

Aprovechando el primer centenario de la publicación de su teoría de la relatividad especial (1905) y por ser este año el Año Internacional de la Física, merece la pena dedicar una clase para divulgar la figura de Einstein, sus trabajos y las consecuencias que de ellos se derivan, como que el tiempo no es absoluto, para lo cual, presentamos un ejemplo muy asequible que permite entender por qué un astronauta viajando a una velocidad próxima a la de la luz podría, a su regreso a la tierra, ser más joven que su hijo. Así mismo justificamos como, a las velocidades cotidianas, los resultados de Einstein pueden ignorarse.

Now that is the first centenary of the publication of his relativity theory and at the same time the International Year of Physics, it is worthwhile dedicating a lesson to make Einstein's figure known, his work and the amazing consequences derived from it, such as knowing that time isn't absolute. To make students aware of this, we present here a very accessible example that will allow them to understand why an astronaut travelling at a speed close to that of light, upon returning to the earth, could be younger than his son. We will also justify why at everyday speeds, Einstein's results can be ignored.

Imagina que estás en el andén de una estación y pasa un tren a 40 km/h, y un niño que viaja en el tren tira una pelota a 20 km/h en la dirección del movimiento del tren. Para el niño, que se mueve con el tren, la pelota que ha tirado se mueve a 20 km/h, pero para ti la velocidad con la que ves que se mueve la pelota es la suma de la velocidad del tren y la de la pelota, o sea, 60 km/h.

Esto que ocurre con la pelota no ocurre con la luz; si el niño enciende una linterna en la dirección del movimiento del tren, la luz se moverá para él a 300.000 km/seg. y para ti, que estás en el andén, irá a la misma velocidad.

Esto lo comprobó por primera vez Michelson, en 1881, con un experimento que consistía en medir la velocidad de la luz en dirección del movimiento terrestre y en contra de él, esperando percibir diferencia entre las dos velocidades, pero el resultado era que coincidían en ambas mediciones.

Desde entonces se han realizado medidas muy precisas que demuestran que la velocidad de la luz (300.000 km/seg) no varía sea cual sea el movimiento de la fuente que emita la luz.

En 1905, Einstein observó que este hecho implicaba algunos resultados extraños:

- Los objetos se acortan en la dirección del movimiento (hablamos de velocidades muy grandes), más cuanto

mayor sea la velocidad hasta llegar a una longitud nula en los límites de la velocidad de la luz.

- Sin embargo, la masa (cantidad de materia) aumentaría. De hecho, existen planetas de unos pocos centímetros de diámetro y de masa inmensa.
- La masa es equivalente a una cierta cantidad de energía, y viceversa, según la célebre fórmula:

$$E = m \cdot c^2$$

A partir de esta relación entre masa y energía, se inventó la bomba atómica: de un poco de masa se obtiene una cantidad enorme de energía (la cantidad de masa multiplicada por *la velocidad de la luz al cuadrado*). Nada se crea ni se destruye, solamente se transforma.

- El paso del tiempo de un objeto es cada vez más lento a medida que aumenten las velocidades.

Francisco Merino Ayuso

IES Poeta García Gutiérrez. Chiclana de la Frontera. Cádiz

Ana Merino Teruel

IES Poeta García Gutiérrez. Chiclana de la Frontera. Cádiz

Como ejemplo vamos a justificar este último hecho.

Supongamos que existe un tren extraordinario al que llamaremos *tren de Einstein* que va a una velocidad de 240.000 kilómetros por segundo.

Tendremos que hacer un gran esfuerzo para imaginar el *tren de Einstein*, ya que estamos acostumbrados en nuestra vida diaria a velocidades considerablemente menores a las que éste toma; para hacernos una idea, pensemos que el *tren de Einstein* a 240.000 km/seg. daría 6 vueltas a la tierra siguiendo el ecuador en un solo segundo y un avión comercial a 1.000 km/h., o sea, a 0,28 km/seg. necesitaría 10 días para dar las 6 vueltas o, por ejemplo, la tierra, el cuerpo más veloz con el que tenemos contacto, va a 30 km/seg. en su movimiento de traslación alrededor del sol y tarda 365 días en hacer el recorrido completo; si fuera a 240.000 km/seg., el año duraría sólo 1 hora y 5 minutos.

Supongamos que el *tren de Einstein* tuviese que recorrer los 864.000.000 km. que distan entre sí dos estaciones. El avión tardaría en recorrer esta distancia casi 100 años a 1.000 km/h sin parar, pero el *tren de Einstein* lo hará en una hora:

$$\frac{864.000.000 \text{ km}}{240.000 \text{ km/seg}} = 3.600 \text{ seg} = 60 \text{ min} = 1 \text{ hora}$$

En las dos estaciones hay relojes. En la primera estación un pasajero comprueba su reloj con el de la estación. Al llegar a la siguiente estación verá que su reloj se retrasó veinticuatro minutos.

¿Qué es lo que pasa?

Supongamos que una linterna, que está puesta en el suelo del tren, envía un rayo de luz a un espejo que está colocado en el techo del tren, y éste a su vez lo devuelve al suelo del vagón (figura 1).

Según un pasajero, este rayo recorrerá el siguiente camino:

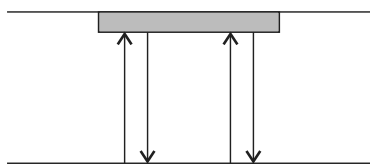


Figura 1

Para alguien que lo viera desde la estación (figura 2), la imagen es completamente diferente, ya que el espejo y la linterna estarían en movimiento con respecto a esta segunda persona.

En el tiempo que tarda el rayo de luz en recorrer el camino hasta el espejo, este último, debido al movimiento del tren, se desplazará. Mientras el rayo de luz retorna, la bombilla se desplazará igualmente.

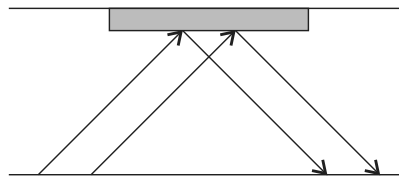


Figura 2

Como vemos, para los observadores del andén la luz recorrió una distancia mayor que para los observadores del tren. Por otra parte, nosotros sabemos a ciencia cierta que la velocidad de la luz es velocidad absoluta, y es igual tanto para aquellos que viajan en el tren como para aquellos que se encuentran en el andén. Este hecho nos obliga a sacar una conclusión:

¡Entre el envío y el regreso del rayo de luz, en el andén transcurrió más tiempo que en el tren!, ya que a la misma velocidad, para el observador del andén el rayo de luz ha recorrido más distancia.

Calculemos el tiempo que transcurre para el pasajero del tren y para el observador del andén.

Supongamos que el observador del andén cuenta que entre el envío y el regreso del rayo de luz transcurrieron 10 segundos.

Durante estos 10 segundos la luz recorrió una distancia de

$$300.000 \text{ km/seg} \times 10 \text{ seg} = 3.000.000 \text{ km}$$

De aquí se deduce que cada uno de los lados *AB* y *BC* del triángulo isósceles *ABC* de la siguiente figura es de 1.500.000 kilómetros (recuerda que estamos en el *tren de Einstein* y que sus medidas son inmensas).

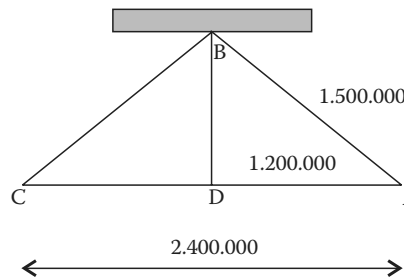


Figura 3

Como el tren va a 240.000 km/seg. en los 10 seg. recorre:

$$240.000 \text{ km/seg} \times 10 \text{ seg} = 2.400.000 \text{ km}$$

Ahora es fácil determinar la altura del vagón, que será la altura BD del triángulo ABC .

En el triángulo rectángulo, aplicando el teorema de Pitágoras, tendremos:

$$AB^2 = AD^2 + BD^2$$

de donde se deduce, despejando BD en función de AB y AD , que la altura del vagón es:

$$BD = \sqrt{AB^2 - AD^2} = \sqrt{1.500.000^2 - 1.200.000^2} = \sqrt{810.000.000.000} = 900.000 \text{ km}$$

La altura es sumamente grande, lo que ya no nos extraña por las dimensiones astronómicas del *tren de Einstein*.

El camino recorrido por el rayo de luz desde el suelo del vagón hasta el techo de éste y en dirección contraria, desde el punto de vista del pasajero, es igual al doble de la altura:

$$2 \times 900.000 \text{ km} = 1.800.000 \text{ km}$$

Para calcular el tiempo que tardaría la luz en hacer ese recorrido dividimos la distancia entre la velocidad de la luz:

$$\frac{1.800.000 \text{ km}}{300.000 \text{ km/seg}} = 6 \text{ seg}$$

Mientras en el andén transcurrieron 10 segundos, en el tren transcurrieron solamente 6 segundos. Es decir, si respecto al reloj de la estación el tren llegó una hora después de haber salido, para el pasajero pasaron:

Andén	Tren
10 seg.	6 seg.
3.600 seg.	x seg.

$$x = \frac{3.600 \text{ seg} \times 6 \text{ seg}}{10 \text{ seg}} = 2160 \text{ seg} = 36 \text{ min}$$

Es decir, según el reloj de la estación el tren hizo el trayecto en una hora y sin embargo para el pasajero sólo han transcurrido 36 minutos.

Sabemos que existen estrellas a una enorme distancia de la tierra; por ejemplo la estrella Arturo se encuentra a 36 años luz, (distancia pequeña si la comparamos, por ejemplo, con el grupo de Nebulosas de la Corona Boreal que se encuentra a la increíble cantidad de 120.000.000 años luz); esto significa que la luz de la estrella Arturo tardaría en llegar a la tierra 36 años a la velocidad de 300.000 km/seg.

Supongamos que volamos a esa estrella en el *cohete de Einstein* a la velocidad de 240.000 km/seg., desde la base de la tierra; desde el momento de la salida del cohete hasta su llegada a la estrella pasarían:

Si a 300.000 km/seg. tarda 36 años, a 240.000 km/seg. tardará:

$$\frac{36 \text{ años} \times 300.000 \text{ km/seg}}{240.000 \text{ km/seg}} = 45 \text{ años}$$

Pero para el astronauta que viaja en el cohete, y que va a la misma velocidad que el viajero del tren, pasarían sólo:

Base	Cohete
10 seg.	6 seg.
45 años	x años

$$x = \frac{45 \text{ años} \times 6 \text{ seg}}{10 \text{ seg}} = 27 \text{ años}$$

Para volver necesitaría otros 27 años mientras que en la tierra habrían transcurrido otros 45. El viaje de ida y vuelta para el astronauta duraría 54 años y en la tierra habrían pasado 90 años. Si el astronauta inició su viaje con 30 años y su hijo tenía 4, a la vuelta el padre tendría 84 años y su hijo 10 años más que él.

Estos fenómenos predichos por Einstein sólo son apreciables a grandes velocidades. Los científicos han expuesto a estas velocidades partículas subatómicas comprobando que se verificaba con gran exactitud la teoría de Einstein.

A una velocidad cualquiera, la relación que existe entre el tiempo medido por un observador sin movimiento y el tiempo medido por otro podemos obtenerla utilizando el mismo triángulo de la figura 3.

Si T es el tiempo que transcurre para el observador sin movimiento, t el tiempo que transcurre para el observador a velocidad v :

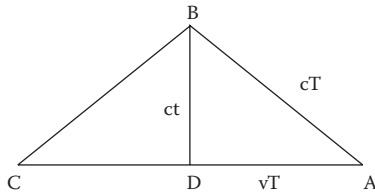


Figura 4

$AB = c \cdot T =$ recorrido de la luz en un tiempo T .
 $AD = v \cdot T =$ recorrido del observador en movimiento en un tiempo T .
 $BD = c \cdot t =$ recorrido de la luz en un tiempo t .

$$AB^2 = AD^2 + BD^2$$

$$(c \cdot T)^2 = (v \cdot T)^2 + (c \cdot t)^2$$

despejamos t en función de T :

$$(c \cdot t)^2 = (c \cdot T)^2 - (v \cdot T)^2$$

$$c^2 \cdot t^2 = c^2 \cdot T^2 - v^2 \cdot T^2 = (c^2 - v^2) \cdot T^2$$

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

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

Si comparamos los tiempos para un observador sin movimiento y, por ejemplo, el tiempo que transcurriría en el avión hipersónico más rápido del mundo, X-43A de la NASA, que alcanza casi los 12.000 km/hora, o sea, 3,33 km/seg.:

$$t = T \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{3,33}{300.000}\right)^2}$$

(invito a hacer los cálculos), vemos que los tiempos prácticamente son coincidentes.

A las velocidades a las que estamos familiarizados también se cumple la teoría de Einstein pero las diferencias son inapreciables; como nadie ha viajado a grandes velocidades nos resultan extraños los resultados de Einstein, aunque éstos son los que realmente rigen el universo. ■

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUBERT J. M. (1981): *Filosofía de la naturaleza*, Herder, Barcelona.
 CATALÁ DE ALEMANY (1966): *Física General*, Guerri, Valencia.
 DE JUANA SARDÓN J. M. (2000): *Física General*, Alhambra Universidad, Madrid.
 EINSTEIN A. (1994): *Sobre la teoría de la relatividad*, Alianza, Madrid.

GARCÍA MORENTE M. (1984): *Sobre la teoría de la relatividad*, Encuentro, Madrid.
 LANDAU L., RUMER Y. (1970): *Qué es la teoría de la relatividad*, Ricardo Aguilera, Madrid.
www.librys.com/einstein2005/
www.fi-b.unam.mx/safir/sn/num01/num015.htm