

# Orígenes de la Relatividad Especial

## El fin de una era

En la última entrevista dada por Albert Einstein, dos semanas antes de su muerte, recordó a los científicos que admiraba: Newton, Lorentz, Planck y Mach; junto con Maxwell, eran los únicos que Einstein consideraba como sus precursores.

James Clerk Maxwell nació en 1831 en Edimburgo, Escocia; estudió física y matemática en la Universidad de Edimburgo y Cambridge. Sus intereses eran diversos: la óptica, la naturaleza de los anillos de Saturno, hasta la poesía británica. Maxwell, sin embargo, se abocó especialmente al estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos.

A finales del siglo XIX se pensaba que las fuerzas de la naturaleza eran de tres tipos: gravitacional, eléctrica y magnética. La electricidad se caracteriza por la existencia de dos tipos de carga eléctrica, una positiva y otra negativa. Cargas del mismo signo se repelen y cargas de signo opuesto se atraen con una intensidad que varía con la distancia de la misma forma que la fuerza gravitacional.

La unidad fundamental de la electricidad es el electrón, descubierto experimentalmente hace poco más de un siglo, en 1898 por J. J. Thomson; esta partícula elemental es un constituyente básico del átomo y posee una carga eléctrica indivisible. Las cargas eléctricas pueden estar en reposo o en movimiento. Por ejemplo en un conductor metálico hay electrones libres y es el movimiento de estas cargas bajo la influencia de un campo eléctrico lo que produce las corrientes eléctricas. Magnetos como el hierro, níquel, cobalto, entre otros, son fuentes del campo magnético. Imanes con polos opuestos se atraen y se repelen si tienen polos iguales.



**Figura 1.** James Clerk Maxwell

La similitud entre la fuerza magnética y eléctrica ya había sido advertida por los griegos en la antigüedad. A principios del siglo XIX, Hans Christian Ørsted demostró que cargas eléctricas en movimiento generan un campo magnético. Otros experimentos conducidos por André-Marie Ampère, Michael Faraday, en el transcurso del mismo siglo, confirmaban la íntima relación entre estos dos campos.

En el año 1865, Maxwell fue el responsable de la unificación de estas dos fuerzas en lo que se llamó *electromagnetismo*. Las ecuaciones de Maxwell son la representación matemática de las propiedades físicas del campo electromagnético. Las manifestaciones del mismo, que anteriormente parecían desvinculadas, podían ser explicadas ahora en términos de una única teoría. Maxwell además predijo que la oscilación periódica de cargas eléctricas en movimiento produciría *ondas electromagnéticas* que se propagarían a la velocidad de la luz. Esto último fue comprobado por Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) 20 años después. Hertz fue el primero en detectar y generar ondas electromagnéticas en laboratorio. Este singular evento marcó el inicio de la era de las telecomunicaciones.

Al igual que sus contemporáneos, Maxwell pensaba que dado que las ondas electromagnéticas se propagan, deberían hacerlo en un medio, denominado *éter*; éste se caracterizaba por llenar todo el espacio, estar en reposo absoluto respecto a las estrellas fijas y por ser transparente al movimiento de la Tierra. Uno de los desafíos científicos más importantes en aquellos años era la demostración experimental de la existencia del mismo. En su artículo *Ether*, escrito para la novena edición de la *Enciclopedia Britannica* Maxwell explica entre otras cosas, sus infructuosos esfuerzos al tratar de detectar la influencia del arrastre del éter en el movimiento de la Tierra; concluye que estos efectos al ser muy pequeños en nuestro planeta son indetectables y que acaso mediante algún tipo de observación astronómica podría llegar a demostrarse la existencia de esta sustancia. En particular, sugiere el cálculo de la velocidad de la luz a partir de la observación de los eclipses de las lunas de Júpiter.

El 19 de marzo de 1879 Maxwell envía una carta de agradecimiento a David Peck Todd, Director del Nautical Almanac Office en Washington, por el envío de datos del Sistema Joviano. En ella se refiere a su artículo de la enciclopedia y remarca la imposibilidad de la detección del éter en experimentos que involucren a la Tierra. Esta carta fue escrita por Maxwell cuando le quedaban ocho meses de vida y Einstein sólo tenía cinco días. Luego de la muerte de Maxwell la carta fue reenviada a la secretaria de la Royal Society y posteriormente publicada en la revista *Nature*.

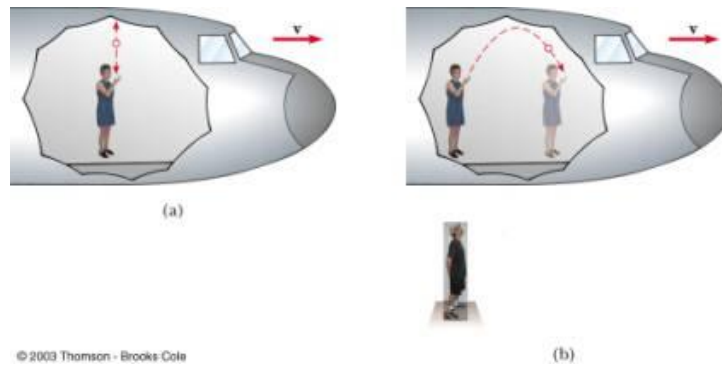
Un año y medio después, en agosto de 1881, apareció un artículo en la revista *American Journal of Science* cuyo autor era Albert Abraham Michelson. Nacido en

Prusia (hoy Polonia) en 1852, Michelson vivió muy poco en su país natal: a los tres años de edad con sus padres emigró a Estados Unidos. A los 17 años ingresó en la Academia Naval de dicho país donde se destacaría más en ciencia que en la labor marítima. Su interés en el estudio de la determinación de la velocidad de la luz se remonta a su época de oficial. En 1879 deja su cargo de instructor científico en la Academia y mientras realizaba sus estudios en el laboratorio de Helmholtz en Berlín, lee por primera vez la carta de Maxwell de 1879. Siendo Michelson un conocido experto en las mediciones de la velocidad de la luz, comprende que Maxwell desconocía el alto grado de precisión con que podían hacerse dichos experimentos. En Berlín diseña el interferómetro; el experimento, sin embargo, fue realizado en el observatorio astrofísico cercano a Potsdam para evitar cualquier tipo de vibración urbana que pudiese afectar el resultado. En su artículo de agosto de 1881 Michelson concluye que no observó ninguna evidencia del 'viento de éter'.

Pocos científicos prestaron atención su trabajo. Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), sin embargo, encontró errores en el experimento y dudaba de la interpretación de los resultados. El experimento volvió a repetirse esta vez en colaboración con Edward Williams Morley en la Case School of Applied Science en Cleveland. Los resultados nuevamente demostraron que los efectos del éter sobre la velocidad de la luz eran nulos y la comunidad científica aceptó la validez de los mismos. En otras palabras, el experimento de Michelson-Morley evidenció la inconsistencia de la teoría dinámica de la luz vigente en el siglo XIX.

La teoría de campo electromagnético desarrollada por Maxwell fue ampliamente aceptada por sus contemporáneos. Ésta, sin embargo, no era invariante bajo las transformaciones de coordenadas introducidas por Galileo, lo cual era un gran problema para los científicos de aquellos años.

El concepto de transformación de coordenadas se refiere a cómo cambian las diferentes cantidades físicas medidas por observadores en movimiento relativo. Por ejemplo, si hay dos personas sentadas en un avión, la velocidad de una respecto a la otra, en el sistema de referencia fijo al avión, es cero. La velocidad, sin embargo, de cualquiera de ellas respecto a otra persona sentada en el jardín de su casa que observa el vuelo de la nave, es igual a la velocidad del avión tal como es registrada por el piloto en la cabina. Galileo introdujo una regla de adición simple que permite transformar las velocidades de un sistema de referencia a otro.



**Figura 2.** a) El pasajero del avión lanza hacia arriba una pelota; en su sistema de referencia la trayectoria de la pelota es vertical. b) Para un observador en Tierra, la nave se mueve a una velocidad  $v$  y debido al movimiento de ésta, la trayectoria de la pelota es parabólica.

Las transformaciones de Galileo se derivan del principio de *relatividad*: la representación de los fenómenos físicos es independiente de la posición y movimiento de los observadores; en otras palabras, la forma de las leyes que rigen el mundo físico no dependen del sistema de coordenadas usado para describirlo (una mera invención humana). La mecánica desarrollada por Newton es perfectamente compatible con las transformaciones de Galileo, pero no así la teoría electrodinámica de Maxwell: las leyes del electromagnetismo no son invariantes, esto es cambian de forma, al ser sometidas a una transformación de Galileo. Otro grupo de transformaciones, sin embargo, de carácter completamente diferente al de Galileo dejaban invariantes las ecuaciones de Maxwell, las hoy conocidas como ‘transformaciones de Lorentz’.

Albert Einstein sentía una profunda admiración por Lorentz y decía no haber conocido a otro hombre con una personalidad tan armoniosa. Lorentz fue un físico matemático neerlandés que junto con George Francis FitzGerald (1851-1901) formuló la llamada contracción FitzGerald-Lorentz. En un trabajo publicado en 1889 en el American Journal of Science titulado ‘The Ether and the Earth’s Atmosphere’ FitzGerald explica de forma cualitativa que “... la longitud de los cuerpos materiales cambia al moverse a través del éter...”. Como se explicará más adelante, esta formulación es pre-relativista ya que se sigue suponiendo la existencia del éter y los cambios de longitudes se consideran, en palabras de Einstein, objetivamente reales; es un cambio absoluto, no un cambio relativo respecto a un observador en reposo. Lorentz por su parte, inventó las transformaciones que llevan su nombre; éstas no sólo dejan invariantes las ecuaciones de Maxwell sino que reducen la contracción de FitzGerald-Lorentz a una consecuencia de las transformaciones de Lorentz.

Jules Henri Poincarè (1854-1912) fue indiscutiblemente uno de los precursores de Einstein. Éste último, sin embargo, jamás lo citó en sus trabajos. De la misma

forma Poincarè sólo se refirió a Einstein en dos ocasiones. La primera en relación a la relatividad cuando las autoridades del Instituto Federal de Tecnología (ETH) de Zürich, le pidieron su opinión sobre Einstein, a quien pensaban ofrecerle un cargo de profesor. La segunda y última fue en relación al efecto fotoeléctrico. Tres meses después murió de forma inesperada a los 58 años de embolia. Einstein, dos meses antes de morir, dio su última opinión acerca de Poincarè: “Lorentz ya había reconocido que las transformaciones que llevan su nombre son esenciales para el análisis de las ecuaciones de Maxwell, y Poincarè profundizó este conocimiento aún más...”

Sólo un año antes de la aparición de la Teoría Especial de la Relatividad, en el International Congress of Arts and Science en St. Louis, Poincarè cuestiona la existencia del éter, objeta el concepto de velocidad absoluta y simultaneidad e intuye que acaso una nueva dinámica debe construirse donde la velocidad de la luz es el límite máximo para la velocidad de los cuerpos. Poincarè fue un visionario y el último “universalista” (después de Gauss) capaz de entender y contribuir en todos los ámbitos de la disciplina matemática.



**Figura 3.** Einstein y Lorentz fotografiados por Ehrenfest en la puerta de su casa en Leiden en 1921.

Los aportes de Lorentz y Poincarè en electrodinámica fueron esenciales para la posterior formulación de la Relatividad Especial. ¿Por qué entonces no fueron capaces de generar de dicha teoría? Acaso, como expresó el filósofo Henri Bergson a Einstein<sup>1</sup>: ‘Veo (en su trabajo) no sólo una nueva física, sino también, en ciertos aspectos, una nueva manera de pensar’.

---

<sup>1</sup> Palabras pronunciadas el 6 de abril de 1922 en la Société Française de Philosophie, durante una reunión para discutir sobre la Relatividad Especial y General.

## 1905

En sus días de estudiante en el ETH, Einstein no se caracterizó por atender regularmente a clases; prefería estudiar aquellos temas de la física que pensaba eran relevantes. Por ejemplo, nunca se interesó por el curso Introducción a la Física Teórica dictado por uno de sus profesores, Weber, ya que lo creía un típico representante de la física clásica que simplemente ignoraba todo después de Helmholtz<sup>2</sup>. No todos sus profesores pertenecían a la categoría de Weber: en varias ocasiones Einstein destacó como excelentes profesores de matemática a Adolf Hurwitz y Hermann Minkowski. Este último no guardaría un buen recuerdo de Einstein como alumno.



**Figura 4.** Einstein junto a sus compañeros de clase en el ETH.

Einstein disfrutó las libertades que tenía en su época de estudiante; hacía lo que quería hasta unos meses antes del ‘detestable’ período de exámenes; Marcel Grossmann, uno de sus grandes amigos, para ayudarlo le prestaba sus notas de los cursos ‘bien escritas y meticulosamente organizadas’. En agosto de 1900, Einstein se graduó de Fachlehrer<sup>3</sup> junto a otros tres estudiantes, quienes inmediatamente obtuvieron una posición como asistentes en el ETH. Él, sin embargo, estaba sin

---

<sup>2</sup> Hermann Ludwing Ferdinand von Helmholtz (1821-1894): fue un médico y físico alemán, conocido por sus trabajos en termodinámica y electrodinámica.

<sup>3</sup> Fachlehrer es un maestro especializado en una dada asignatura para la enseñanza en colegios secundarios. En el caso de Einstein, las asignaturas eran matemática y física.

trabajo. Weber le había prometido un puesto académico y luego se desentendió del asunto, episodio que Einstein nunca terminó de perdonarle.

Dos años transcurrieron antes de su primer trabajo estable que fue como técnico de tercera clase en la oficina de patentes en Berna. Es notable que aunque Einstein estaba completamente apartado del ámbito académico, nunca dejó de pensar y trabajar en ciencia. En 1903 y 1904 publicó trabajos sobre los fundamentos de la mecánica estadística. Al año siguiente, en marzo, sobre la explicación del efecto-fotoeléctrico (por el que recibiría el premio Nobel de física de 1923). El 30 de abril completa su tesis doctoral sobre ‘Una nueva determinación de las dimensiones moleculares’. Este trabajo es el más citado de la historia debido a que los resultados obtenidos tienen un rango muy amplio de aplicaciones: desde la industria de la construcción (el movimiento de las partículas de arena en las mezclas), la industria lechera (el movimiento de las micelas de caseína en la leche de vaca) hasta ecología (el movimiento de las partículas de aerosol en las nubes), por mencionar algunos ejemplos. El 11 de mayo envía para su publicación un artículo con la explicación del movimiento browniano (pequeños movimientos de partículas en suspensión de líquidos), donde demuestra la existencia de los átomos.

La Relatividad Especial nació luego de diez años de continua investigación y reflexión. Einstein, sin embargo, vislumbró las ecuaciones fundamentales de la teoría en poco menos de seis semanas.

Según relató Einstein, en aquel tiempo estaba seguro que las Ecuaciones de Maxwell eran correctas y debido a la llamada invariancia de la velocidad de la luz dichas ecuaciones tendrían que tener la misma forma en un sistema de referencia en movimiento uniforme. La invariancia de la velocidad de la luz, sin embargo, entraba en conflicto con la regla de adición de velocidades de la mecánica, esto es, las transformaciones de Galileo. Durante más de un año estuvo pensando en el problema.

Einstein cuenta en la conferencia de Kioto<sup>4</sup>: “Inesperadamente un amigo mío en Berna me ayudó. Ese fue un día muy hermoso cuando lo visité y comencé a hablarle de esta manera: ‘Tengo una pregunta que me es muy difícil de entender. He venido aquí hoy para librar una batalla con ella’. Luego de mucha discusión, comprendí repentinamente el asunto. Al día siguiente lo volví a visitar y le dije sin saludarlo: ‘Gracias. He resuelto completamente el problema’”.

Su amigo en Berna era Michele Besso, a quien conocía desde sus días de estudiante en Zürich y era además colega en la oficina de patentes desde 1904. Sólo a él le dedicó su trabajo titulado “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en

---

<sup>4</sup> Conferencia dictada en la Universidad de Kioto el 14 de diciembre de 1922.

movimiento”, recibido por la revista *Annalen der Physik* el 30 de junio de 1905. Este artículo fue la presentación original de la Teoría Especial de la Relatividad.

## La nueva cinemática

“Mi solución era realmente del concepto del tiempo, esto es, que el tiempo no está absolutamente definido sino que hay una conexión inseparable entre el tiempo y la velocidad de la señal. Con estas concepciones, la extraordinaria dificultad anterior pudo ser resuelta. Cinco semanas después que reconocí esto, la presente teoría de la relatividad especial estaba completa”. Con estas palabras Albert Einstein explicaba en la conferencia de Kioto que la nueva teoría surgió esencialmente del abandono de la mecánica clásica en la descripción de los fenómenos electromagnéticos.

Einstein, como ya hemos mencionado, creía en la ‘verdad de las ecuaciones de Maxwell’. Éstas, sin embargo, no eran invariantes bajo las transformaciones de Galileo, esto es, cambiaban de forma respecto a diferentes sistemas de referencia. El gran paso que dio Einstein para resolver el problema fue mantener la electrodinámica de Maxwell y modificar la mecánica de Newton para que satisfaga la invariancia bajo transformaciones de Lorentz. La nueva teoría fue relativista, ya que contrariamente a la teoría absoluta de Newton, ciertos parámetros como la masa del cuerpo, pasaban a depender de la velocidad del cuerpo relativa a un cierto sistema de coordenadas. El concepto mismo de simultaneidad de dos eventos se vuelve relativo al sistema de referencia utilizado para describir los eventos. La Teoría Especial de la Relatividad implicó una nueva forma de pensar en física, ya que los conceptos más esenciales en nuestra descripción del mundo, tales como el espacio y el tiempo perdían su carácter ‘absoluto’.

El núcleo de la formulación de la nueva teoría está contenido en dos postulados. Los dos postulados de la teoría son:



**Figura 5.** Einstein y su amigo Michele Besso.



1. El Principio de Relatividad: la formulación de las leyes de la física debe ser invariante bajo transformaciones de coordenadas entre sistemas inerciales.
2. El Principio de Constancia de la Velocidad de la Luz: la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia inerciales.

Un sistema inercial es un cuerpo cuya velocidad es constante respecto a todos los sistemas de la misma clase. Dado que la velocidad relativa entre todos estos sistemas no cambia, están libres de aceleración, y por lo tanto de las llamadas ‘fuerzas no inerciales’; todos los días experimentamos éstas fuerzas: en el ascensor, cuando un automóvil o cualquier otro medio de transporte cambia su velocidad, por mencionar algunos ejemplos. La teoría se llamó ‘especial’ ya que está restringida a sistemas de referencias inerciales.

El aspecto más revolucionario de la teoría fue la desaparición de la simultaneidad absoluta. La duración de un intervalo de tiempo para un observador inercial (en movimiento rectilíneo y uniforme) no tiene porqué coincidir con la duración del mismo intervalo para otro observador. El tiempo se vuelve relativo al sistema de referencia y por lo tanto al estado de movimiento del sistema. ¿Cómo es que siempre hemos observado que la duración de un intervalo de tiempo es la mismo independientemente de la velocidad del observador? La respuesta es que los efectos relativistas comienzan a ser significativos para velocidades mayores a 100000 km/s, esto es para velocidades comparables con la velocidad de la luz.

Estamos aún muy lejos de poder construir vehículos que se muevan a velocidades cercanas a la de la luz: la nave más rápida diseñada en la historia fueron las sondas espaciales Helios, construidas y operadas por la República Federal de Alemania y la NASA entre 1974 y mediados de la década de los ochenta; tenían por misión estudiar el Sol y el medio interestelar contenido dentro de la órbita de Mercurio. Estas naves alcanzaron velocidades de 252792 km/h o equivalentemente, 70.22 km/s, esto es el 0.000234 de la velocidad de la luz. La mecánica newtoniana, por lo tanto, describe perfectamente aquellos fenómenos físicos que no involucren velocidades relativistas, como es el caso del movimiento de cuerpos en la Tierra, o hasta el momento, vehículos construidos por el hombre.

La desaparición de la simultaneidad absoluta implica que para objetos que se mueven a velocidad muy altas, comparables a la de la luz, el tiempo se dilata respecto a objetos que permanecen en reposo. El tiempo medido por el reloj de un dado observador se llama ‘tiempo propio’ de ese observador. A un lapso de tiempo propio breve, puede corresponder un lapso de tiempo externo largo si el observador se mueve a velocidades comparables a la velocidad de la luz (denotada por el símbolo  $c$ ). La relación entre el tiempo propio  $T$  y el tiempo externo  $t$  se expresa en forma matemática como:

donde  $\gamma$  es el llamado factor de Lorentz, un número mayor a 1, que depende de la velocidad. A medida que la velocidad aumenta, a igual tiempo propio corresponden tiempos externos cada vez mayores.

La verificación del fenómeno de ‘dilatación temporal’ implica la observación y medición de objetos con velocidades cercanas a la de la luz. Como se ha mencionado, se está aún lejos de poder construir vehículos que se muevan a esas velocidades; el universo, sin embargo, es el mejor laboratorio para testear muchas teorías de la física y en particular ha posibilitado verificar el fenómeno de dilatación temporal mediante la observación de partículas sub-atómicas relativistas. La existencia de dichas partículas se conoce desde la década de 1910 cuando en una serie de vuelos en globo, Victor Hess (1883-1964) descubrió que la Tierra se encuentra inmersa en un mar de radiación cósmica. Esta radiación está mayormente formada por partículas llamadas muones creadas por la interacción de rayos cósmicos (partículas muy energéticas provenientes del espacio) con los átomos de la alta atmósfera. En el sistema de referencia propio del muon, sin embargo, sólo viven alrededor de dos microsegundos, tiempo insuficiente para poder estar siquiera a kilómetros de nuestras cabezas. La razón de que muones lleguen a la superficie del planeta es la dilatación del tiempo predicha por la relatividad especial: el tiempo de vida de los muones aumenta cuando es medido desde un sistema de referencia terrestre.



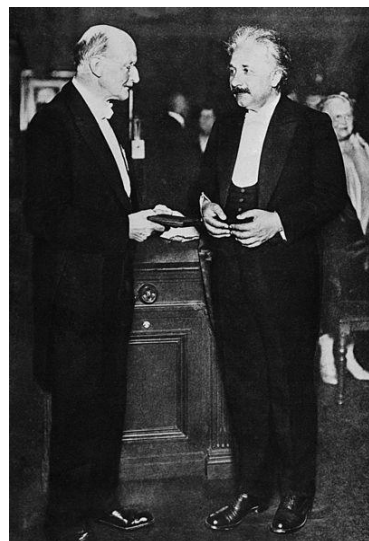
**gura 6.** Sonda Helios A en la cima del cohete Titan IIIE Centauro. Cortesía NASA.

## Einstein y la relatividad especial después de 1905

Luego de la publicación de sus trabajos en Relatividad Especial, Einstein estaba decepcionado: según cuenta su hermana Maja, éste pensaba que inmediatamente aparecerían en el *Annalen der Physik* duras críticas y gran oposición a sus revolucionarias ideas. En las ediciones posteriores de la revista, sin embargo, no había mención alguna a sus trabajos. Einstein, al poco tiempo, recibe una carta enviada por un profesor en Berlín, donde se pedía aclaración sobre algunos puntos de la teoría. El joven científico comprende que su trabajo no había pasado desapercibido, más aún porque el Profesor Max Planck, el científico más importante de la época, era quien le había escrito; el interés de Planck por la Relatividad Especial hizo que ésta comenzará a hacerse conocida y fuese un tópicos de discusión en el ambiente científico.

A partir de 1906, Einstein dejó de ser un total desconocido que trabajaba en sus momentos libres en diversos problemas de la física: varios científicos viajaron a Berna para discutir con él sobre la teoría. Von Laue, asistente de Planck, fue uno de los primeros y aseguró haber quedado completamente sorprendido al ver que aquel joven era el padre de la Relatividad Especial (Einstein tenía en aquel momento 27 años).

Varios científicos hicieron importantes aportes a la teoría luego de su publicación. Hermann Minkowski (1864-1909) fue quien introdujo los conceptos de espacio-tiempo, cono de luz, línea de mundo, además de formular la teoría en lenguaje tensorial. Las primeras reacciones de Einstein frente a este nuevo formalismo matemático fueron de completo rechazo: llegó a calificar el trabajo de Minkowski como “erudición superflua”. Más tarde su opinión cambiaría drásticamente: en 1912 adoptó el método tensorial y en 1916 reconoció que gracias a Minkowski, fue mucho más fácil la transición de la Relatividad Especial a la Relatividad General



**Figura 7.** Max Planck y Albert Einstein, 1928.

En 1907, mientras escribía un artículo acerca de las consecuencias de la Relatividad Especial, Einstein comprendió que todos los fenómenos podían ser descriptos en términos de la Relatividad Especial, excepto para aquellos sistemas que estuviesen acelerados. Pensaba en particular en sistemas inmersos en un campo gravitatorio. Dado que todos los cuerpos,

independientemente de su naturaleza, se aceleran de la misma forma, el estado de movimiento entre observadores en caída libre sería el de reposo. El postulado del Principio de Relatividad, entonces, tendría que extenderse a sistemas que, entre ellos, estén en movimiento no uniforme.

Einstein vislumbró las limitaciones de su teoría. El camino hacia la Relatividad General había comenzado.

## **Referencias**

- Luminet, J. P. (2010). Black Holes. 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.