

TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

La **teoría de la relatividad** incluye tanto a la teoría de la [relatividad especial](#) como la de [relatividad general](#), formuladas por [Albert Einstein](#) a principios del [siglo XX](#), que pretendían resolver la incompatibilidad existente entre la [mecánica newtoniana](#) y el [electromagnetismo](#).

La teoría de la relatividad especial, publicada en 1905, trata de la [física](#) del movimiento de los cuerpos en ausencia de fuerzas [gravitatorias](#), en el que se hacían compatibles las [ecuaciones de Maxwell](#) del electromagnetismo con una reformulación de las leyes del movimiento.

La teoría de la relatividad general, publicada en 1915, es una teoría de la gravedad que reemplaza a la gravedad newtoniana, aunque coincide numéricamente con ella para [campos gravitatorios débiles](#) y "pequeñas" velocidades. La teoría general se reduce a la teoría especial en ausencia de campos gravitatorios.

El 7 de marzo de 2010, la [Academia Israelí de Ciencias](#) exhibió públicamente los manuscritos originales de Einstein (redactados en 1905). El documento contiene 46 páginas de textos y fórmulas matemáticas escritas a mano y que fue donado por Einstein a la [Universidad Hebrea de Jerusalén](#) en 1925 con motivo de su inauguración

El supuesto básico de la teoría de la relatividad es que la localización de los sucesos físicos, tanto en el [tiempo](#) como en el [espacio](#), son relativos al estado de movimiento del [observador](#): así, la longitud de un objeto en movimiento o el instante en que algo sucede, a diferencia de lo que sucede en mecánica newtoniana, no son invariantes absolutos, y diferentes observadores en movimiento relativo entre sí diferirán respecto a ellos (las longitudes y los intervalos temporales, en relatividad son relativos y no absolutos).

Relatividad especial

La teoría de la relatividad especial, también llamada teoría de la relatividad restringida, fue publicada por [Albert Einstein](#) en 1905 y describe la [física](#) del movimiento en el marco de un [espacio-tiempo](#) plano. Esta teoría describe correctamente el movimiento de los cuerpos incluso a grandes velocidades y sus interacciones electromagnéticas, se usa básicamente para estudiar [sistemas de referencia inerciales](#) (no es aplicable para problemas astrofísicos donde el campo gravitatorio desempeña un papel importante).

Estos conceptos fueron presentados anteriormente por [Poincaré](#) y [Lorentz](#), que son considerados como precursores de la teoría. Si bien la teoría resolvía un buen número de problemas del electromagnetismo y daba una explicación del [experimento de Michelson-Morley](#), no proporciona una descripción relativista adecuada del campo gravitatorio.

Tras la publicación del artículo de Einstein, la nueva teoría de la relatividad especial fue aceptada en unos pocos años por prácticamente la totalidad de los físicos y los matemáticos. De hecho, Poincaré o Lorentz habían estado muy cerca de llegar al mismo resultado que Einstein. La forma geométrica definitiva de la teoría se debe a [Hermann Minkowski](#), antiguo profesor de Einstein en la Politécnica de Zürich; acuñó el término "[espacio-tiempo](#)" (*Raumzeit*) y le dio la forma matemática

adecuada.^{nota 1} El [espacio-tiempo de Minkowski](#) es una [variedad tetradimensional](#) en la que se entrelazaban de una manera indisoluble las tres dimensiones espaciales y el tiempo. En este espacio-tiempo de Minkowski, el movimiento de una partícula se representa mediante su [línea de universo](#) (*Weltlinie*), una curva cuyos puntos vienen determinados por cuatro variables distintas: las tres dimensiones espaciales (, ,) y el tiempo (). El nuevo esquema de Minkowski obligó a reinterpretar los conceptos de la métrica existentes hasta entonces. El concepto tridimensional de **punto** fue sustituido por el de **suceso**. La magnitud de **distancia** se reemplaza por la magnitud de **intervalo**.

Relatividad general

La relatividad general fue publicada por Einstein en [1915](#), presentada como conferencia en la [Academia de Ciencias Prusiana](#) el 25 de noviembre. La teoría generaliza el [principio de relatividad](#) de Einstein para un [observador](#) arbitrario. Esto implica que las ecuaciones de la teoría deben tener una forma de [covariancia](#) más general que la [covariancia de Lorentz](#) usada en la teoría de la relatividad especial. Además de esto, la teoría de la relatividad general propone que la propia geometría del espacio-tiempo se ve afectada por la presencia de [materia](#), de lo cual resulta una teoría relativista del [campo gravitatorio](#). De hecho la teoría de la relatividad general predice que el espacio-tiempo no será plano en presencia de materia y que la curvatura del espacio-tiempo será percibida como un campo gravitatorio.

Debe notarse que el matemático alemán [David Hilbert](#) escribió e hizo públicas las ecuaciones de la covarianza antes que Einstein. Ello resultó en no pocas acusaciones de plagio contra Einstein, pero probablemente sea más, porque es una teoría (o perspectiva) geométrica. La misma postula que la presencia de masa o energía «curva» al espacio-tiempo, y esta curvatura afecta la trayectoria de los cuerpos móviles e incluso la trayectoria de la luz.

Einstein expresó el propósito de la teoría de la relatividad general para aplicar plenamente el programa de [Ernst Mach](#) de la relativización de todos los efectos de [inerencia](#), incluso añadiendo la llamada [constante cosmológica](#) a sus ecuaciones de campo⁴ para este propósito. Este punto de contacto real de la influencia de [Ernst Mach](#) fue claramente identificado en 1918, cuando Einstein distingue lo que él bautizó como el [principio de Mach](#) (los efectos inerciales se derivan de la interacción de los cuerpos) del principio de la relatividad general, que se interpreta ahora como el principio de covarianza general.

En la teoría de la relatividad una partícula puntual queda representada por un par (x, m) , donde x es una curva diferenciable, llamada [línea de universo](#) de la partícula, y m es un escalar que representa la masa en reposo. El vector tangente a esta [curva](#) es un [vector temporal](#) llamado [cuadrivelocidad](#), el producto de este vector por la masa en reposo de la partícula es precisamente el [cuadrimomento](#). Este cuadrimomento es un vector de cuatro componentes, tres de estas componentes se denominan espaciales y representan el análogo relativista del [momento lineal](#) de la mecánica clásica, la otra componente denominada componente temporal representa la generalización relativista de la [energía cinética](#). Además, dada una curva arbitraria en el espacio-tiempo, puede definirse a lo largo de ella el llamado *intervalo relativista*, que se obtiene a partir del [tensor métrico](#). El intervalo relativista

medido a lo largo de la trayectoria de una partícula es proporcional al intervalo de [tiempo propio](#) o intervalo de tiempo percibido por dicha partícula.

Cuando se consideran campos o distribuciones continuas de masa, se necesita algún tipo de generalización para la noción de partícula. Un campo físico posee momentum y energía distribuidos en el espacio-tiempo, el concepto de cuádrimomento se generaliza mediante el llamado [tensor de energía-impulso](#) que representa la distribución en el espacio-tiempo tanto de energía como de [momento lineal](#). A su vez un [campo](#) dependiendo de su naturaleza puede representarse por un escalar, un vector o un tensor. Por ejemplo el [campo electromagnético](#) se representa por un tensor de segundo orden totalmente antisimétrico o [2-forma](#). Si se conoce la variación de un campo o una distribución de materia, en el espacio y en el tiempo entonces existen procedimientos para construir su tensor de energía-impulso.

En relatividad, estas [magnitudes físicas](#) son representadas por vectores 4-dimensionales o bien por objetos matemáticos llamados tensores, que generalizan los vectores, definidos sobre un espacio de cuatro dimensiones. Matemáticamente estos 4-vectores y 4-tensores son elementos definidos del [espacio vectorial tangente](#) al [espacio-tiempo](#) (y los tensores se definen y se construyen a partir del [fibrado tangente](#) o cotangente de la variedad que representa el espacio-tiempo).

Igualmente además de [cuadrivectores](#), se definen cuádritensores (tensores ordinarios definidos sobre el [fibrado tangente](#) del espacio-tiempo concebido como [variedad lorentziana](#)). La curvatura del espacio-tiempo se representa por un 4-tensor (tensor de cuarto orden), mientras que la energía y el momento de un medio continuo o el [campo electromagnético](#) se representan mediante 2-tensores (simétrico el [tensor energía-impulso](#), antisimétrico el de campo electromagnético). Los cuadrivectores son de hecho 1-tensores, en esta terminología. En este contexto se dice que una magnitud es un **invariante relativista** si tiene el mismo valor para todos los [observadores](#), obviamente todos los invariantes relativistas son escalares (0-tensores), frecuentemente formados por la contracción de magnitudes tensoriales.

El intervalo relativista puede definirse en cualquier espacio-tiempo, sea este plano como en la relatividad especial, o curvo como en relatividad general. Sin embargo, por simplicidad, discutiremos inicialmente el concepto de intervalo para el caso de un espacio-tiempo plano.

Los intervalos pueden ser clasificados en tres categorías: Intervalos **espaciales** (cuando Δs^2 es negativo), **temporales** (si Δs^2 es positivo) y **nulos** (cuando $\Delta s^2 = 0$). Como el lector habrá podido comprobar, los intervalos nulos son aquellos que corresponden a partículas que se mueven a la velocidad de la luz, como los fotones: La distancia Δx recorrida por el fotón es igual a su velocidad (c) multiplicada por el tiempo Δt y por lo tanto el intervalo Δs^2 se hace nulo.

Los intervalos nulos pueden ser representados en forma de [cono de luz](#), popularizados por el celeberrimo libro de [Stephen Hawking](#), [Historia del Tiempo](#). Sea un observador situado en el origen, el *futuro absoluto* (los sucesos que serán percibidos por el individuo) se despliega en la parte superior del eje de ordenadas, el *pasado absoluto* (los sucesos que ya han sido percibidos por el individuo) en la parte inferior, y el presente percibido por el observador en el punto 0. Los sucesos

que están fuera del cono de luz no nos afectan, y por lo tanto se dice de ellos que están situados en zonas del espacio-tiempo que no tienen **relación de causalidad** con la nuestra.

Imaginemos, por un momento, que en la galaxia Andrómeda, situada a 2,5 millones de años luz de nosotros, sucedió un cataclismo cósmico hace 100 000 años. Dado que, primero: la luz de Andrómeda tarda dos millones de años en llegar hasta nosotros y segundo: nada puede viajar a una velocidad superior a la de los fotones, es evidente, que no tenemos manera de enterarnos de lo que sucedió en dicha Galaxia hace tan solo 100 000 años. Se dice por lo tanto que el intervalo existente entre dicha hipotética catástrofe cósmica y nosotros, observadores del presente, es un **intervalo espacial**, y por lo tanto, no puede afectar a los individuos que en el presente viven en la Tierra: Es decir, no existe relación de causalidad entre ese evento y nosotros.

El único problema con esta hipótesis, es que al entrar en un agujero negro, se anula el espacio tiempo, y como ya sabemos, algo que contenga algún volumen o masa, debe tener como mínimo un espacio donde ubicarse, el tiempo en ese caso, no tiene mayor importancia, pero el espacio juega un rol muy importante en la ubicación de volúmenes, por lo que esto resulta muy improbable, pero no imposible para la tecnología.

Podemos escoger otro episodio histórico todavía más ilustrativo: El de la [estrella de Belén](#), tal y como fue interpretada por [Johannes Kepler](#). Este astrónomo alemán consideraba que dicha estrella se identificaba con una supernova que tuvo lugar el año 5 a. C., cuya luz fue observada por los astrónomos chinos contemporáneos, y que vino precedida en los años anteriores por varias conjunciones planetarias en la constelación de Piscis. Esa supernova probablemente estalló hace miles de años atrás, pero su luz no llegó a la tierra hasta el año 5 a. C. De ahí que el intervalo existente entre dicho evento y las observaciones de los astrónomos egipcios y megalíticos (que tuvieron lugar varios siglos antes de Cristo) sea un *intervalo espacial*, pues la radiación de la supernova nunca pudo llegarles. Por el contrario, la explosión de la supernova por un lado, y las observaciones realizadas por los tres magos en Babilonia y por los astrónomos chinos en el año 5 a. C. por el otro, están unidas entre sí por un *intervalo temporal*, ya que la luz sí pudo alcanzar a dichos observadores.

El [tiempo propio](#) y el intervalo se relacionan mediante la siguiente equivalencia: , es decir, el intervalo es igual al tiempo local multiplicado por la velocidad de la luz. Una de las características tanto del tiempo local como del intervalo es su invarianza ante las transformaciones de coordenadas. Sea cual sea nuestro punto de referencia, sea cual sea nuestra velocidad, el intervalo entre un determinado evento y nosotros permanece invariante.

Esta invarianza se expresa a través de la llamada **geometría hiperbólica**: La ecuación del intervalo tiene la estructura de una hipérbola sobre cuatro dimensiones, cuyo *término independiente* coincide con el valor del cuadrado del intervalo (), que como se acaba de decir en el párrafo anterior, es constante. Las *asíntotas* de la hipérbola vendrían a coincidir con el cono de luz.

La aparición de la Relatividad Especial puso fin a la secular disputa que mantenían en el seno de la mecánica clásica las escuelas de los **mecanicistas** y los **energetistas**. Los primeros sostenían, siguiendo a Descartes y Huygens, que la magnitud conservada en todo movimiento venía

constituida por el **momentum** total del sistema, mientras que los energetistas -que tomaban por base los estudios de Leibniz- consideraban que la magnitud conservada venía conformada por la suma de dos cantidades: La *fuera viva*, equivalente a la mitad de la masa multiplicada por la velocidad al cuadrado () a la que hoy denominaríamos "energía cinética", y la *fuera muerta*, equivalente a la altura por la constante g (), que correspondería a la "energía potencial". Fue el físico alemán [Hermann von Helmholtz](#) el que primero dio a la *fuerzas leibnizianas* la denominación genérica de **energía** y el que formuló la *Ley de conservación de la energía*, que no se restringe a la mecánica, que se extiende también a otras disciplinas físicas como la termodinámica.

La mecánica newtoniana dio la razón a ambos postulados, afirmando que tanto el momentum como la energía son magnitudes conservadas en todo movimiento sometido a fuerzas conservativas. Sin embargo, la Relatividad Especial dio un paso más allá, por cuanto a partir de los trabajos de Einstein y Minkowski el momentum y la energía dejaron de ser considerados como entidades independientes y se les pasó a considerar como dos aspectos, dos facetas de una **única magnitud conservada: el cuadrimentum**.

La revolución de la teoría de la relatividad es que crea un cono de luz, tanto hacia delante en el tiempo, como hacia atrás. Puesto que lo que define los límites de ese cono es la velocidad de la luz y ninguna partícula puede superarla, nada de lo que ocurra puede estar fuera de los límites del mismo.

Ese cono describe al observador moviéndose por la hipersuperficie que es el presente. Hacia "arriba" quedan los eventos del futuro, lo que va a ocurrir. Cualquier posibilidad o hecho tiene que ocurrir dentro de ese cono. Hacia abajo quedan los eventos que te han ocurrido.

Añade Gaumé: " *Y cuidado, no es que no "ocurran" cosas fuera de ese cono, sí ocurren, sólo que no pueden afectarte. Para que pudiesen afectarte tienen que superar la velocidad de luz. El cono es independiente de la velocidad de movimiento del observador. Eso es lo que fuerza a que el tiempo dependa del estado del movimiento*".

El cono delimita eventos que puedan tener efecto sobre otros. La línea del universo es la unión de la infinidad de puntos correspondientes a todos lo que ha ocurrido en tu vida. Siempre dentro del cono.

A $E = mc^2$ se llega a raíz de una serie de ecuaciones que, debido al carácter más accesible de este post, no tiene sentido explicar aquí aunque para quien tenga conocimientos medios de física y matemática hay una explicación bastante [buena aquí](#). Para llegar hasta la ecuación hace falta tener en cuenta dos leyes importantes:

- **Ley de conservación del momento lineal:** qué básicamente quiere decir que cuando dos objetos entran en colisión a distinta velocidad (y por tanto diferente momento lineal) la resultante de la suma de ambos objetos ha de tener el mismo valor antes y después.
- **La famosa ley de conservación de la energía:** La energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma. Cambia de una forma de energía a otra.

