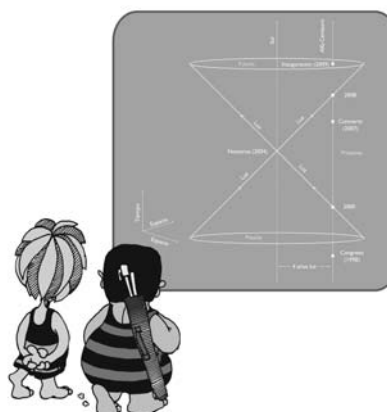
Supongamos que usted tiene un hermano y hoy es su cumpleaños. Como se ven muy poco deciden quedar para el próximo, pero toman caminos distintos para llegar a la cita. Su hermano se queda esperando en casa, por lo que la cita tarda en llegar doce meses. Pero usted, emprende un viaje al 93% de la velocidad de la luz, hacia un planeta que está a 8,8 billones de kilómetros. Cuando usted regresa, sólo han pasado 4,6 meses, usted ha tardado mucho menos en llegar a la cita.



En el espacio-tiempo, con su divertida geometría minkowskiana, tenemos que acostumbrarnos a la idea de que una línea recta corresponde al intervalo más largo entre dos sucesos.

Inauguración en alfa centauro (2009). Universo tetradimensional

Supongamos que nos invitan a una inauguración dentro de cinco años en Alfa Centauro, que se encuentra a cuatro años luz de la Tierra, y que podemos ir en una nave espacial que viaja al 80% de la velocidad de la luz. Todos los observadores estarían de acuerdo en que la fiesta se halla en el *futuro* respecto a nuestra situación, pues podemos hacer planes sobre cómo asistir a ella. La fiesta está separada de nuestro *aquí-y-ahora* una distancia de cuatro años luz en el espacio y cinco años en el tiempo. Por lo tanto, empleando años luz y años como unidades, el cuadrado de la separación en el tiempo sería: $4^2 - 5^2 = 16 - 25 = -9$. La fiesta tiene una separación tipo tiempo desde nuestro *aquí-y-ahora*. Cualquier par de sucesos de esta clase puede ser conectado mediante una nave espacial que viaje entre ellos.



Pero un concierto que se celebre en Alfa Centauro dentro de tres años es un suceso al que no podríamos asistir, puesto que no podemos viajar más rápido que la luz. El concierto tiene una separación tipo espacio desde nuestro *aquí-y-ahora* (se halla en nuestro presente). El cuadrado de su separación en el espacio menos el de su separación en el tiempo es positivo: $42-32=16-9=7$. Un observador que viajara al 75% de la velocidad de la luz rumbo a Alfa Centauro afirmarí­a que nuestro presente en la Tierra y el concierto de Alfa Centauro son sucesos simultáneos. No le sorprendería que no pudiéramos asistir. ¿Cómo íbamos a hacerlo si, según él, los dos cosas ocurren al mismo tiempo?

Consideremos ahora un congreso celebrado en Alfa Centauro hace seis años. El suceso está en nuestro *pasado*. Un astronauta podría haber asistido a dicho congreso y encontrarse tomando un café con nosotros en este momento; podría haber regresado a la Tierra a dos terceras partes de la velocidad de la luz (el congreso y nuestro *aquí-y-ahora* presentan una separación tipo tiempo, por lo que el astronauta puede visitar este *aquí-y-ahora* tras haber participado en él. El congreso se halla, pues, en el *pasado* de donde nos encontramos actualmente). De este modo podemos dividir nuestro universo tetradimensional en tres regiones: el pasado, el presente y el futuro.

La línea de universo de Alfa Centauro atraviesa el cono de luz (en el año 2008, concretamente). Podemos enviar una señal a cualquier suceso que esté situado dentro del cono de luz futuro. La inauguración en Alfa Centauro dentro de 5 años, contados desde 2004 (por lo tanto en el año 2009), está en el interior de dicho cono: el suceso pertenece a nuestro futuro. Es posible participar en aquellos eventos que estén dentro del cono de luz futuro.

El diagrama muestra también el cono de luz pasado, un cono que se contrae hasta llegar a nuestro *aquí-y-ahora*. Los sucesos que se encuentren en el cono de luz pasado son sucesos que podemos ver hoy. El cono de luz pasado cruza la línea de universo de Alfa Centauro hace cuatro años (en nuestro caso, en 2000). Los rayos de luz emitidos por la estrella en esa fecha llegan aquí en 2004. Cuando hoy observamos Alfa Centauro, la vemos tal como era hace cuatro años. Cuanto más lejos miremos, más atrás veremos en el tiempo.

Todos los observadores están de acuerdo sobre qué sucesos pertenecen a cada región (el pasado, presente y futuro del suceso *aquí-y-ahora*) porque todos ellos ven viajar la luz a la misma velocidad y coinciden al decidir a qué lado de cada cono de luz se halla un suceso dado. ■



Cartel de la Película de dibujos animados 3D
Velocidad Máxima

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gamow, G. (1980): *Biografía de la física*, Alianza.
- Gamow, G. (1993): *Mr. Tompkins in Paperback*, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Gamow, G. (1985): "El breviarío del señor Tompkins: En el país de las maravillas". *La Investigación del átomo*, Fondo de Cultura Económica, México.
- <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/fondo2000/vol1/pais-maravillas/html/indice.html>
- J. Richard Gott: *Los Viajes en el tiempo y el universo de Einstein*, Metatemas.
- Landau, L.; Rumer, Y.: *¿Qué es la teoría de la relatividad?* Akal, Madrid.
- Standard R.: "El Fascinante Mundo de Albert Einstein". Conferencia para la Fundación Orotava de Historia de la Ciencia, 2004.
- http://nti.educa.rcanaria.es/fundoro/einstein_escuela/einstein_russell.htm
- Stannard R. (1989): *The Time and Space of Uncle Albert*, Faber and Faber, London.
- Sagan, C.: *Cosmos*, Planeta.
- Exposición EINSTEIN (American Museum of Natural History, New York 2002-03) <http://www.amnh.org/exhibitions/einstein/>
- Año mundial de la física: www.physics2005.org