

# Orígenes de la Relatividad General

## *Introducción*

“Estaba trabajando en la oficina de patentes de Berna cuando de pronto me vino el siguiente pensamiento: ‘Si una persona cae libremente no sentirá su propio peso’. Estaba sorprendido. Este simple pensamiento me causó una gran impresión. Esto me impulsó hacia una teoría de la gravitación”.

De esta manera recordaba Albert Einstein cómo comenzó a gestarse la teoría de la Relatividad General. Ese ‘simple pensamiento’, como el propio Einstein lo describe es el llamado *Principio de Equivalencia*, que formuló en el año 1907.

Galileo Galilei, en el siglo XVI, descubrió que todos los cuerpos, independientemente de su composición y estructura, tienen la misma aceleración en un campo gravitacional constante. Einstein además comprendió que si todos los cuerpos en caída libre se aceleran de igual forma, la aceleración relativa entre estos es nula; localmente, un observador en caída libre podría pensar que está en reposo. No tiene forma de distinguir que está inmerso en un campo gravitacional.

Los efectos de la gravedad pueden, además, reproducirse mediante cualquier tipo de aceleración, como se ilustra en los siguientes ejemplos: un ser humano en una nave espacial cuya aceleración sea igual a la aceleración de terrestre, no notará ninguna diferencia entre estar parado en la nave y en la Tierra (ver Figura 1). Otro ejemplo, que era el favorito de Einstein, es el de un ascensor en caída libre. Una persona dentro del ascensor experimenta la misma sensación de ingravidez que si se encontrara en el espacio, libre de toda influencia del campo gravitatorio terrestre. En ambos casos los efectos de la gravedad han sido reemplazados mediante la elección de un sistema de referencia acelerado.

Vemos entonces que existe una gran diferencia entre la gravedad y el resto de las fuerzas de la naturaleza, como por ejemplo la fuerza eléctrica: es imposible simular la fuerza eléctrica, dado que no todos los cuerpos en un campo eléctrico experimentan la misma aceleración. La gravedad, pues, no es una fuerza ejercida entre los distintos cuerpos, sino la propiedad que tienen los cuerpos materiales de curvar el espacio-tiempo.

El concepto de espacio-tiempo fue desarrollado por Hermann Minkowski, antiguo profesor de matemáticas de Einstein en el Instituto Federal de Tecnología (ETH) de Zürich. Según Einstein, gracias a los trabajos de Minkowski, le fue mucho más fácil la transición entre la Relatividad Especial y la Relatividad General. Al célebre matemático y sus trabajos sobre el espacio-tiempo está dedicada la próxima sección.

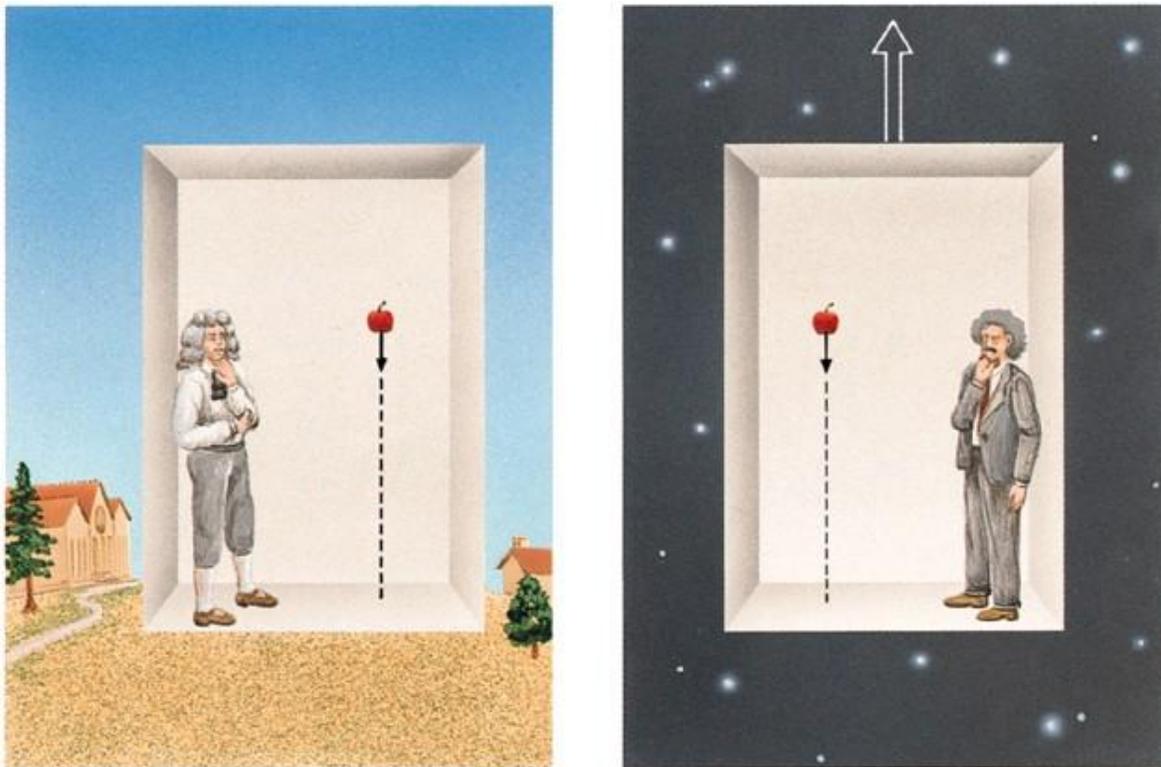


Figura1. Un observador en una nave espacial, Einstein, cuya aceleración es igual a la terrestre no podría distinguir entre estar parado en la nave y en la Tierra.

## *El espacio-tiempo*

Hermann Minkowski nació el 22 de junio de 1864 en Aleksotas, parte del Imperio Ruso, hoy Lituania. Realizó sus estudios universitarios en la Universidad de Königsberg, en la actualidad Kaliningrado. Allí, en 1885 recibió el doctorado en matemáticas. Dio clases en las universidades de Bonn y Königsberg. En el año 1902, Minkowski se trasladó de Zürich, donde, como ya mencionamos, había sido profesor de Einstein en el ETH, a la Universidad de Göttingen. Fue allí donde, en 1905, comenzó a estudiar una formulación geométrica más precisa de la electrodinámica y se interesó particularmente por los trabajos de Einstein sobre el tema. Dos años más tarde, el 7 de noviembre de 1907 dio un coloquio sobre relatividad y fue por primera vez, cuando los términos espacio-tiempo, cono de luz, entre otros, fueron conocidos.

¿Qué es el espacio-tiempo?

*El espacio-tiempo es la suma física de todos los eventos que suceden a las cosas.*



Figura 2. El joven Hermann Minkowski.

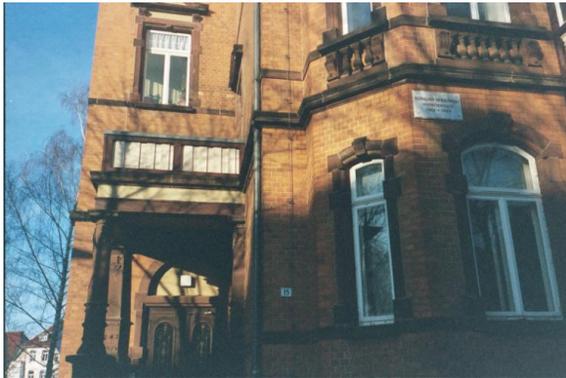


Figura 3. Residencia de Minkowski en Göttingen desde 1902 hasta 1909.

Las cosas son individuos dotados de propiedades físicas. Por ejemplo, la carga es una propiedad de los electrones; la temperatura es una propiedad de los cuerpos macroscópicos. Un cambio en el estado de una cosa material es un evento. Las partículas, estrellas, campos electromagnéticos, seres vivos o muertos, por mencionar sólo algunos ejemplos, son cosas materiales<sup>1</sup>, esto es, sus propiedades cambian. El espacio-tiempo está conformado por todos los eventos que han sucedido, suceden y sucederán de todas las cosas materiales que han existido, existen y existirán. El espacio-tiempo es entonces una propiedad emergente de las cosas. Si no existiesen cosas cambiantes, no habría espacio-tiempo.

---

<sup>1</sup> Notar que materia y masa no son lo mismo: la materia es todo aquello susceptible de cambio, como por ejemplo, las partículas y los campos. La masa, en cambio, es una propiedad de algunos sistemas materiales (en general partículas y sistemas que se mueven a velocidades inferiores a la de la luz). La luz, formada por fotones, tiene energía pero no masa. Los números, conjuntos y otros entes abstractos no son materia, ya que no cambian.

Cada evento del espacio-tiempo puede especificarse mediante 3 coordenadas espaciales y una temporal. Por ejemplo, estas líneas están siendo escritas en la confitería París cuyas coordenadas espaciales pueden ser dadas por la latitud y la longitud del lugar, y la altura sobre el nivel del mar, más una cuarta coordenada que indica cuando sucede el evento. Hasta hace poco más de un siglo se pensaba que las distancias se medían de acuerdo a la geometría desarrollada por Euclides. La geometría que hemos aprendido en el colegio es euclídeana y algunos de sus axiomas<sup>2</sup> son por ejemplo: la suma de los ángulos interiores de todo triángulo es 180° o, dos líneas paralelas sólo se intersecan en el infinito. Para poder medir la distancia entre dos puntos en este espacio se utiliza el famoso teorema de Pitágoras:

$$x^2 + y^2 = h^2$$

donde  $h$  denota la longitud de la hipotenusa de un triángulo rectángulo y  $x$  e  $y$  la longitud de los catetos, como se muestra en la Figura 4. Un espacio donde se cumple esta relación se llama *euclideo*. Además, espacio y tiempo eran concebidos como dos entidades completamente independientes. Mientras que el movimiento en el espacio es tridimensional, el tiempo “fluye” en una única dirección y sentido, desde el pasado hacia el futuro. La coordenada temporal de un dado evento, por lo tanto, es la misma para todos los observadores, independientemente de su posición y velocidad relativa.

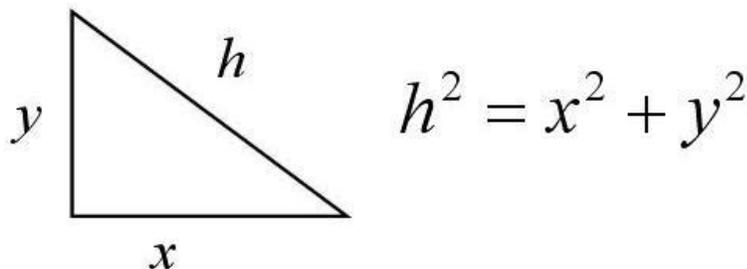


Figura 4. Teorema de Pitágoras.

Uno de los aspectos más revolucionarios de la teoría de la Relatividad Especial, formulada por Einstein en 1905, fue el de la desaparición de la simultaneidad absoluta. La duración de un intervalo espacial y temporal para un observador inercial (en movimiento rectilíneo y uniforme) ya no tiene porqué coincidir con la duración del mismo intervalo para otro

---

<sup>2</sup> Los axiomas son enunciados que sirven para dotar de significado a los términos primitivos (conjunto de conceptos no definidos) y para fijar las relaciones básicas de una teoría. Los axiomas se suponen verdaderos.

observador. Esto da lugar a fenómenos tales como la dilatación temporal o la contracción de longitudes. Poco tiempo después de la publicación de los trabajos de Einstein en Relatividad Especial, Minkowski comprendió que la nueva teoría implicaba una reformulación del concepto y de la estructura del espacio y del tiempo. Básicamente, la forma de medir distancias e intervalos de tiempo cambia, ya no es más euclídea.

Minkowski encontró que las distancias (llamadas ‘intervalos’) en el espacio-tiempo de la Relatividad Especial, se miden como:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

En esta expresión ‘ $dx$ ’, ‘ $dy$ ’ y ‘ $dz$ ’ representan distancias arbitrariamente pequeñas en tres direcciones espaciales. La variable  $t$  denota al tiempo, y  $c$  es una constante con unidades de velocidad (se trata de la velocidad de la luz), de forma que ‘ $cdt$ ’ es una distancia medida según un *eje temporal*. Vemos así que el espacio-tiempo de Minkowski es cuatridimensional: se ha incorporado al tiempo como una dimensión más. La forma de medir distancias, o en términos geométricos, la ‘métrica’ de este espacio-tiempo es pseudo-euclídea o minkowskiana.

¿Cómo se puede representar el espacio-tiempo de Minkowski?

Supongamos que ocurre un evento consistente en la emisión de un pulso de luz. En un espacio-tiempo sin materia, el frente de onda electromagnético se propaga como una esfera centrada en el punto de emisión, cuyo radio crece con el tiempo a la velocidad de la luz (ver Figura 5). Si suprimimos una dimensión espacial, podemos representar la esfera de luz como un cono cuyo ápex coincide con el evento inicial, tal como se muestra en la Figura 6. La propagación de la luz divide al espacio-tiempo en tres regiones: aquella por donde viaja la luz (la superficie en forma de cono), el interior del cono, y el exterior del mismo. Sólo en la primera región hay rayos de luz; los sistemas materiales que se mueven a velocidades menores que la luz se encuentran en la segunda región. Por fuera del cono, no puede haber sistemas u objetos físicos que hayan estado en el lugar y momento en que ocurrió el evento; de lo contrario, éstos viajarían más rápido que la luz, lo que no está permitido de acuerdo con la Relatividad Especial. El cono determinado por el evento se llama ‘cono de luz’. La estructura causal del espacio-tiempo de Minkowski queda entonces definida por el cono de luz en cada evento.

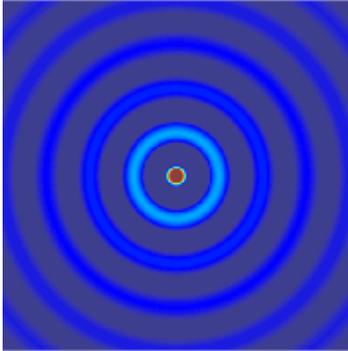


Figura 5. Representación de un frente de onda esférico en distintos instantes de tiempo. Una dimensión espacial ha sido suprimida.

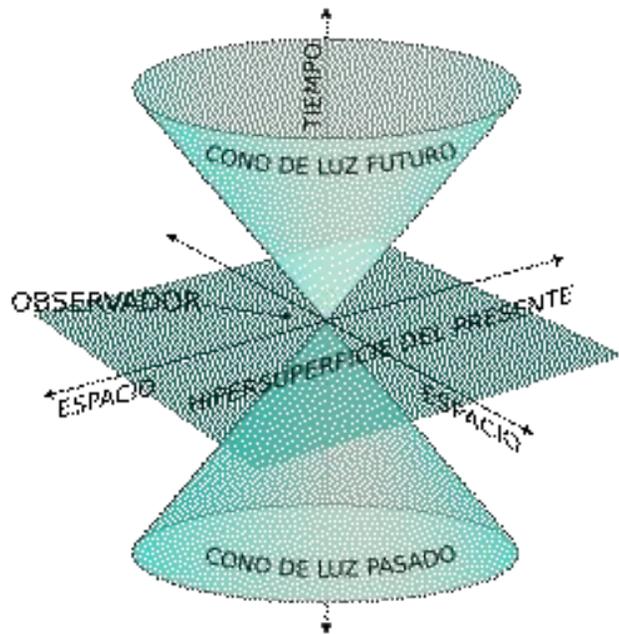


Figura 6. Cono de luz.

En el espacio-tiempo hay algunos eventos que están relacionados entre sí y hay otros que no, como se ilustra en la Figura 7. El eje  $x$  representa una de las dimensiones espaciales y el eje  $ct$  (en unidades de longitud), la dimensión temporal. Dado un evento que llamaremos A, su correspondiente cono de luz queda determinado por todos aquellos rayos de luz que ‘pasan’ por dicho evento. En la región interior al cono encontramos todos los eventos que están relacionados con A. En particular, el evento C se encuentra en el cono de luz pasado de A y el evento B en el cono de luz futuro. Los eventos E y D, sin embargo, se hallan fuera del cono de luz de A y por ende, no están relacionados con éste ya que una señal emitida desde A hasta E o D debería viajar más rápido que la luz, lo cual no está permitido por la Relatividad Especial.

La estructura causal del espacio-tiempo es, entonces, el complejo de relaciones entre los eventos que lo componen, esto es entre los cambios de estado de todas las cosas del universo.

La causalidad es una relación entre eventos, no entre cosas. Es común oír decir, por ejemplo, que el estómago causa la digestión. Las cosas no causan una sucesión de eventos, esto es, procesos. Las cosas continuamente cambian de estado, experimentan procesos. Son estos procesos los que causan cambios en otras cosas. La causalidad es una forma de generación de eventos, pero no es la única. El decaimiento<sup>3</sup> del muón<sup>4</sup>, por ejemplo, es una forma de generación de eventos *acausal*. La diferencia crucial entre eventos causales y acausales es que en el primer caso, un dado evento es causado necesariamente por la acción de una cosa. El decaimiento del muón es espontáneo, no requiere de la acción de ninguna cosa externa.

Antes de la Relatividad Especial, la estructura causal del espacio y tiempo, concebido por Galileo y Newton, se representa como una línea infinita que separa el pasado y el futuro, tal como se muestra en la Figura 8 (dos dimensiones espaciales fueron suprimidas). Cada evento se caracteriza mediante un tiempo universal. Todos aquellos eventos que tienen la misma coordenada temporal y son paralelos a la línea del presente son simultáneos.

---

<sup>3</sup> El decaimiento de una partícula es el proceso por el cual la energía de una partícula aislada se transforma en un cierto número de partículas con menor energía; el decaimiento también ocurre cuando una partícula pasa a un nivel de energía menor.

<sup>4</sup> El muón es una partícula elemental; pertenece al grupo de los leptones. La vida del muón es de  $10^{-6}$  segundos.

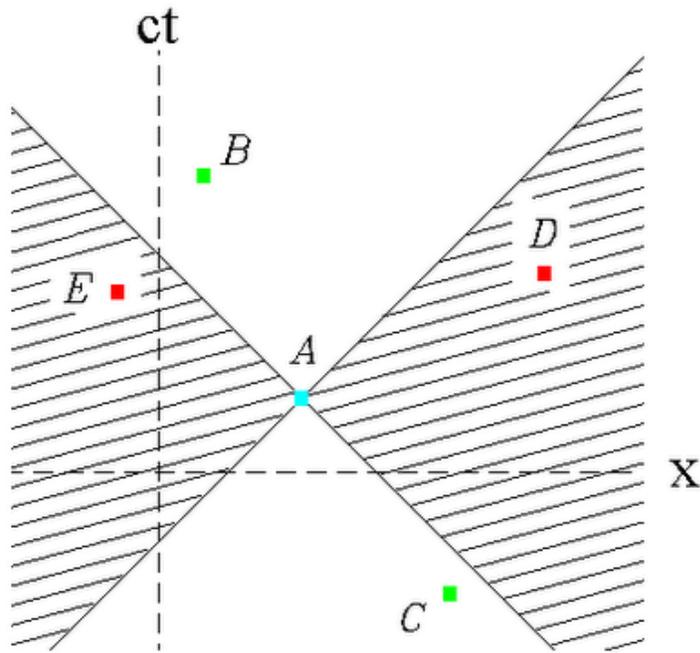


Figura 7. Cono de luz del evento A.

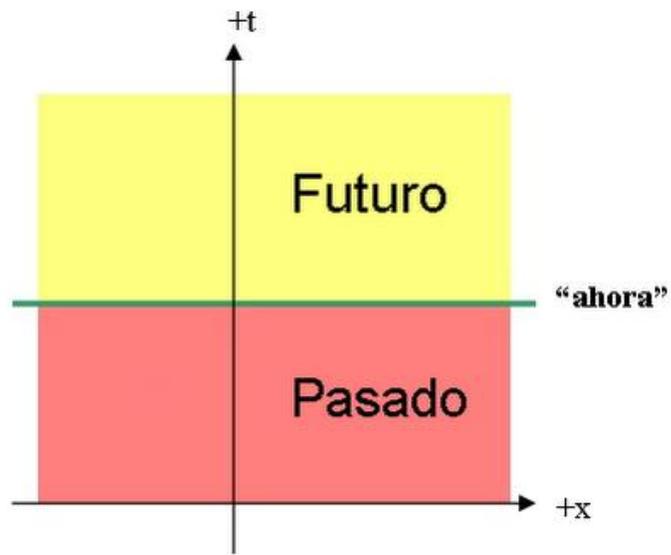


Figura 8. Estructura causal del espacio y tiempo newtoniano.

A diferencia del espacio-tiempo de Minkowski, los sistemas u objetos materiales se mueven del pasado al futuro, sin ninguna restricción. La diferencia fundamental, entonces, entre la estructura causal del espacio-tiempo minkowskiano y newtoniano, es que en el primero existe una velocidad máxima para el movimiento de los sistemas materiales, 300000 km/seg, la velocidad de la luz, mientras que en el segundo no existe tal restricción.

El espacio-tiempo de Minkowski es el espacio-tiempo de la Relatividad Especial: todos los sistemas de referencia se mueven con velocidad constante, libres de toda fuerza o aceleración. El espacio-tiempo es plano. La situación cambia si se introduce la gravedad. Al estar todos los sistemas de referencia acelerados, no hay sistemas de referencia inerciales. La geometría del espacio-tiempo ya no es más plana y queda determinada por las propiedades de los sistemas físicos (ver Figura 9). La geometría del universo ya no puede ser descrita mediante una única métrica, la minkowskiana, sino que depende del contenido de energía y cantidad de movimiento de los sistemas físicos en cada punto del espacio-tiempo. El Principio de Equivalencia se traduce a que localmente, en el entorno de todo evento, la métrica es aproximadamente minkowskiana, esto es la curvatura del espacio-tiempo se anula a pequeña escala y la Relatividad Especial sigue siendo válida.

Ocho años transcurrieron desde la formulación del Principio de Equivalencia, en 1907, hasta la obtención de las ecuaciones de campo de la Relatividad General, en 1915. Durante ese tiempo Einstein dejó de ser un completo desconocido que trabajaba en su tiempo libre en ciencia; ingresó al mundo académico, convirtiéndose en profesor de las universidades más prestigiosas de Europa. Fue en el ETH de Zürich donde vuelve a encontrarse con un viejo amigo, Marcel Grossmann. Juntos desarrollarían el formalismo matemático necesario para formular las ecuaciones de la Relatividad General.

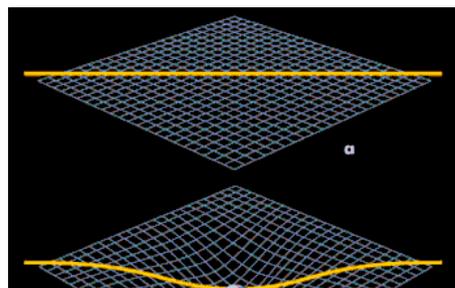


Figura 9. Espacio-tiempo de Minkowski y espacio-tiempo de la Relatividad General. Las propiedades de los sistemas físicos curvan el espacio-tiempo.

## *De la colaboración Einstein-Grossmann a las ecuaciones de campo de la Relatividad General*

En el año 1907 comienza la vida académica de Einstein. Obtiene una Privadozent en la Universidad de Berna, lo que le daba derecho a dar clases y cuya única remuneración era una pequeña matrícula que pagaban quienes atendían a clases. Al poco tiempo, obtiene su primera posición académica, profesor asociado de física teórica en la Universidad de Zürich. El 15 de octubre de 1909 comienza a ejercer su nuevo cargo. En el mismo mes, a los 30 años de edad, asiste a su primera conferencia científica en la bella ciudad de Salzburgo.

Su estadía en Zürich finalizó en marzo de 1911, cuando el Emperador Francisco José de Austro-Hungría nombra a Einstein profesor titular de la Universidad Alemana de Praga. Fue allí donde se dedicó a estudiar los efectos de la gravitación sobre la luz. Llegó a la conclusión que la trayectoria de la luz se curvaría en la presencia de un cuerpo masivo. Estos efectos serían observables por ejemplo durante un eclipse de sol. Predijo que el efecto del desplazamiento de las estrellas de fondo justo detrás del sol debería ser de  $0''.83$ , la mitad de lo que hoy se conoce es el valor correcto. Según cuenta Einstein en su correspondencia, nunca estuvo cómodo en Praga. Se sentía molesto por la cantidad de trabajo burocrático que debía hacer a lo que se añadía el trato que recibía, extremadamente formal y servil, que no correspondía con su personalidad.

A los 16 meses de haber sido nombrado profesor en Praga, Einstein se incorpora como profesor en el ETH de Zürich, donde él mismo había estudiado. Allí se encuentra con su viejo amigo Marcel Grossmann, quien había estudiado con Einstein y que ahora era profesor de matemáticas en dicha universidad. Fue a éste a quien Einstein no sólo dedicó su tesis doctoral sino también la primera monografía sobre relatividad general, escrita en 1916: “Finalmente, en este lugar mis agradecimientos van a mi amigo el matemático Grossmann, cuya ayuda no sólo me salvó del estudio de la literatura matemática relevante sino que también me apoyó en la búsqueda de las ecuaciones de campo de la gravitación”.

Marcel Grossmann nació en Budapest en 1878, aunque su familia era de ascendencia Suiza. Hasta los 15 años vivió en su ciudad natal para luego regresar a Suiza, donde terminaría el colegio secundario. Entre 1896 y 1900 estudió junto con Einstein en el ETH de Zürich. Durante los siguientes años enseñó en colegios secundarios, obtuvo su doctorado en la universidad de Zürich, publicó dos libros de geometría para estudiantes secundarios y 3 trabajos en geometría no-euclidea, recibiendo elogios del propio Hilbert, el matemático más importante de aquella época. Entre 1910 y 1912 publica otros cuatro trabajos, presentando uno de ellos en el 5º congreso internacional de matemáticos en Cambridge, Inglaterra. Previamente, en 1907, Grossmann ingresa como profesor titular de geometría en

el ETH de Zürich y en 1910 se convierte en uno de los miembros fundadores de la Sociedad Suiza Matemática.

Grossmann fue quien señaló a Einstein que la geometría Riemanniana era la herramienta matemática adecuado para la formulación de la Relatividad General y le enseñó los formalismos matemáticos de la geometría diferencial. Juntos publicaron dos trabajos, en 1913 y 1915. En 1936 Grossmann muere de esclerosis múltiple. Einstein siempre lo recordó con gratitud y respeto, no sólo por haberlo ayudado en la construcción de la Relatividad General sino por la amistad de toda una vida.

Einstein y Grossmann lograron describir a la gravitación como un ‘tensor métrico’; el tensor métrico es una herramienta matemática que permite medir distancias. De acuerdo a la energía y cantidad de movimiento de los sistemas físicos en un dado evento, la geometría del espacio-tiempo cambia y por ende la forma de medir distancias entre eventos del espacio-tiempo. El siguiente paso fundamental que le faltaba dar a Einstein era encontrar las ecuaciones que relacionaban el ‘campo métrico’ con las propiedades físicas de los sistemas materiales.



Figura 10. De izquierda a derecha: Marcel Grossmann, Albert Einstein, Gustav Geissler y Eugen Grossmann en Thalwil, cerca de Zürich, 28 de mayo de 1899.

En 1913 Einstein acepta una invitación para ir a Berlín a incorporarse a la Academia Prusiana de Ciencias y dirigir el Instituto de Física Káiser Guillermo. El 6 de abril de 1914, a poco menos de tres meses que se desatara la Primera Guerra Mundial, Einstein llega a Berlín. En el verano del año siguiente en la Universidad de Goettingen, Einstein dicta una serie de conferencias sobre relatividad general y sus esfuerzos por llegar a las ecuaciones de campo. Entre los asistentes se encontraba David Hilbert, quien era profesor de dicha universidad. Hilbert logró interesarse en el trabajo de Einstein y ambos científicos intercambiaron una nutrida correspondencia sobre el tema, en particular entre el 7 y 25 de noviembre de 1915. El 20 de noviembre Hilbert envía para su publicación un artículo con las ecuaciones de campo de la Relatividad General a la revista de la sociedad matemática de Goettingen. El 25 de noviembre Einstein descubre la forma definitiva de las ecuaciones de campo de la gravitación y envía el correspondiente trabajo a los Anales de la Academia Prusiana de Ciencias. Si bien fue Hilbert el primero en hallar las ecuaciones de campo de la Relatividad General, Einstein, con la ayuda de Marcel Grossmann, fue quien desarrolló las ideas fundamentales de la teoría. Hilbert siempre reconoció públicamente todo el crédito de la Relatividad General a Einstein.

David Hilbert murió el 14 de febrero en 1943 en Göttingen, a la edad de 81 años. Unas pocas personas asistieron a su entierro, en el cementerio de Göttingen. En el epitafio de su tumba se lee: “*Wir müssen wissen. Wir werden wissen*” (We must know. We will know).



Figura 11. David Hilbert.



Figura 12. Tumba de Hilbert en el cementerio de Göttingen.

## Las ecuaciones de campo de Einstein

Las ecuaciones de campo de Einstein tienen la forma:

$$G = k T,$$

donde  $G$  es una expresión matemática llamada ‘tensor de Einstein’ que contiene toda la información geométrica del espacio-tiempo, y  $T$  es el ‘tensor de energía-impulso’ que describe las propiedades físicas de los sistemas materiales que generan la gravitación. Las ecuaciones de Einstein son un sistema de 10 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de tipo hiperbólico no-lineales. Dada su extrema complejidad se conocen pocas soluciones exactas de las mismas, y suelen utilizarse una variedad de soluciones aproximadas.

En la teoría de la Relatividad General la distribución de los conos de luz ya no es más uniforme, como sucedía en el espacio-tiempo de la Relatividad Especial (ver Figura 13). De acuerdo a como sea la curvatura del espacio-tiempo, la dirección temporal del los conos puede cambiar. Dado que las partículas masivas sólo pueden moverse dentro de su correspondiente cono de luz, sus trayectorias en el espacio-tiempo también se verán afectadas. En otras palabras, tanto las partículas masivas como también la luz, se moverán por una trayectoria dictada por la curvatura del espacio-tiempo, como se muestra en la Figura 14.

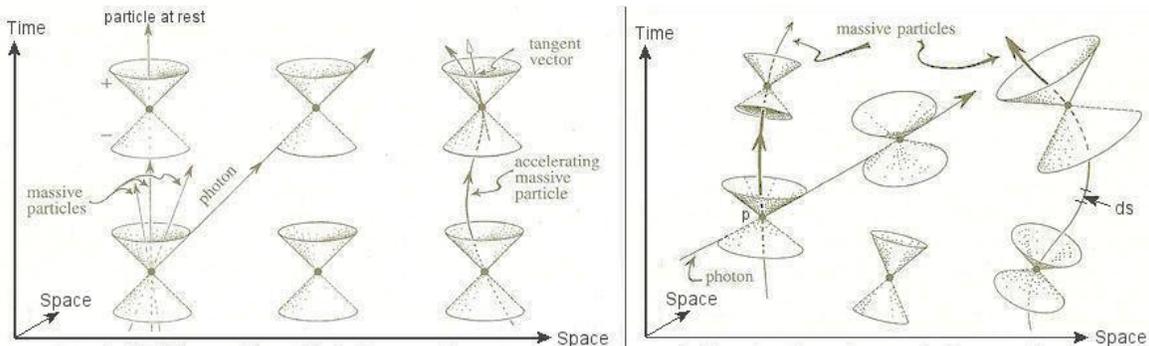


Figura 13. En la imagen izquierda se muestran los conos de luz en el espacio-tiempo de la Relatividad Especial. Los ejes temporales de los conos están en la misma dirección y sentido. En la imagen de la derecha la orientación de los conos no es uniforme debido a que el espacio-tiempo está curvado.

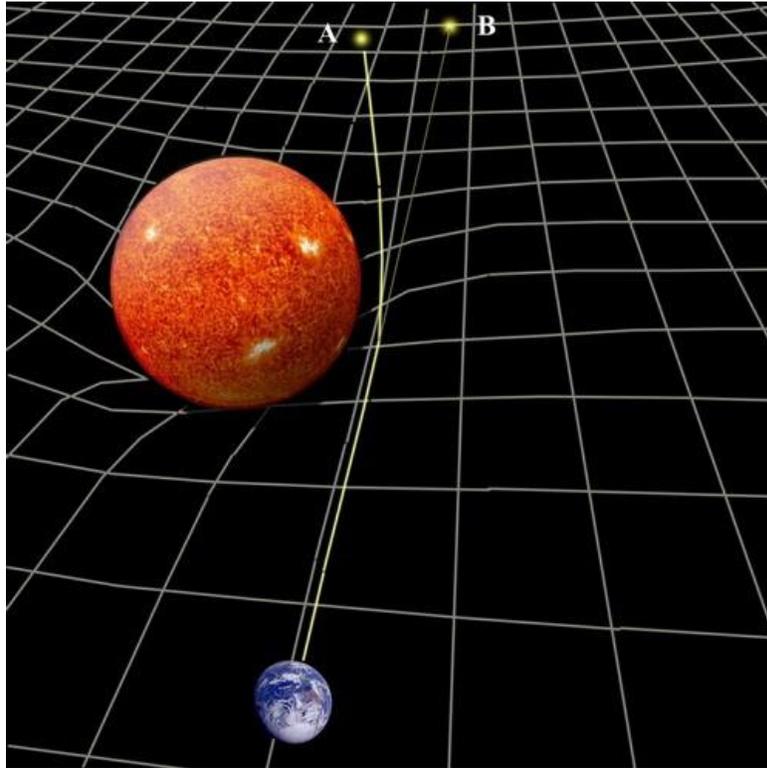


Figura 14. Cuando un rayo de luz pasa cerca del Sol su trayectoria se ve afectada ya que el espacio-tiempo está fuertemente curvado en un entorno del Sol. La trayectoria B es la que seguiría el rayo de luz en ausencia del Sol.

Einstein propuso tres test para verificar la teoría de la Relatividad General. El primero, en 1916, fue la correcta predicción de las anomalías en la órbita de Mercurio, descubiertas por el astrónomo francés Urbain Le Verrier en 1859, y que hasta el momento no habían podido ser explicadas. El segundo fue la desviación de los rayos de luz en las cercanías del Sol, verificado durante un eclipse solar en 1919. Los valores medidos durante el experimento estaban en acuerdo con los calculados por Einstein. Este hecho le valió el reconocimiento del ámbito científico mundial además de convertirse en el científico más famoso de todos los tiempos. El tercer test propuesto por Einstein fue la observación del corrimiento al rojo de la luz inmersa en un campo gravitacional. La verificación de este fenómeno fue posterior a la muerte de Einstein. En 1960, físicos de la Universidad de Harvard detectaron con una precisión de uno en mil el corrimiento en frecuencia de rayos gamma que recorrieron 23 metros en forma vertical hacia la Tierra.

Desde el comienzo de la década de 1920 hasta fines de de la década de 1950, la Relatividad General fue una teoría en la que muy pocos científicos trabajaban. Como se mencionó anteriormente, sólo dos test experimentales de la misma fueron realizados en dicho período. En aquellos tiempos estaba en boga la teoría de la Mecánica Cuántica que resultaba a muchos más redituable tanto en lo académico como en lo económico. La Relatividad General tampoco era objeto de estudio en las universidades. Durante la vida de Einstein no hubo ninguna conferencia internacional sobre relatividad general y gravitación. La primera fue celebrada en Berna, en julio de 1955, tres meses después de la muerte de Einstein, con motivo de los 50 años de la Relatividad. Einstein fue invitado a participar pero declinó la invitación por problemas de salud. Esta conferencia, llamada GR0, marcó el inicio de una serie de congresos internacionales en relatividad general y gravitación que se celebran hasta la fecha. La próxima conferencia, la GR20, será el año que viene en Varsovia, Polonia.

¿Cuáles fueron las causas del renacimiento de la Relatividad General? Una de las razones más importantes fueron los espectaculares avances en el campo de la astronomía, que comenzaron en 1954 cuando Cygnus A, la segunda fuente más brillante en radio del cielo, fue identificada con una galaxia lejana. Le siguieron las fuentes X en 1962, los quasars<sup>5</sup> en 1963, la radiación de fondo de microondas<sup>6</sup> en 1965 y los pulsares<sup>7</sup> en 1967. En 1964 se descubre la fuente Cygnus X-1, que hoy sabemos es un agujero negro<sup>8</sup> estelar que pertenece a la Vía Láctea. La Relatividad General ya había predicho la existencia de varios de estos objetos, décadas antes que fueran descubiertos.

Parte de la riqueza de la Relatividad General yace en que es el propio universo el laboratorio que permite explorarla. A casi 50 años del descubrimiento del primer agujero negro, a casi 100 años del nacimiento de la Relatividad General, todavía somos como niños que vamos a tientas en la oscuridad del universo, cuyos vastos corredores, como la Biblioteca, no tienen fin.

---

<sup>5</sup> Los quasars son las fuentes de radiación más brillantes del universo. Se piensa que albergan un agujero negro supermasivo.

<sup>6</sup> La radiación de fondo de microondas es radiación térmica que llena todo el universo. Se piensa es la radiación que escapó en los orígenes del universo, cuando la temperatura del universo bajó y los electrones fueron capturados por los núcleos.

<sup>7</sup> Los pulsares son estrellas de neutrones con campos magnéticos muy intensos.

<sup>8</sup> Los agujeros negros son regiones del espacio-tiempo desconectadas causalmente del resto del universo.

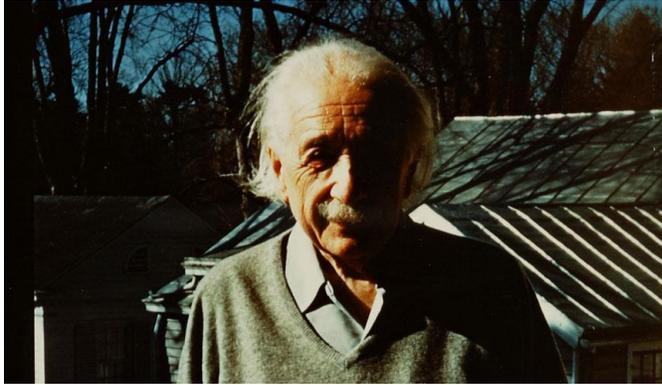


Figura 15. Esta foto, una de las pocas a color de Einstein, fue tomada en la puerta de su casa en Princeton, en febrero de 1954.



Figura 16. Último pizarrón de Einstein. La foto fue tomada el 18 de abril de 1955, el día que murió Einstein, en su oficina en Princeton.

## Referencias

- Frolov, V. P., Zelnikov, A. (2011). Introduction to Black Hole Physics. Oxford: Oxford University Press.
- Luminet, J. P. (2010). Black Holes. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pais, A. (2010). Subtle is the lord. The science and the life of Albert Einstein. Oxford: Oxford University Press.
- Romero, G. E. (2010). Es posible viajar en el tiempo? Buenos Aires: Editorial Kaicron.

