

# RELATIVIDAD ESPECIAL EXPLICADA DE FORMA SENCILLA

Alejandro Vaz 4ºC E.S.O.



## Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>Nota del autor.....</b>	<b>3</b>
<b>Historia de la relatividad especial.....</b>	<b>3</b>
<b>Postulados de la relatividad especial.....</b>	<b>5</b>
<b>Consecuencias de la teoría.....</b>	<b>6</b>
<b>Energía cinética de los objetos en movimiento.....</b>	<b>6</b>
<b>Dilatación temporal.....</b>	<b>8</b>
<b>Contracción espacial.....</b>	<b>9</b>
<b>Relatividad de la simultaneidad.....</b>	<b>9</b>
<b>Transformación de velocidades.....</b>	<b>9</b>
<b>Aplicaciones prácticas.....</b>	<b>11</b>
<b>GPS.....</b>	<b>11</b>
<b>Física de alta energía.....</b>	<b>11</b>
<b>Reacciones nucleares y de alta energía.....</b>	<b>11</b>
<b>Máquinas MRI.....</b>	<b>12</b>
<b>Mejorar el entendimiento del Universo.....</b>	<b>12</b>
<b>Ejercicio.....</b>	<b>12</b>

# Introducción

## Nota del autor

No importa si se te da mal la física. Si no entiendes como derivar. Si no entiendes cómo usar tu calculadora. Si no entiendes los límites. Si no entiendes Arquímedes.

En las próximas 10 páginas voy a hacer que entiendas la relatividad especial en su mayoría y que sepas resolver algunos tipos de problemas (los más interesantes).

También quiero aclarar tres cosas:

- 1) La teoría de la relatividad especial es más fácil que la general y la precede en orden histórico.
- 2) La relatividad especial es más fácil de lo que piensas.
- 3) Si yo lo he entendido, tu también puedes.

## Historia de la relatividad especial

Para entender cómo surgió la relatividad especial, primero tenemos que entender cómo llegamos a esa teoría. Por un lado tenemos al científico que lo descubrió, y por otro lado todos los descubrimientos previos que dejaban entrever cómo iba a surgir esta nueva teoría.

Todos conocemos a Einstein, no necesita ninguna presentación. Nació en 1879 en Ulm (Reino de Wurtemberg, Alemania) y su familia se dedicaba a la ingeniería. Cuando Einstein todavía era muy pequeño la familia se tuvo que mudar a Múnich, donde su tío y su padre fundaron una empresa de suministro eléctrico: Elektrotechnische Fabrik J. Einstein & Cie.

Desde tan pequeño, Einstein mostró una gran capacidad para comprender conceptos matemático-lógicos, e hizo que sobresaliese en la escuela. A pesar de eso, a él no le gustaba el sistema educativo alemán por su rigidez y desempeñase escaso esfuerzo en ésta, pero nunca dejó de ser de los mejores alumnos.

Cuando tenía 12 años empezó a estudiar matemáticas avanzadas por su cuenta, ya que consideraba que lo que le enseñaban en el colegio era fácil. No le duraría mucho su estancia en el colegio alemán porque su empresa familiar se iría a la ruina. Aunque su familia se mudó a Italia, él se quedó en Alemania para terminar sus estudios.

Se mudó a Suiza, porque él quiso ingresar en el Instituto Politécnico de Zúrich (ahora ETH Zúrich), para terminar su educación secundaria pero no pasó el examen de ingreso (debido a una deficiente calificación en una asignatura de letras, cuando quería estudiar matemáticas y física). Por ello solo le quedó la opción de ir a un instituto menos

prestigioso. Al próximo año sí que pudo acceder al Instituto Politécnico de Zúrich para estudiar matemáticas y física.

En el año 1900, Einstein se graduó obteniendo el diploma de profesor en matemáticas y física pero no pudo encontrar trabajo. Por lo que acabó trabajando en una oficina de patentes (en teoría, con un trabajo permanente).

Su nuevo empleo le daba mucho tiempo libre en su oficina, donde se dedicó a la investigación científica teórica. En 1905, Einstein publica un trabajo explicando el movimiento browniano (movimiento de las moléculas dentro de un fluido, con este consiguió su doctorado en la universidad), otro explicando el efecto fotoeléctrico (electrones son irradiados cuando se incide luz sobre un material, con ello consiguió el premio Nobel en 1921) y otros en los que desarrolla a fondo la teoría de la relatividad especial.

Este año es probablemente el segundo año más importante de la física, después del 1687 (Newton descubre el cálculo de la gravedad).

También tenemos de antecedentes algunos descubrimientos científicos que sugerían una nueva teoría, algunos de estos son:

- 1) Las ecuaciones de Maxwell: las ecuaciones de Maxwell sugerían implícitamente que la velocidad de la luz en el vacío debería ser constante y depender a dos cantidades:  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$ . A estas cantidades las denominamos permitividad eléctrica del vacío y permeabilidad magnética del vacío y siguen la siguiente ecuación:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Sabemos que  $\epsilon_0$  es igual a  $8,8541878176 \cdot 10^{-12} \text{ s}/(\text{m} \cdot \Omega)$  y que  $\mu_0$  equivale a  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ s} \cdot \Omega$  por lo que podemos calcular  $c$ : la velocidad de la luz en el vacío.  $299.792.458 \text{ m/s}$ .

- 2) El experimento de Michelson-Morley: este experimento trataba de comprobar la existencia del éter (una sustancia en el espacio que permitiría la propagación de la luz). Los resultados no solo demostraron que no había éter en ningún lado, sino que sugerían que la luz nos llegaba de todos lados a la misma velocidad. Eso se podría traducir a “la velocidad de la luz es constante”.
- 3) Las contradicciones y paradojas de la física clásica: suponer que el espacio y el tiempo eran variables absolutas conllevaba a problemas de viajes en el tiempo, como la paradoja de la adición de velocidades.

- 4) Transformaciones de Lorentz: las transformaciones de Lorentz mantienen las leyes de la física intactas para observadores inerciales mediante unas matemáticas un tanto complejas.

Las transformaciones de Lorentz describen al espacio-tiempo como una entidad de cuatro dimensiones (tres espaciales y una temporal) y proponen que no hay un sistema de referencia privilegiado.

Estas transformaciones mantienen las leyes de la física a cambio de que el tiempo deje de ser una variable absoluta y pase a ser parte de una entidad más compleja. Eso provoca que surgan dos fenómenos: la dilatación del tiempo (como la paradoja de los gemelos, que en sí no es una paradoja) y la contracción del espacio.

## Postulados de la relatividad especial

La relatividad especial solo tiene dos principios muy fáciles de entender:

- 1) Principio especial de relatividad: las leyes de la física son iguales para todos los observadores.
- 2)  $c$  es una constante universal.

El primer principio es conservado gracias a las transformaciones de Lorentz, mientras que el segundo es una consecuencia de las leyes de Maxwell que ahora son universales gracias a las transformaciones. Einstein lo que hizo fue recopilar esa información y construir la teoría, una teoría que a día de hoy sigue siendo útil y que puso las bases para la teoría de la relatividad general en 1915.

## Consecuencias de la teoría

### Energía cinética de los objetos en movimiento

Otro coste de las transformaciones de Lorentz es que ningún objeto podría superar la velocidad de la luz, ya que hacerlo supondría paradojas temporales (viajar atrás en el tiempo). Una de las más famosas es la paradoja del abuelo:

Supongamos que tu creas una máquina del tiempo, o simplemente aceleras a una velocidad superior a la de la luz (suponiendo que fuera posible) y viajas al pasado. Viajas al pasado cuando tu abuelo todavía no tenía ningún hijo (tu padre).

Decides matarle, pero al matarlo, tu padre no podría haber nacido, tú tampoco, por lo que no puedes viajar más rápido que la luz (porque no existes) y no matas a tu abuelo.



Esto propone indirectamente que no se puede superar la velocidad de la luz, por lo tanto, la famosa ecuación de la mecánica clásica

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

no se adapta a la realidad.

Según esa ecuación, acelerar un objeto de una masa de 1kg hasta la velocidad de la luz solamente nos costaría  $4,5 \cdot 10^{16}J$ , o lo que es lo mismo, la energía de la fisión de 250kg de uranio-235.

Pero las transformaciones de Lorentz nos ayudan de nuevo a averiguar de nuevo que energía tiene el sistema dependiendo de la velocidad. Todos conocemos la famosa ecuación de la equivalencia masa-energía:  $E = mc^2$ . Todo objeto con masa tiene como consecuencia, energía.

A esa ecuación, se le puede incluir también la energía cinética de un sistema gracias al factor de Lorentz ( $\gamma$ ):

$$E_T = \gamma mc^2$$

donde

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Esta ecuación nos describe la energía total de un objeto, pero no su energía cinética. Si nos fijamos en  $\gamma$ , podemos darnos cuenta de que cuando la velocidad tiende a la velocidad de la luz,  $\gamma$  tiende a infinito:

$$\lim_{v \rightarrow c^-} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \infty$$

y por tanto, la energía requerida para llegar a la velocidad de la luz es infinita. En cambio, si tenemos una partícula más rápida que la luz, el factor de Lorentz dejaría de tener sentido en los números reales, y ¿qué significaría tener una energía en números imaginarios?

Lo que sí que podemos hacer es averiguar únicamente la energía cinética de un objeto en términos relativistas, simplemente mirando a las ecuaciones puedes deducir que

$$E_c = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2$$



## Dilatación temporal

La dilatación temporal es otra de las consecuencias de ir a alta velocidad. Las matemáticas de la dilatación temporal no son tan difíciles de calcular, primero te voy a introducir con un sistema de ecuaciones que ahora voy a explicar.

$$t' = \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Tenemos cuatro variables: tiempo, eje x (eje de movimiento), eje y, eje z. La dirección de movimiento del objeto va a ser en el eje x, por lo que todas las demás variables espaciales van a quedar igual que al principio ( $\Delta y = 0$ ;  $\Delta z = 0$ ).

También tenemos variables a las que les hemos puesto un ' y otras a las que no. Eso lo hacemos para diferenciar los dos sistemas de referencia (no estamos hablando de derivadas). También tenemos el factor de Lorentz que no necesita introducción.

Vamos a hacer un ejemplo. El objeto más rápido hecho por el ser humano ha sido una alcantarilla, y no es tan rápido como muchos creen. Se estima que la tapa salió volando a una velocidad de 60.000m/s. Si de alguna manera no se hubiese vaporizado en la atmósfera, ¿cuál habría sido el efecto de la dilatación temporal por ir a esa velocidad?

Las únicas dos ecuaciones en las que nos tenemos que fijar son las dos primeras, ya que no nos importan las otras dos (solo es un movimiento en una dimensión). Por conveniencia, ignoraremos los efectos de la gravedad de la Tierra y otras masas y nos fijaremos solo en la velocidad y el tiempo, también pondremos la velocidad en unidades de c y el tiempo en a (años).

Nuestros dos sistemas de referencia serán la Tierra como un objeto estático y la alcantarilla como objeto inercial. Empezarán el mismo lugar y la alcantarilla se empezará a desplazar a 60km/s. Calcularemos la dilatación temporal 67 años después (la alcantarilla salió volando en 1957).

Vamos a definir algunas variables. La velocidad:  $v = 0,0002c$  y el tiempo:  $t = 67a$ . Con eso podemos calcular:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,0002^2}} = \frac{1}{0,99999998} = 1,00000002$$

Ahora vamos a usar la ecuación general de la dilatación del tiempo:

$$t = \gamma t'$$

para despejar  $t'$

$$t' = \frac{t}{\gamma} = \frac{67}{1,00000002} = 66,9999987 \text{ años}$$

Es increíble que la tapa de alcantarilla haya “viajado” 42 segundos al pasado.

## Contracción espacial

La contracción espacial es muy similar a la dilatación temporal en términos matemáticos. Un objeto se contrae en la dirección de su movimiento tanto como indica la siguiente ecuación:

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

donde  $L$  es la longitud final,  $L_0$  la longitud inicial y  $\gamma$  el factor de Lorentz. No hay mucho más que hacer que aplicar la ecuación. Volviendo a la tapa de alcantarilla, la cual tenía 10,16cm de grosor, podemos calcular que contracción experimentó.

Ya sabemos que  $\gamma = 1,00000002$  así que solo tenemos que aplicar la fórmula:

$$L = \frac{L_0}{\gamma} = \frac{10,16}{1,00000002} = 10,1599998$$

Se ha encogido una cantidad minúscula.

## Relatividad de la simultaneidad

Esta consecuencia es muy grave. Dicho de forma sencilla, dice que no existe tal cosa como “al mismo tiempo” ya que el tiempo depende del sistema de referencia en el que el objeto se encuentre.

Lo que para un observador parezca simultaneo, para otro puede que no.

## Transformación de velocidades

Ya he mencionado previamente la paradoja de la adición de velocidades, pero no su solución. Una suma de velocidades según la mecánica clásica es tal que así:

$$f = u + v$$

donde  $f$  es la velocidad final,  $u$  es una de las velocidades y  $v$  es otra. El caso es que no puede ser correcto porque eso supondría que  $f$  podría ser mayor que  $c$  aunque ni  $u$  ni  $v$  fueran mayores que  $c$ .

La fórmula de adición de velocidades relativista es así:

$$f = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

la principal consecuencia de esta ecuación es que para que  $f$  sea mayor que  $c$ , o bien  $u$  o  $v$  tienen que ser mayores que  $c$ , y ya hemos demostrado que eso es imposible.

## Aplicaciones prácticas

### GPS

Tú móvil está conectado con el sistema GPS, tu reloj también, y tu portátil. Cada uno de estos aparatos puede saber exactamente donde está gracias al sistema GPS (“Global Position System”).

Este sistema funciona gracias a una red de 24 satélites que transmiten posición y hora a los dispositivos en la superficie. Estos satélites viajan a una gran velocidad (14.000km/h), lo que hacen que sean susceptibles a efectos de la relatividad especial.

Debido a que los satélites van a tal velocidad, los relojes internos que tienen (que son muy buenos, ellos no tienen problema midiendo) se atrasan 7 microsegundos por día a efectos de la dilatación temporal.

Bueno, eso no es verdad del todo, porque al estar sometidos a un campo gravitacional más intenso en la Tierra al final los relojes de los satélites se adelantan 38 microsegundos (combinando el efecto de la relatividad especial y de la relatividad general).

Pero sin la relatividad especial, el error provocado por la desincronización tras un solo día sería de 10km. No sé porque pero intentar buscar un restaurante en un radio de 10km me parece un poco complicado.

### Física de alta energía

Un protón no puede alcanzar la velocidad de la luz, y si le dices la energía para ello según la mecánica clásica se quedaría bastante corto.

La rama de la física de alta energía se dedica a estudiar colisiones entre partículas a velocidades relativistas, y observar lo que pasa. A pesar de que se llama “física de alta energía” la suma total de las energías de todas las partículas que se aceleran simultáneamente no daría para encender una bombilla durante un segundo.

La teoría de la relatividad especial puso las bases para “jugar” con estas partículas a velocidades próximas a las de la luz, y hoy en día se sigue estudiando para hacer cálculos de energía y velocidad en aceleradores de partículas.

### Reacciones nucleares y de alta energía

Un objeto pesado, como una casa, contiene la energía suficiente para proporcionar energía eléctrica al mundo actual cuatro años.

Imagínate un coche normal que en vez de utilizar 8kg de combustible por hora, usa  $5 \cdot 10^{-1} \text{ kg}$  por hora. Esa es la energía teórica que podríamos extraer de la masa según la ecuación  $E = mc^2$ .

También ayuda a explicar la energía del enlace nuclear: un protón y un neutrón cuando están unidos no pesan la suma de sus masas debido a que requieren parte de la energía para mantener el enlace, esto se conoce como defecto másico.

Ayuda a entender las reacciones nucleares entre partículas de alta energía, como las que ocurren en las estrellas... (construir bombas atómicas que caen sobre población civil...)

## Máquinas MRI

¿Alguna vez has estado dentro de una máquina MRI? No sería posible sin la relatividad general ni la física cuántica. Es una maravilla de la ingeniería.

Estas máquinas combinan la mejor tecnología existente: superconductores, emisión de positrones (no son exactamente las mismas máquinas, estas se denominan PET), campos magnéticos enormes...

## Mejorar el entendimiento del Universo

Esta teoría asentó las bases para entender el Universo (porque antes no hacían mucho más que mirar al cielo), se resolvieron algunas paradojas ocasionadas por la mecánica clásica y se consiguió entender el espacio y el tiempo como una única identidad interdependiente.

Entender un poco más sobre las reacciones nucleares estelares (a pesar de que todavía queda mucho por descubrir), hizo aparecer la rama de la astrofísica y la cosmología en la física y dejó de ser parte de la filosofía y lo más importante, sentó las bases para todos los descubrimientos que se harían con la relatividad general.

## Ejercicio

Tenemos una nave de 50 toneladas que va a el noventa por ciento de la velocidad de la luz y mide 14 metros de largo. Calcula y argumenta las respuestas.

- A) Suponiendo que alcanzó esa velocidad de forma instantánea y que consiguió su energía cinética obteniendo energía de la masa con un 40% de eficiencia, ¿cuánta masa usó como combustible?
- B) ¿Cuánto se contrae para un observador que va a  $0.5c$  en su misma dirección? ¿Y para un observador dentro la nave?
- C) ¿Cuánto tiempo pasará dentro de la nave para cuando llegue Alpha Centauri? ( $x = 4,367ly$ )

