



Einstein y la teoría de la relatividad.

Del Universo estático al universo en expansión

Luis E. Otero Carvajal

Einstein no quedó completamente satisfecho con la Teoría Especial de la Relatividad², que publicó en 1905, al no poder ser aplicada a los sistemas de referencia en movimiento acelerado, como los afectados por un campo gravitatorio. Einstein dedicó los siguientes diez años a desarrollar un *programa de investigación científica* cuyo fin último consistió en generalizar el *principio de la relatividad*, de manera que éste no fuera aplicable exclusivamente a los sistemas de referencia en movimiento constante. *"Que la teoría especial de la relatividad es sólo el primer paso de una evolución necesaria no se me hizo completamente claro hasta que intenté representar la gravitación en el marco de esta teoría... La posibilidad de realizar este programa era, sin embargo, dudosa desde el principio"*³.

Einstein fue aún más explícito en el artículo *"Notas sobre el origen de la teoría de la relatividad general"*, publicado en 1934: *"En el año 1905 había llegado yo, gracias a la teoría de la relatividad restringida, a la equivalencia de todos los llamados sistemas inerciales para la formulación de las leyes de la naturaleza. En esos momentos surgió de un modo natural el problema de si no existiría una*

* Texto basado en OTERO CARVAJAL, L. E.: *La crisis de la Modernidad. La quiebra de la representación determinista*, capítulos IV, tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1988.

² OTERO CARVAJAL: "Einstein y la teoría especial de la relatividad. La abolición del espacio y el tiempo absolutos", en http://umbral.uprrp.edu/seminario/verponencias.php?sem_id=20. OTERO CARVAJAL, L. E.: "Einstein y la revolución científica del siglo XX", en *Cuadernos de Historia Contemporánea*, nº 27, Universidad Complutense, Madrid, 2005, pp. 135-177. OTERO CARVAJAL, L. E.: "Eppur se muove, verdad y conocimiento. De Galileo a Stephen Hawking", en http://umbral.uprrp.edu/seminario/verponencias.php?sem_id=51.

³ EINSTEIN, A.: *Notas Autobiográficas*, Madrid, Alianza, 1984, pp. 61-62

*equivalencia adicional para los sistemas de coordenadas. Para expresarlo en otras palabras: si sólo se puede adjudicar un significado relativo al concepto de velocidad, ¿debemos, con todo, seguir considerando la aceleración como un concepto absoluto? Desde el punto de vista puramente cinemático no existe ninguna clase de duda en cuanto al carácter relativo de todos los movimientos; pero hablando desde el punto de vista de la física, el sistema inercial parecía ocupar una posición privilegiada, lo que le daba un aire artificial al uso de coordenadas en movimiento.*⁴

En 1907 Einstein escribió un artículo titulado *"El principio de la relatividad y sus consecuencias"* para la revista *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*⁵, a lo largo de sus páginas reflexionaba sobre las relaciones entre el principio de relatividad y la gravitación, a las que dedicó la parte V de dicho artículo, bajo el expresivo título *"Principio de relatividad y gravitación"*, en el llegó a la conclusión de la equivalencia entre un campo gravitacional y un sistema de referencia uniformemente acelerado, de esta forma encontró el camino para generalizar la relatividad especial: *"¿Es concebible que el principio de relatividad sea válido también para sistemas acelerados entre sí?... Consideremos dos sistemas en movimiento, Σ_1 , y Σ_2 . Supongamos que Σ_1 , está acelerado en la dirección de su eje x , y que γ es el valor (constante en el tiempo) de esta aceleración. Supongamos que Σ_2 está en reposo, pero situado en un campo gravitacional homogéneo, que imparte una aceleración $-\gamma$ en la dirección del eje x a todos los objetos. Por lo que sabemos, las leyes físicas con respecto a Σ_1 no difieren de aquellas con respecto a Σ_2 ; esto proviene del hecho de que todos los cuerpos son acelerados de la misma forma en un campo gravitacional. Por consiguiente, sobre la base de nuestra experiencia actual, no tenemos ninguna razón para suponer que los sistemas Σ_1 y Σ_2 puedan ser distinguidos entre sí de alguna manera, y por tanto supondremos que existe una equivalencia física completa entre el campo gravitacional y la correspondiente aceleración del sistema de referencia. Esta suposición extiende el principio de relatividad al caso de un movimiento de traslación uniformemente acelerado del sistema de referencia. El valor heurístico de esta suposición se encuentra en que hace posible la sustitución de un campo gravitacional homogéneo por un sistema de referencia uniformemente acelerado, siendo este último caso susceptible de tratamiento teórico hasta cierto grado.*⁶

⁴ EINSTEIN, A.: "Notas sobre el origen de la teoría de la relatividad general", *Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido Verlag, 1934, reproducido en EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad*, Sarpe, Madrid, 1983, ed. cedida por Antoni Bosch editor, p. 94-95.

⁵ EINSTEIN, A.: "Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen", *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, nº 4, 1907, p. 411-462, existe traducción al inglés en SCHWARTZ, H. M. *American Journal Physics* 45, 1977, pp. 512-517, 811-817 y 899-902.

⁶ SCHWARTZ, H. M., *art. cit.*, pp. 899-902.

La importancia de este enfoque se comprende de inmediato, al interpretar físicamente la igualdad entre *masa inercial* y *masa pesante*, *"Entonces caí en la cuenta: el hecho de la igualdad entre masa inercial y pesante, o si se quiere, el hecho de que la aceleración gravitatoria es independiente de la naturaleza de la sustancia que cae, puede expresarse así: en un campo gravitacional (de extensión espacial reducida) las cosas se comportan igual que en un espacio libre de gravitación, siempre y cuando se introduzca en éste, en lugar de un "sistema inercial", un sistema de referencia acelerado con respecto a aquél."*⁷

La relación existente entre *masa inercial* y *masa gravitatoria* era conocida por la física clásica, sin embargo esta relación no había pasado de su mera formulación, no había sido interpretada: *"La antigua mecánica registró este importante principio [igualdad entre masa gravitatoria y masa inercial], pero no lo interpretó. Una interpretación satisfactoria no puede surgir sino reconociendo que la misma cualidad del cuerpo se manifiesta como "inercia" o como "gravedad", según las circunstancias."*⁸ Como ha señalado José Manuel Sánchez Ron: *"Lo que Einstein observó es que... al menos en un campo gravitacional homogéneo y para fenómenos mecánicos, no podemos distinguir entre un sistema de referencia que -en ausencia de cualquier tipo de campo- se mueve con una aceleración y otro en reposo pero dentro de la zona de influencia de un campo gravitacional de magnitud. He dicho fenómenos mecánicos y, en efecto, esto es lo que se desprende de la mecánica newtoniana, pero Einstein fue -ya en 1907- más allá y supuso que no sólo las leyes mecánicas sino todas las leyes de la física debían ser las mismas en los dos sistemas de referencia. En realidad lo que de esta manera estaba formulando -todavía de una forma primitiva puesto que sólo se aplicaba a campos gravitacionales homogéneos- era lo que él mismo denominó principio de equivalencia"*⁹.

La física prerrelativista sostenía que la fuerza para modificar el movimiento de un cuerpo depende de la masa de éste, excepto en un caso en el que dicha ley no se cumplía: el caso de la caída libre de los cuerpos dentro de un campo gravitatorio. Esta excepción fue explicada por Newton mediante su ley de gravitación, según la cual: todo cuerpo material atrae a otro con una fuerza directamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. De esta forma Newton indicaba que la fuerza de gravitación es siempre suficiente para vencer la inercia de un cuerpo, solventando el interrogante de por qué cuerpos de distinta masa son atraídos, caen, a la misma velocidad. *"Logré avanzar un paso hacia la solución cuando traté de trabajar con la ley de la gravedad dentro del esquema fundamental de la teoría de la relatividad restringida. Como la mayoría de escritores de aquel tiempo, intenté enunciar una ley de campo para la*

⁷ EINSTEIN, A.: *Notas Autobiográficas*, pp. 62-63.

⁸ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Madrid, Alianza, 1984, p. 60.

⁹ SÁNCHEZ RON, J. M.: *El origen y desarrollo de la relatividad*, Madrid, Alianza, 1985, p. 129.

*gravitación, en vista de que no resultaba posible -al menos de manera natural- introducir la acción directa a distancia a causa de la abolición del concepto de simultaneidad absoluta... De acuerdo con la mecánica clásica, la aceleración vertical de un cuerpo en un campo gravitatorio vertical es independiente de la componente horizontal de su velocidad. En tal campo gravitatorio, pues, la aceleración vertical de un sistema mecánico o de su centro de gravedad opera en forma diferente de su energía cinética interna. Pero en la teoría que yo he presentado, la aceleración de un cuerpo que cae no es independiente de su velocidad horizontal o energía interna del sistema. Esto no encajaba con el antiguo hecho experimental que demuestra que todos los cuerpos sometidos a un mismo campo gravitatorio adquieren la misma aceleración. Esta ley, que también puede formularse como la ley de la igualdad de las masas inerte y pesante, adquirió entonces para mí su plena significación. Mi asombro ante la existencia de esta ley era máximo y conjeturaba yo que en ella debía estar encerrada la clave para una profunda y total comprensión de la gravitación y la inercia. No experimenté por entonces serias dudas acerca de su estricta validez, incluso sin saber de los resultados del admirable experimento de Eötvös que -si mi memoria no me falla- sólo llegaría a conocer más tarde.*¹⁰

De esta forma, al interpretar la igualdad entre masa inercial y masa gravitatoria Einstein apuntó ya en 1907 la explicación de los efectos de la gravitación y de la inercia a través de un sólo concepto, el de campo gravitatorio. *"Abandoné, pues, considerándolo inadecuado, el intento de tratar el problema de la gravitación dentro de la estructura de la relatividad restringida. Era claro que fallaba en cuanto a la propiedad fundamental de la gravitación. El principio de igualdad de las masas inerte y pesante podían formularse tal como sigue: en un campo gravitatorio homogéneo todos los movimientos referidos a un sistema de coordenadas uniformemente acelerado son equivalentes a los movimientos que se efectúan en ausencia de campo gravitatorio. Si este principio era adecuado para todos los fenómenos posibles (el "principio de equivalencia"), eso constituía un indicio de que el principio de relatividad debía ser extendido a los sistemas coordenados con aceleración variable entre sí, para llegar a una teoría natural de los campos gravitatorios. Estas reflexiones me mantuvieron ocupado desde 1908 hasta 1911 e intenté derivar de ellas ciertas conclusiones especiales... De momento, lo importante era haber descubierto que una teoría de la gravitación razonable sólo podría conseguirse a través de una extensión del principio de la relatividad.*¹¹

Einstein consiguió de esta forma integrar los resultados de la Teoría Especial de la Relatividad en un sistema de referencia de movimiento uniformemente

¹⁰ EINSTEIN, A.: "Notas sobre el origen de la teoría de la relatividad general", *op. Cit.*, pp. 95-96.

¹¹ EINSTEIN, A.: "Notas sobre el origen de la teoría de la relatividad general", *op. Cit.*, p. 96.

acelerado, lo que era equivalente a la aplicación de las ecuaciones relativistas a un campo gravitatorio homogéneo, llegando a la conclusión de que debía producirse una aceleración en la frecuencia de relojes situados en un campo gravitacional intenso respecto de la frecuencia de relojes situados en campos gravitacionales débiles. *"Es en este sentido que podemos decir que el proceso que tiene lugar dentro del reloj -y de forma general todo proceso físico- ocurre con una frecuencia tanto más rápida cuanto más grande sea el potencial gravitatorio del lugar donde se desarrolla."*¹²

En la sección XX *"influencia de la gravitación en procesos electromagnéticos"*, Einstein presentó, por vez primera, una de las principales conclusiones de lo que posteriormente sería la Teoría General de la Relatividad: la influencia del campo gravitatorio sobre la velocidad de la luz. A primera vista parecía un resultado contradictorio con la Teoría Especial de la Relatividad, pues la velocidad de la luz no sería, entonces, constante cuando la luz se encontrase afectada por un campo gravitacional.

Sin embargo, el nacimiento de la Teoría General de la Relatividad se demoró ocho años desde la aparición del artículo de 1907, varias fueron las razones entre las que habría que citar sus ocupaciones académicas, su traslado a Praga, su interés por otros problemas de la física de aquellos años; pero, sobre todo, las dificultades de orden teórico que entrañaba el programa de investigación científica en el que se había embarcado y que, finalmente, le condujo a la Teoría General en 1915.

En 1911, cuando ya ocupaba su primera cátedra en la Universidad de Praga, publicó el artículo *"Sobre la influencia de la gravitación en la propagación de la luz"*¹³, en su introducción exponía su visión de los problemas planteados en 1907: *"En una memoria publicada hace cuatro años traté de contestar a la pregunta de si la propagación de la luz se ve influenciada por la gravitación. Vuelvo a este tema porque mi presentación anterior de esta cuestión no me satisface, y por una razón más poderosa, porque me doy cuenta ahora de que una de las más importantes consecuencias de mi tratamiento anterior se puede poner a prueba experimentalmente. En efecto, se sigue de la teoría que presento aquí, que los rayos de luz que pasan cerca del Sol son desviados por el campo gravitacional de éste, de forma que la distancia angular entre el Sol y una estrella fija que aparezca cerca de él se ve aumentada aparentemente en cerca*

¹² EINSTEIN, A.: "El principio de relatividad y sus consecuencias", sección XIX, ver SCHWARTZ, H. M., *art. cit.*, p. 900.

¹³ EINSTEIN, A.: "Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung der Lichtes", aparecido en *Annalen der Physik*, 35, 1911, pp. 898-908.

de un segundo de arco."¹⁴ El artículo finalizaba con las siguientes palabras: *"Sería urgente hacer votos por que los astrónomos se ocupen de la cuestión aquí promovida, aun si los razonamientos que preceden pueden parecer insuficientemente fundados, incluso temerarios. Al margen de toda teoría, se debe en efecto demandar si los medios actuales permiten constatar una influencia del campo gravitatorio sobre la propagación de la luz."*¹⁵

Como señaló Leopold Infeld, la importancia del artículo de 1911 -y del artículo de 1907- estriba en que nos indican las preocupaciones científicas de Einstein, al poner al descubierto los primeros pasos que habrían de conducir a la Teoría General de la Relatividad. *"Tengo a la vista un trabajo que Einstein escribió en 1911, siendo profesor en Praga. Apareció en Annalen der Physik bajo el título de "La influencia de la gravitación sobre la propagación de la luz". Se trata de un artículo interesantísimo, porque, más que ningún otro, revela la senda de las meditaciones de Einstein. En parte es erróneo: contiene verdades a medias, conjeturas, un dramático vislumbre de que la verdad real no se encuentra muy distante, pero que, con todo, es muy diferente. Muestra el primer centelleo de una luz que irrumpe en la oscuridad"*¹⁶.

La formulación definitiva de la Teoría General se demoró aún varios años hasta que Einstein encontró en la geometría de Riemann el instrumento eficaz para representar el campo gravitatorio dentro del espacio-tiempo relativista. Hasta entonces sus cálculos matemáticos no eran suficientemente exactos. Estos resultados que aparentemente conducían a un callejón sin salida, lejos de desanimar a Einstein le reafirmaron en la necesidad de continuar trabajando hasta conseguir la generalización de la relatividad. *"Pues bien, resultó que en el marco del programa esbozado no era en absoluto posible representar este estado de cosas elemental [se refiere a los resultados alcanzados en su artículo de 1907], o al menos no en forma natural. Lo cual me convenció de que en el marco de la teoría especial de la relatividad no había lugar para una teoría satisfactoria de la gravitación. Entonces caí en la cuenta: el hecho de la igualdad entre masa inercial y masa pesante, o si se quiere, el hecho de que la aceleración gravitatoria es independiente de la naturaleza de la sustancia que cae, puede expresarse así: en un campo gravitacional (de extensión espacial reducida) las cosas se comportan igual que en un espacio libre de gravitación,*

¹⁴ EINSTEIN, A.: "La influencia de la gravitación sobre la propagación de la luz", p. 898, citado en SÁNCHEZ RON, J. M., *op. Cit.*, p. 132.

¹⁵ EINSTEIN, A.: "Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung der Lichtes", *Annalen der Physik*, 35, 1911, p. 908.

¹⁶ INFELD, L.: *Einstein. Su obra y su influencia en nuestro mundo*, Buenos Aires, La Pléyade, 1973, pp. 78-79.

*siempre y cuando se introduzca en éste, en lugar de un "sistema inercial", un sistema de referencia acelerado con respecto a aquél."*¹⁷

Einstein se convenció de la necesidad de generalizar la Teoría Especial. *"El hecho de la igualdad entre masa inercial y pesante nos lleva así de forma enteramente natural a reconocer que el postulado básico de la teoría especial de la relatividad (invariancia de las leyes frente a las transformaciones de Lorentz) es demasiado estrecho, es decir, que hay que postular una invariancia de las leyes también con respecto a transformaciones no lineales de las coordenadas en el continuo cuadridimensional."*¹⁸ Einstein relató las dificultades que retrasaron la aparición de la Teoría General hasta 1915. *"Esto ocurría en 1908. ¿Por qué hicieron falta otros siete años para establecer la teoría general de la relatividad? El motivo principal radica en que no es tan fácil liberarse de la idea de que las coordenadas deben poseer un significado métrico inmediato. La transformación se operó aproximadamente de la siguiente manera. Partimos de un espacio vacío, libre de campo, tal y como -referido a un sistema inercial- se revela, como la más sencilla de todas las situaciones físicas imaginables. Si suponemos ahora que introducimos un sistema no inercial, de suerte que el nuevo sistema esté uniformemente acelerado con respecto al sistema inercial (en una descripción tridimensional) en una dirección (convenientemente definida), entonces existe con respecto a este sistema un campo gravitacional paralelo y estático. El sistema elegido puede ser rígido, de carácter euclídeo en sus propiedades métricas tridimensionales. Pero el tiempo en el cual el campo parece estático no es medido por relojes estacionarios de idéntica constitución. Basta este ejemplo especial para darse cuenta de que el significado métrico inmediato de las coordenadas se echa a perder en cuanto uno permite transformaciones no lineales de las coordenadas. Sin embargo, es obligado hacer esto último si se quiere tener en cuenta la igualdad entre masa pesante e inercial a través del fundamento de la teoría y si se quiere superar la paradoja de Mach relativa a los sistemas inerciales."*¹⁹

El tránsito no fue sencillo. Fue una labor tortuosa. En la que las controversias despertadas a raíz de la publicación de sus artículos de 1907 y 1911, sobre todo con Max Abraham y Gunnar Nordström²⁰, facilitaron a Einstein el camino que le

¹⁷ EINSTEIN, A.: *Notas Autobiográficas*, pp. 62-63.

¹⁸ EINSTEIN, A.: *Notas Autobiográficas*, p. 64.

¹⁹ EINSTEIN, A.: *Notas Autobiográficas*, pp. 64-65.

²⁰ Para una mayor información sobre las teorías de Abraham y Nordström ver: MEHRA, J.: *Einstein, Hilbert and the Theory of Gravitation*, Reidel, Dordrecht, 1974. PYENSON, L.: *The Goettingen Reception of Einstein's General Theory of Relativity*, Ph. D. dissertation, The Johns Hopkins University, 1974. SÁNCHEZ RON, J. M.: *El origen y desarrollo de la...* ZAHAR, E.: "Experimentos cruciales: estudio de un ejemplo", en RADNITAKY, G. y ANDERSON, G. (ed.): *Progreso y racionalidad en la Ciencia*, Madrid, Alianza, 1982, pp. 70-94.

condujo finalmente a la generalización de la relatividad, al intensificar sus esfuerzos por elaborar una teoría relativista del campo gravitatorio.

Max Abraham se destacó en el rechazo de la relatividad especial, seis años después continuaba manteniendo su rechazo a la relatividad, encontrando nuevos argumentos en los artículos de Einstein de 1907 y 1911. En ellos encontró nuevos elementos para descalificar la relatividad, merced a la contradicción entre el principio de constancia de velocidad de la luz (uno de los pilares de la relatividad especial) y la curvatura de los rayos lumínicos por la acción de un campo gravitacional. En un artículo publicado en 1912 en *Annalen der Physik* expresaba su rechazo de la relatividad especial en función de su fracaso por incluir dentro de los presupuestos de la teoría a la gravitación. *"La teoría de la relatividad de Einstein ha ejercido un efecto fascinador - particularmente sobre los físicos matemáticos más jóvenes- que amenaza con detener el saludable desarrollo de la física teórica. Era perfectamente evidente a un observador de mente despejada que dicha teoría no podría nunca conducir a una imagen completa del universo en tanto en cuanto que no sería capaz de incluir a la gravitación -la más importante, por omnipresente, fuerza de la Naturaleza- en su sistema. No es de extrañar, por tanto, que el fracaso de este propósito haya llevado a esta crisis de la teoría de la relatividad."*²¹ Einstein en un artículo publicado en 1912 reconocía los fundamentos de la crítica de Abraham²², pero discrepaba en cuanto a sus consecuencias.

El punto de partida de Gunnar Nordström era radicalmente diferente al mantenido por Abraham, Nordström era un firme partidario de la relatividad y no se mostraba de acuerdo con el abandono del principio de constancia de velocidad de la luz en favor de la inclusión de la gravitación, si ello significaba abandonar la Teoría Especial de la Relatividad, *"el problema al que se dedicó Nordström fue el de construir una teoría de gravitación invariante bajo el grupo de Lorentz y que satisficiera el principio de equivalencia."*²³ En su artículo Nordström indicaba que este punto de vista había sido considerado por el propio Einstein, hasta que se vio obligado a abandonarlo por las dificultades que acarrearía. *"Sin embargo, [Einstein] llegó a la conclusión de que existían consecuencias de tal teoría que no correspondían a la realidad. Con la ayuda de un simple ejemplo demostró que de acuerdo con esta teoría, la aceleración experimentada por un sistema que gira en un campo gravitacional será menor*

²¹ ABRAHAM, M. *Annalen der Physik*, 38, 1912, p. 1056, citado en SÁNCHEZ RON, J. M., *op. cit.*, p. 136.

²² EINSTEIN, A.: "Relativität und Gravitation: Erwiderung auf eine Bemerkung von M. Abraham", *Annalen der Physik*, 38, 1912, pp. 1059-1064, volvió a insistir en su crítica a la teoría de Abraham en un nuevo artículo EINSTEIN, A.: "Bemerkung zu Abraham's Auseinandersetzung: Nochmals Relativität und Gravitation", en *Annalen der Physik*, vol. 39, 1912, p. 704.

²³ SÁNCHEZ RON, J. M.: *op. Cit.*, p. 138, las referencias a la posición de Nordström que a continuación siguen han sido tomadas de la obra citada de J. M. SÁNCHEZ RON.

que la de uno que no gira... esta conclusión demuestra que mi teoría no es consistente con la hipótesis de equivalencia de Einstein. Según ésta, un sistema inercial no acelerado en un campo gravitacional homogéneo es equivalente a un sistema inercial acelerado en un espacio "libre de gravedad"."²⁴ Posteriormente, en 1913, Nordström varió su posición por influencia de Einstein, para que su teoría satisficiera el principio de equivalencia, manteniendo la invariancia de Lorentz.

A pesar de ello, Einstein encontraba serias objeciones al nuevo planteamiento de Nordström, centradas en: la no predicción de la curvatura de los rayos lumínicos bajo la acción de un campo gravitacional; el *retraso* del perihelio de Mercurio frente al *adelanto* que se observaba experimentalmente; y, por último, en 1913 Einstein ya había llegado a la conclusión de que era preciso abandonar el espacio-tiempo plano de Minkowski por una representación espacial de curvatura no nula fundamentada en la geometría de Riemann. En esos momentos Einstein estaba trabajando con Marcel Grossmann en esa dirección, que terminó por desembocar en 1915 en la Teoría General de la Relatividad. *"De momento, lo importante era haber descubierto que una teoría de la gravitación razonable sólo podría conseguirse a través de una extensión del principio de relatividad. Pero con todo esto, era necesario forjar una teoría cuyas ecuaciones conservaran su forma en el caso de transformaciones no lineales de las coordenadas... Pronto llegué a comprender que la inclusión de las transformaciones no lineales -tal como lo exigía el principio de la equivalencia- era inevitablemente fatal para la interpretación física simple de las coordenadas. Ya no podía exigirse que las diferencias de coordenadas reflejaran resultados directos de medición con patrones o relojes ideales. Mi perplejidad ante esto fue muy grande, porque me llevó un tiempo largo llegar a descubrir cual era el significado de las coordenadas en la física. Y no encontré la salida de este dilema hasta 1912"*²⁵.

En 1913 los trabajos de Einstein sobre la gravitación en su intento de generalizar la teoría de la relatividad no eran muy bien comprendidos por los físicos, como el propio Einstein señaló a Michele Besso en una carta de finales de 1913. *"Los físicos han adoptado una actitud algo negativa respecto a mi trabajo sobre la gravitación. Pese a todo, Abraham es el que ha mostrado mayor comprensión. A decir verdad, truena violentamente en la revista Scientia contra todo lo que sea relatividad, pero lo hace con buen sentido. En primavera, iré a ver a Lorentz para discutir con él la cuestión. Se interesa mucho por ella, y también lo hace*

²⁴ NORDSTRÖM, G., artículo publicado en 1912 en *Physikalische Zeitschrift*, 13, pp. 1126-1129, citado en SÁNCHEZ RON, J. M., *op. cit.*, p. 138-139.

²⁵ EINSTEIN, A.: "Notas sobre el origen de la teoría de la relatividad general", *op. Cit.*, pp. 96-97.

Langevin. Laue no es abordable cuando se trata de cuestiones de principio, ni tampoco Planck; todavía menos Sommerfeld²⁶.

El "descubrimiento" de la geometría de Riemann: el camino se despeja.

Fueron tres años en los que Einstein, en colaboración con Marcel Grossmann, matemático experto en geometría diferencial, viejo amigo, compañero de estudios y colega suyo en el Instituto Politécnico de Zurich, avanzó en la comprensión de la geometría de Riemann, que resultó fundamental para el desarrollo de la Teoría General. El problema al que se enfrentaba en 1913 Einstein, era encontrar o desarrollar una geometría que fuese capaz de dar cuenta y representar un espacio-tiempo curvado, pues el espacio-tiempo de Minkowski era geoméricamente plano. *"El primer problema, de orden histórico, con el que uno se enfrenta surge al advertir que en los artículos que Einstein publicó hasta 1912 inclusive (...), no existe ninguna mención sobre la necesidad de un espacio-tiempo no plano y menos aún de la necesidad de un tensor métrico para representar matemáticamente el campo gravitacional. Por el contrario su primer artículo de 1913 [escrito ya en colaboración con Marcel Grossmann] contiene una elaborada argumentación en lo que se refiere a la descripción del campo gravitacional mediante el tensor métrico $g_{\mu\nu}$, junto a la presentación de un compendio de análisis tensorial cuatridimensional sobre una variedad riemanniana, tensor de Riemann, etc. Por supuesto, el problema de encontrar cuáles eran las ecuaciones del campo correctas no fue resuelto en el artículo de 1913, pero una vez en el "camino verdadero" esto era algo secundario que cabría esperar se solucionaría tarde o temprano. Se había logrado lo fundamental: identificar el formalismo matemático adecuado para describir la interacción gravitatoria."*²⁷

Einstein llegó a la formulación definitiva de la Teoría General de la Relatividad a partir del estudio del *problema del disco que gira*, Einstein escribió sobre el trayecto que se vio obligado a recorrer. *"no encontré la salida de este dilema hasta el año 1912 [se refiere al hecho de que la inclusión de las transformaciones no lineales, exigido por el principio de equivalencia, era incompatible con la interpretación física simple de las coordenadas], cuando se me presentó después de las siguientes consideraciones:... En la teoría de la relatividad restringida, como lo ha demostrado Minkowski, esta métrica era casi-euclidiana.. Si se introducen otras coordenadas por medio de una transformación no lineal, ds^2 sigue siendo una función homogénea de las diferenciales de las coordenadas, pero los coeficientes de esta función ($g_{\mu\nu}$) dejan de ser constantes*

²⁶ A. Einstein, carta dirigida a Michele Besso a fines de 1913, reproducida en SPEZIALI, P. (ed.), *Albert Einstein correspondencia con Michele Besso. (1903-1955)*, Barcelona, Tusquets, 1994, pp. 107-108.

²⁷ SÁNCHEZ RON, J. M.: *op. cit.*, pp. 142-143.

y se convierten en funciones de las coordenadas. En términos matemáticos, esto significa que el espacio físico (de cuatro dimensiones) tiene una métrica riemanniana... Los coeficientes ($g_{\mu\nu}$) de esta métrica, al mismo tiempo describen el campo gravitatorio con referencia al sistema de coordenadas elegido. Así, se ha hallado una formulación natural del principio de equivalencia, cuya extensión a cualquier campo gravitatorio constituye una hipótesis perfectamente natural. La solución del dilema al que me he referido antes debía ser, pues, la siguiente: no se adjudica significado físico a las diferenciales de las coordenadas, sino tan sólo a la métrica riemanniana que les corresponde. De este modo se obtiene una base de trabajo adecuada para la teoría de la relatividad general. Sin embargo, aún restaba resolver otros dos problemas. 1. Si una ley de campo se expresa en términos de la teoría de la relatividad restringida, ¿cómo puede ser transferida al caso de una métrica riemanniana? 2. ¿Cuáles son las leyes diferenciales que determinan la propia métrica riemanniana (es decir ($g_{\mu\nu}$))? Me entregué al estudio de estos problemas desde 1912 hasta 1914, junto con mi amigo Marcel Grossmann. Comprendimos que los métodos matemáticos para resolver el problema número 1 ya estaban en nuestras manos: el cálculo diferencial absoluto de Ricci y Levi-Civita. Por lo que se refiere al problema número 2, era obvio que su solución requería la construcción de las ecuaciones diferenciales de segundo orden de las $g_{\mu\nu}$. Pronto vimos que éstas ya habían sido establecidas por Riemann (el tensor de curvatura).²⁸

La colaboración entre Marcel Grossmann y Einstein se tradujo en tres artículos publicados en la revista *Zeitschrift Mathematical und Physik*, en 1913, en los que introdujeron la geometría de Riemann²⁹. En 1914 Einstein estaba convencido de que el camino era el acertado. *"He logrado demostrar, mediante un cálculo sencillo, que las ecuaciones de gravitación son válidas para todo sistema de referencia que satisfaga las condiciones. De ahí resulta que hay transformaciones de aceleración de naturaleza muy variada, que transforman las ecuaciones en sí mismas (también una rotación, por ejemplo), de manera que la hipótesis de equivalencia se conserva bajo su forma más primitiva, incluso en una medida insospechada y muy general. La equivalencia rigurosa entre masa inerte y pesante y también la del campo gravitatorio creo que ya las había demostrado en la época de tu visita. Ahora estoy completamente satisfecho y yo no dudo de la validez de todo el sistema, tenga o no éxito la observación del eclipse solar. La lógica de la cosa es demasiado evidente."³⁰*

²⁸ EINSTEIN, A.: "Notas sobre el origen de la teoría de la relatividad general", *op. Cit.*, pp. 97-98.

²⁹ Para un estudio detallado de estos artículos SÁNCHEZ RON, J. M.: *op. cit.*, pp. 155-162.

³⁰ Einstein carta dirigida a Michele Besso a principios de marzo de 1914, reproducida en SPEZIALI, P. (ed.), *Albert Einstein correspondencia con Michele Besso. (1903-1955)*, 1994, pp. 109-110.

A pesar de ello no dejaron de aparecer dificultades, que provocaron numerosas dudas y errores, hasta que Einstein dio con las ecuaciones de campo correctas. *"Ya habíamos obtenido las ecuaciones de campo para la gravitación dos años antes de la publicación de la teoría de la relatividad general, pero nos era imposible [se refiere a él y a Grossmann] determinar cómo se podrían utilizar en física. Además, mi intuición me decía que su contrastación empírica sería un fracaso. Por otra parte, creí que me sería posible demostrar, sobre la base de consideraciones generales, que una ley de la gravitación invariante con respecto a transformaciones arbitrarias de las coordenadas no era compatible con el principio de causalidad. Estos fueron errores que me costaron dos años de trabajo excesivamente duro, hasta que me decidí a reconocerlo así, hacia fines de 1915; después de haber retornado con cierta tristeza a la curvatura de Riemann pude establecer la conexión entre la teoría y los hechos de la experiencia astronómica."*³¹

En el período comprendido entre mediados de 1914, después de la publicación de un nuevo artículo en colaboración con Grossmann, y principios de 1915, Einstein se percató de que el camino emprendido, con el abandono de la covarianza general, no conducía a resultados plenamente satisfactorios, tal como registra una carta dirigida a Arnold Sommerfeld el 28 de noviembre de 1915³². *"La teoría de Einstein-Grossmann había muerto y Einstein, que ya dominaba el cálculo diferencial absoluto y que por consiguiente no necesitaba más a Grossmann, se disponía a dar los últimos pasos en su búsqueda de la interacción gravitatoria."*³³

La formulación definitiva de la teoría general de la relatividad: noviembre de 1915.

Fue en el mes de noviembre de 1915 cuando Einstein llegó a la formulación definitiva de la Teoría General de la Relatividad. Culminaba así un largo período de diez años. Una de las mayores dificultades estribó en la gran complejidad del aparato matemático necesario para el desarrollo de la relatividad general. Einstein aprovechó las sesiones de la Academia Prusiana de Ciencias, de la que ya por entonces era miembro, para exponer la Teoría General de la Relatividad. La exposición definitiva de la Teoría General la realizó en la sesión celebrada el 25 de noviembre de 1915, bajo el título: *"Die Feldgleichungen der Gravitation"*³⁴;

³¹ EINSTEIN, A.: "Notas sobre el origen de la teoría de la relatividad general", *op. cit.*, p. 98.

³² Reproducida en HERMANN, A. (ed.): *Albert Einstein/Arnold Sommerfeld Briefwechsel*, Schabe and Co., Basel, 1968, p. 32, citada en SÁNCHEZ RON, J. M., *op. cit.*, p. 161.

³³ SÁNCHEZ RON, J. M.: *op. cit.*, p. 161.

³⁴ EINSTEIN, A.: "Die Feldgleichungen der Gravitation", *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, Berlin, 1915, n° 44, pp. 844-847

antes de la misma, en las sesiones de los días 4³⁵, 11³⁶ y 18 de noviembre³⁷ Einstein presentó los antecedentes inmediatos de dicha teoría.

En su primera conferencia, correspondiente al día 4 de noviembre, explicó el camino recorrido hasta la formulación definitiva de la Teoría General: *"Durante estos últimos años; me he esforzado mucho por tratar de construir una teoría de la relatividad general basada en la suposición de la relatividad de los movimientos no uniformes. Incluso llegué a pensar que había descubierto la única ley de gravitación que correspondía análogamente al postulado de la relatividad general y quise demostrar la necesidad de que fuese precisamente esta la solución en un artículo publicado en esta misma revista el año pasado. Un nuevo examen me demostró que la necesidad no se puede probar en absoluto por el método allí propuesto; fue debido a un error el que pareciese ser así... perdí toda fe en las ecuaciones que había establecido y comencé a buscar un camino que restringiese las posibilidades en una forma natural. Así volví al requisito de covariancia general para las ecuaciones del campo, requisito del que por primera vez y con gran pesar me había apartado hace tres años cuando trabajé junto a mi amigo Marcel Grossmann. De hecho, en aquel entonces llegamos ya muy cerca de la solución... Lo mismo que la teoría de la relatividad especial está basada en el postulado de que las ecuaciones deben ser covariantes con respecto a transformaciones lineales y ortogonales, la teoría desarrollada aquí está basada en el postulado de la covariancia de todos los sistemas de ecuaciones con respecto a las transformaciones cuyo determinante es 1. La fascinación de esta teoría a duras penas abandonará a todo aquel que la haya manejado. Representa un auténtico triunfo del cálculo diferencial absoluto fundado por Gauss, Riemann, Christoffel, Ricci y Levi-Civita."*³⁸

El 25 de noviembre, Einstein presentó las ecuaciones de campo satisfactorias, momento en el que la Teoría General de la Relatividad apareció bajo su formulación definitiva. *"Lo primero que destaca de estas ecuaciones es que son las mismas que Einstein y Grossmann habían descartado en 1913. Entonces creyeron que no tenían el límite newtoniano adecuado, ahora Einstein no sólo no se da cuenta de que esto no es así, sino que además en algún momento entre el 11 y el 18 de noviembre, cuando presenta su resultado a la academia, consigue*

³⁵ EINSTEIN, A.: "Grundgedanken der allgemeinen Relativitätstheorie und Anwendung dieser Theorie in der Astronomie" *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, 1915, pt. I, p. 315

³⁶ EINSTEIN, A.: "Zur Allgemeinen Relativitätstheorie", *Preussischen Akademie der Wissenschaften Sitzungsberichte der Königlichen*, Berlín, 1915, n° 44, pp. 778-786 y suplemento 799-80.

³⁷ EINSTEIN, A.: "Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie", *Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte der Königlichen*, Berlín, 1915, n° 44, pp. 831-839.

³⁸ EINSTEIN, A.: "Grundgedanken der allgemeinen Relativitätstheorie und Anwendung dieser Theorie in der Astronomie", *Sitzungsberichte der Kömiglihen preussischen Akademie der Wissenschaften*, Berlín, n° 46, 1915, pp. 778-786, citado en SÁNCHEZ RON, J. M., *op. cit.*, pp. 163-164.

*demostrar que la correspondiente ecuación para el vacío $R_{\alpha\beta} = 0$ explica el movimiento anómalo del perihelio de Mercurio*³⁹.

En 1916 Einstein publicó en *Annalen der Physik* el artículo "*Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie*" (Los fundamentos de la teoría de la relatividad general), en el que presentaba de forma completa y desarrollada la Teoría General de la Relatividad⁴⁰. Algunos meses después, en diciembre de 1916, Einstein terminó un pequeño libro sobre la relatividad: *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*. En él presentaba por vez primera una aproximación a la relatividad ante un público no especialista, por su sencillez, claridad y rigor constituye uno de los mejores exponentes del pensamiento de Einstein en 1916 sobre la relatividad general. A lo largo de sus páginas Einstein utilizó el ejemplo del ascensor que cae para explicar la Teoría General, dicho ejemplo se encontraba ya implícito en los artículos de 1907 y 1911. *"Imaginemos un trozo de espacio vacío, tan alejado de estrellas y de grandes masas que podamos decir con suficiente exactitud que nos encontramos ante el caso previsto en la ley fundamental de Galileo. Para esta parte del universo es entonces posible elegir un cuerpo de referencia de Galileo con respecto al cual los puntos en reposo permanecen en reposo y los puntos en movimiento persisten constantemente en un movimiento uniforme y rectilíneo. Como cuerpo de referencia nos imaginamos un espacioso cajón con la forma de una habitación; y suponemos que en su interior se halla un observador pertrechado de aparatos. Para él no existe, como es natural, ninguna gravedad. Tiene que sujetarse con cuerdas al piso, so pena de verse lanzado hacia el techo al mínimo golpe contra el suelo. Supongamos que en el centro del techo del cajón, por fuera, hay un gancho con una cuerda, y que un ser -cuya naturaleza nos es indiferente- empieza a tirar de ella con fuerza constante. El cajón, junto con el observador, empezará a volar hacia "arriba" con movimiento uniformemente acelerado*⁴¹.

Einstein está ejemplificando el caso de un campo gravitacional homogéneo susceptible de ser tratado teóricamente desde una perspectiva relativista. La importancia de dicho ejemplo lo indicaba el propio Einstein en su artículo de 1907 titulado *El principio de relatividad y sus consecuencias*, *"Esta suposición extiende el principio de relatividad al caso de un movimiento de traslación uniformemente acelerado del sistema de referencia. El valor heurístico de esta suposición se encuentra en que hace posible la sustitución de un campo*

³⁹ SÁNCHEZ RON, J. M.: *op. cit.*, pp. 167-168.

⁴⁰ EINSTEIN, A.: "Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik*, 49, 1916, pp. 769-822.

⁴¹ EINSTEIN, A.: *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*, 1916, traducción al español: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Madrid, Alianza, 1984, p. 61.

*gravitacional homogéneo por un sistema de referencia uniformemente acelerado, siendo este último caso susceptible de tratamiento teórico hasta cierto grado.*⁴²

Nos encontramos ante un *sistema casi inercial*, es inercial pero no es inmóvil y se encuentra limitado por el espacio interior formado por las paredes del cajón. Un sistema de estas características era posible de ser tratado desde un punto de vista relativista, de ahí el valor heurístico que Einstein le concedía. ¿Qué ocurre en su interior? *"El suelo del cajón le transmite la aceleración por presión contra los pies [al observador que hay en su interior]... Así pues, estará de pie en el cajón igual que lo está una persona en una habitación de cualquier vivienda terrestre. Si suelta un cuerpo que antes sostenía en la mano, la aceleración del cajón dejará de actuar sobre aquél, por lo cual se aproximará al suelo en movimiento relativo acelerado. El observador se convencerá también de que la aceleración del cuerpo respecto al suelo es siempre igual de grande, independientemente del cuerpo con que realice el experimento. Apoyándose en sus conocimientos del campo gravitatorio... el hombre llegará así a la conclusión de que se halla, junto con el cajón, en el seno de un campo gravitatorio bastante constante"*⁴³.

Nos encontramos, pues, ante un caso de un campo gravitatorio homogéneo. Interviene en este momento la igualdad existente entre masa gravitatoria y masa inercial, *" Si no existiera esta ley de la naturaleza, el hombre en el cajón acelerado no podría interpretar el comportamiento de los cuerpos circundantes a base de suponer la existencia de un campo gravitatorio, y ninguna experiencia le autorizaría a suponer que su cuerpo de referencia está "en reposo" [se refiere al cajón]"*⁴⁴.

El objetivo de Einstein, al generalizar el principio de relatividad, consistía en eliminar la posición privilegiada que ostentaban los sistemas inerciales en la relatividad especial, para ello había que encontrar la formulación adecuada por la que la relatividad fuese aplicable sin restricciones a los sistemas de referencia acelerados entre sí. La aplicación de las ecuaciones relativistas a un campo gravitatorio homogéneo, como el descrito por Einstein en el ejemplo del cajón que se mueve en aceleración constante, le llevó a importantes conclusiones sobre la influencia de la gravitación en los procesos electromagnéticos. *"Que el campo gravitatorio influye... en el movimiento de los cuerpos es ya sabido, de modo que la reflexión no aporta nada fundamentalmente nuevo. Sí se obtiene, en cambio, un resultado nuevo y de importancia capital al hacer consideraciones equivalentes para un rayo de luz. Respecto al cuerpo de referencia de Galileo k,*

⁴² EINSTEIN, A.: "Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen", *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, nº 4, 1907, pp. 411-462 y vol. 5, pp. 98-99.

⁴³ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 61-62.

⁴⁴ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 62-63.

*se propaga en línea recta con velocidad c . Respecto al cajón acelerado (cuerpo de referencia k'), la trayectoria del mismo rayo de luz ya no es una recta, como se deduce fácilmente. De aquí se infiere que los rayos de luz en el seno de campos gravitatorios se propagan en general según líneas curvas.*⁴⁵

Einstein remarcó la importancia de este resultado por dos grandes motivos: la posibilidad de su contrastación empírica, y porque: *"... la consecuencia anterior demuestra que, según la teoría de la relatividad general, la tantas veces mencionada ley de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío -que constituye uno de los dos supuestos básicos de la relatividad especial- no puede aspirar a validez ilimitada, pues los rayos de luz solamente pueden curvarse si la velocidad de propagación de éste varía con la posición. Cabría pensar que esta consecuencia da al traste con la teoría de la relatividad especial y con toda la teoría de la relatividad en general. Pero en realidad no es así. Tan sólo cabe inferir que la teoría de la relatividad especial no puede arrogarse validez en un campo ilimitado; sus resultados sólo son válidos en la medida en que se pueda prescindir de la influencia de los campos gravitatorios sobre los fenómenos (los luminosos, por ejemplo).*⁴⁶

Einstein polemizaba aquí con quienes, como Abraham, querían ver en este resultado la refutación de la relatividad, para ello señalaba el caso de la posición que ocupa la Electroestática dentro de la Electrodinámica, como un caso límite, en el que *"las leyes de esta última [de la Electrodinámica] conducen directamente a las de aquélla en el supuesto de que los campos sean temporalmente invariables"*, otro tanto ocurre con la relatividad especial respecto de la relatividad general, esto es, constituye un caso límite, por el que las leyes de la relatividad general conducen directamente a la relatividad especial en el supuesto de que la influencia de los campos gravitatorios no sea tomada en consideración.

Einstein desarrolló una nueva ley de la gravitación acorde con la física relativista, que superaba las dificultades de la ley de la gravitación newtoniana, fundamentalmente la acción instantánea a distancia y daba explicación del avance del perihelio de Mercurio. Para ello debió solventar serias dificultades, entre las que destacó la profundización de los conceptos del continuo espacio-temporal de la relatividad especial, Einstein recurrió al caso del *disco que gira*. *"Imaginemos una región espacio-temporal en la que, respecto a un cuerpo de referencia k que posea un estado de movimiento convenientemente elegido, no exista ningún campo gravitatorio; en relación a la región considerada, k es entonces un cuerpo de referencia de Galileo, siendo válidos respecto a él los*

⁴⁵ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, p. 67.

⁴⁶ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 68-69.

resultados de la teoría de la relatividad especial. Imaginemos la misma región, pero referida a un segundo cuerpo de referencia k' que rota uniformemente respecto a k . Para fijar las ideas, supongamos que k' es un disco circular que gira uniformemente alrededor de su centro y en su mismo plano. Un observador sentado en posición excéntrica sobre el disco circular k' experimenta una fuerza que actúa en dirección radial hacia afuera y que otro observador que se halle en reposo respecto al cuerpo de referencia original k interpreta como acción inercial (fuerza centrífuga). Supongamos, sin embargo, que el observador sentado en el disco considera éste como un cuerpo de referencia "en reposo", para lo cual está autorizado por el principio de relatividad. La fuerza que actúa sobre él -y en general sobre los cuerpos que se hallan en reposo respecto al disco- la interpreta como la acción de un campo gravitatorio. La distribución espacial de este campo no sería posible según la teoría newtoniana de la gravitación⁴⁷.

Una vez que ha definido la situación del campo de fuerzas existente en el caso del disco que gira, Einstein analiza con detalle lo que ocurre en el continuo espacio-temporal definido por el sistema creado, para ello recurrió a la utilización imaginaria de reglas rígidas y relojes sincronizados. *"Imaginemos que el observador coloca primero dos relojes de idéntica constitución, uno en el punto medio del disco circular, el otro en la periferia del mismo, de manera que ambos se hallan en reposo respecto al disco. En primer lugar nos preguntamos si estos dos relojes marchan o no igual de rápido desde el punto de vista del cuerpo de referencia de Galileo K , que no rota. Juzgado desde K , el reloj situado en el centro no tiene ninguna velocidad, mientras que el de la periferia, debido a la rotación respecto a K , está en movimiento. Según el resultado de [la teoría de la relatividad especial], este segundo reloj marchará constantemente más despacio -respecto a K - que el reloj situado en el centro del disco circular. Lo mismo debería evidentemente constatar el hombre del disco, a quien vamos a imaginar sentado en el centro, junto al reloj que hay allí. Así pues, en nuestro disco circular, y con más generalidad en cualquier campo gravitatorio, los relojes marcharán más deprisa o más despacio según el lugar que ocupe el reloj (en reposo).⁴⁸*

Se plantea así la imposibilidad de dar una definición exacta del tiempo dentro de un campo gravitatorio, semejante dificultad se presenta en la definición de las coordenadas espaciales, *"si el observador que se mueve junto con el disco coloca su escala unidad (una regla pequeña, comparada con el radio del disco) tangencialmente sobre la periferia de éste, su longitud, juzgada desde el sistema de Galileo, será más corta que 1, pues según [la teoría especial de la relatividad] los cuerpos en movimiento experimentan un acortamiento en la dirección del*

⁴⁷ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, p. 71.

⁴⁸ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, p. 72.

*movimiento. Si en cambio coloca la regla en la dirección del radio del disco, no habrá acortamiento respecto a K. Por consiguiente, si el observador mide primero el perímetro del disco, luego su diámetro y divide estas dos medidas, obtendrá como cociente, no el conocido número $\pi = 3,14\dots$, sino un número mayor, mientras que en un disco inmóvil respecto a K debería resultar exactamente π en esta operación, como es natural. Con ello queda probado que los teoremas de la geometría euclídea no pueden cumplirse exactamente sobre el disco rotario ni, en general, en un campo gravitacional, al menos si se atribuye a la reglilla la longitud l en cualquier posición y orientación. También el concepto de línea recta pierde con ello su significado. No estamos, pues, en condiciones de definir exactamente las coordenadas x, y, z respecto al disco, utilizando el método empleado en la teoría de la relatividad especial.*⁴⁹

Einstein se vio obligado a abandonar la geometría euclídea como marco en el que se desenvuelve el espacio-tiempo bajo la acción de un campo gravitatorio, tuvo que recurrir a la utilización de coordenadas *gaussianas* para poder seguir avanzando. Einstein se encontraba así en condiciones de enunciar satisfactoriamente el principio general de la relatividad, solventadas las dificultades de representar el continuo espacio-temporal no euclideano. *"Ahora estamos en condiciones de sustituir la formulación provisional del principio de la relatividad general... La idea fundamental del principio de la relatividad general responde al enunciado: "Todos los sistemas de coordenadas gaussianas son esencialmente equivalentes para la formulación de las leyes generales de la naturaleza".*⁵⁰

Establecido el aparato matemático adecuado para tratar el continuo espacio-temporal no euclideano, Einstein se encontró en condiciones de abordar el desarrollo de la gravitación desde la perspectiva del principio de la relatividad general, de forma que pueda establecerse la ley general del campo gravitatorio, a condición de que cumpla los siguientes requisitos: *"a) La generalización buscada debe satisfacer también el postulado de la relatividad general. b) Si existe materia en la región considerada, entonces lo único que determina su acción generadora de un campo es su masa inercial, es decir [según la ecuación $E = mc^2$, obtenida en la relatividad especial, por la que los principios de conservación de masa y energía se encuentran íntimamente relacionados], su energía únicamente. c) Campo gravitatorio y materia deben satisfacer juntos la ley de conservación de la energía (y del impulso).*⁵¹

La teoría de la gravitación consecuencia de la aplicación del principio de relatividad general da razón, además de la eliminación de todo marco de

⁴⁹ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, p. 73.

⁵⁰ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 85-86.

⁵¹ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, p. 89.

referencia privilegiado, de la igualdad entre masa inercial y masa gravitatoria; de la curvatura de los rayos de luz bajo la acción de un campo gravitatorio y del avance en el movimiento del perihelio de Mercurio. La teoría de la gravitación de Newton aparece dentro de la ley de gravitación de la relatividad general como una aproximación de los resultados de esta última. *"En efecto, si se particularizan las ecuaciones de la teoría de la relatividad general al caso de que los campos gravitatorios sean débiles y de que todas las masas se muevan respecto al sistema de coordenadas con velocidades pequeñas comparadas con la de la luz, entonces se obtiene la teoría de Newton como primera aproximación; así pues, esta teoría resulta aquí sin necesidad de sentar ninguna hipótesis especial, mientras que Newton tuvo que introducir como hipótesis la fuerza de atracción inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los puntos materiales que interactúan."*⁵²

Las consecuencias cosmológicas de la Teoría de la Relatividad General constituye uno de los principales resultados de la nueva teoría. La visión del Universo procedente de la física newtoniana dejó paso a una nueva representación del Universo radicalmente diferente de la visión procedente de la Física clásica. Einstein era plenamente consciente de ello cuando presentó la Teoría General, los presupuestos de este nuevo enfoque del Universo fueron ya señalados por el propio Einstein en su artículo de 1916. *"Si uno reflexiona sobre la pregunta de cómo imaginar el mundo como un todo, la respuesta inmediata será seguramente la siguiente. El universo es espacialmente (y temporalmente) infinito... Expresado de otro modo: por mucho que se viaje por el universo, en todas partes se hallará un enjambre suelto de estrellas fijas de aproximadamente la misma especie e igual densidad. Esta concepción es irreconciliable con la teoría newtoniana. Esta última exige más bien que el universo tenga una especie de centro en el cual la densidad de las estrellas sea máxima, y que la densidad de estrellas disminuya de allí hacia afuera, para dar paso, más allá todavía, a un vacío infinito"*⁵³

La concepción newtoniana del Universo conducía a graves inconsistencias. *"Esta representación es de por sí poco satisfactoria. Pero lo es aún menos porque de este modo se llega a la consecuencia de que la luz emitida por las estrellas, así como algunas de las estrellas mismas del sistema estelar, emigran ininterrumpidamente hacia el infinito, sin que jamás regresen ni vuelvan a entrar en interacción con otros objetos de la naturaleza. El mundo de la materia, apolonada en un espacio finito, iría empobreciéndose entonces paulatinamente. Para eludir estas consecuencias Seeliger modificó la ley newtoniana en el sentido de suponer que a distancias grandes la atracción de dos masas disminuye más*

⁵² EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, p. 90.

⁵³ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 91-92.

*deprisa que la ley de $1/r^2$. Con ello se consigue que la densidad media de la materia sea constante en todas las partes hasta el infinito, sin que surjan campos gravitatorios infinitamente grandes, con lo cual se deshace uno de la antipática idea de que el mundo material posee una especie de punto medio. Sin embargo, el precio que se paga por liberarse de los problemas teóricos descritos es una modificación y complicación de la Ley de Newton que no se justifican ni experimental ni teóricamente.*⁵⁴

Otra línea interpretativa, que pretendía dar solución a estos problemas fue la desarrollada por Poincaré y Helmholtz, a partir de la geometría no euclidea de Riemann, que permitía poner en cuestión la *infinitud* del espacio⁵⁵. La geometría no euclidea de Riemann permitió a Einstein enfrentarse con el problema de la representación del Universo procedente de la Relatividad General, *"la superficie esférica se caracteriza, frente a todas las demás superficies cerradas, por la propiedad de que todos sus puntos son equivalentes... El mundo esférico es una "superficie de curvatura constante". Este mundo esférico bidimensional tiene su homólogo en tres dimensiones, el espacio esférico tridimensional, que fue descubierto por Riemann. Sus puntos son también equivalentes. Posee un volumen finito, que viene determinado por su "radio" $R(2\pi^2 R^3)$ "*⁵⁶.

La geometría riemanniana permitía, pues, trabajar con espacio cerrados sin límites, esto posibilitaba interrogarse sobre la infinitud o finitud del Universo. Pero, sobre todo, daba solución a la representación geométrica del continuo espacio-temporal definido por la Teoría de la Relatividad General. *"Si la densidad media de materia en el mundo no es nula (aunque se acerque mucho a cero), entonces el mundo no es cuasi-euclideo. Los cálculos demuestran más bien que, con una distribución uniforme de materia, debería ser necesariamente esférico (o elíptico). Dado que la materia está distribuida de manera localmente no uniforme, el mundo real diferirá localmente del comportamiento esférico, es decir, será cuasi-esférico. Pero necesariamente tendrá que ser finito.*⁵⁷

El continuo espacio-temporal no euclídeo: el fin de la representación espacial clásica.

Imaginemos que en los planetas de Marte, la Tierra y Venus existen tres laboratorios astronómicos, que emiten un rayo de luz que enlaza cada uno de los referidos planetas formando un triángulo. Los observadores situados en cada observatorio registran los ángulos de cada uno de los vértices del triángulo, la suma de los resultados obtenidos sería mayor de 180° , por lo que deducirían que

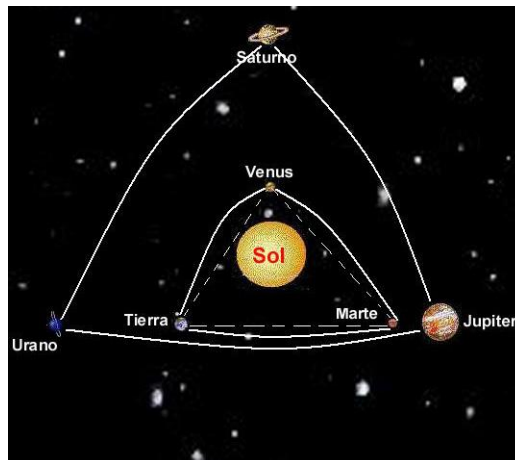
⁵⁴ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 92-93.

⁵⁵ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 93-94.

⁵⁶ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 96-97.

⁵⁷ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 98-99.

el continuo espacio-temporal en la región delimitada por los tres planetas estaría curvado, con una curvatura positiva. Si estas mediciones se establecieran en el triángulo hipotético formado por los planetas Júpiter, Saturno y Urano, que se encuentran a una mayor distancia del Sol, la suma de los tres ángulos sería superior a 180° pero inferior a la suma de los ángulos del triángulo anterior. La razón de esta diferencia estriba en la acción que ejerce el campo gravitatorio del Sol sobre los rayos luminosos (en el primer triángulo la curvatura es mayor debido a que los rayos de luz pasan más cerca del Sol y, por tanto, se encuentran más afectados por la acción del campo gravitatorio). Ver figura



La trayectoria más corta entre los tres planetas, que forman el triángulo imaginario que hemos trazado, es la recorrida por los rayos luminosos, que determinan una *línea geodésica*. *"Para evitar confusiones en la terminología, el término "línea recta" se reserva únicamente para las distancias más cortas en geometría plana, mientras que en una superficie curva y un espacio curvo hablamos de "líneas geodésicas". Así, en la superficie de una esfera, el equivalente de las líneas rectas son los arcos de círculos máximos que usamos para trazar triángulos esféricos. Podemos darnos cuenta de que, en la geometría esférica, la antigua afirmación euclídea de que "las líneas paralelas nunca se encuentran" no se sostiene, puesto que dos círculos máximos cuales quiera siempre se cortan en dos puntos y dos aviones que salen de dos puntos del ecuador en direcciones paralelas perpendiculares al ecuador y vuelan sin cambiar su rumbo chocarían al llegar al polo."*⁵⁸

Ahora bien, la curvatura de la geometría del espacio-tiempo no es homogénea, sino que varía en las diferentes regiones del continuo espacio-temporal, tal como señala la ecuación de Einstein de la relatividad general (*Curvatura de la geometría del espacio-tiempo*) = **G** (*Densidad másica de la materia en el*

⁵⁸ GAMOW, G.: *Biografía de la física*, Madrid, Alianza, 1983, pp. 256-257.

espacio-tiempo), donde **G** es la constante gravitacional de Newton ($G = 6,7 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g.s}^2$). Habrá regiones del continuo espacio-temporal en las que existirá una gran curvatura, mientras que en otras su curvatura será menor o incluso tener curvatura cero. La existencia de diferentes grados de curvatura del continuo espacio-temporal viene determinada por la densidad másica de la materia en las diferentes regiones del continuo espacio-temporal, tal como exige la relatividad general por la acción de los campos gravitatorios. Llegamos así a la conclusión de que *la materia da lugar a una curvatura de la geometría del espacio-tiempo*. Pero también, en aplicación de la ecuación de Einstein, la materia del Universo se encuentra condicionada por la curvatura del espacio-tiempo, determinando como ha de moverse la materia, o lo que es lo mismo, *la materia encuentra condicionado su movimiento debido a la curvatura del espacio-tiempo*. Resultados que tendrán importantes consecuencias cosmológicas. *"Sean dos cuerpos en el universo. Según la ecuación de Einstein, cada uno producirá una cierta curvatura en el espacio-tiempo. Además, según la ecuación de Einstein, cada cuerpo se verá forzado a moverse en cierta forma en respuesta a la curvatura producida por el otro. El resultado neto es que cada cuerpo influye sobre el otro. Es precisamente esta influencia lo que llamamos gravitación. La idea es que la curvatura de la geometría del espacio-tiempo actúa como una especie de intermediario entre los dos cuerpos. En esencia es el campo gravitatorio."*⁵⁹

En el caso de las fuerzas centrífugas provocadas por el movimiento de rotación de los cuerpos celestes la geometría euclídea también sustituida por la geometría riemanniana a la hora de establecer su representación geométrica. Imaginemos una plataforma giratoria, los cuerpos situados sobre su superficie experimentarían una fuerza centrífuga que tiende a alejarlos del centro de la misma. Si dentro de dicha plataforma se encontraran varios observadores que trataran de construir un triángulo, mediante varillas rígidas de la misma longitud uniendo sus extremos, de manera que empleen el menor número posible de ellas (esto es la distancia menor existente entre dos vértices), y posteriormente sumaran los ángulos de los tres vértices, obtendrían un resultado menor de 180°, por lo que nos encontraríamos ante una curvatura negativa del continuo espacio-temporal, por efecto de la acción de la fuerza centrífuga, debido a que las varillas se encuentran sometidas a la contracción de Fitzgerald por efecto del movimiento rotatorio. Lo mismo ocurriría si en vez de varillas hubiésemos empleado un rayo luminoso. (Ver figura).

⁵⁹ GEROCH, R.: *La relatividad general (de la A a la B)*, Madrid, Alianza, 1985, p. 172.

Einstein, como ya hemos señalado, había llegado en 1907, en su camino hacia la relatividad general, a la conclusión de que la trayectoria de los rayos luminosos se curva bajo la acción de un campo gravitatorio. En su artículo de 1911, Einstein propuso un método capaz de confirmar experimentalmente tal resultado. Sin embargo, los cálculos de 1911 eran todavía erróneos, y de haberse podido realizar su comprobación experimental hubiese arrojado unos resultados que duplicaban el valor de la curvatura. Sólo cuando la relatividad general fue formulada definitivamente en 1915 dicho error fue subsanado.

En 1919 ese año la *Royal Society* organizó dos expediciones, bajo la dirección de los astrónomos ingleses Eddington y Crommelin, con el objeto de estudiar el eclipse solar del 29 de mayo de 1919. La organización de dichas expediciones fue posible por la introducción de la relatividad general en el Reino Unido en 1916, merced a los artículos publicados por De Sitter en la revista de la *Royal Astronomical Society* entre 1916 y 1917, que atrajeron enseguida la atención de Arthur Stanley Eddington, a la sazón secretario de la misma y responsable directo de su publicación⁶¹. Eddington se convirtió de inmediato en un adalid de la relatividad en Gran Bretaña, publicando el año 1917 un informe en el que subrayaba la importancia de la comprobación experimental de la posible deflexión de la luz⁶²; un mes después, en marzo de 1917, sir Frank Watson Dyson, astrónomo real, señaló la excelente ocasión que se presentaba durante el eclipse solar del 29 de mayo de 1919 para observar la existencia o no de dicho fenómeno⁶³. *Las actuales expediciones de eclipse pueden demostrar, por primera vez, el peso de la luz [esto es, la confirmación de los valores predichos en la teoría newtoniana]; o pueden confirmar la extraña teoría de Einstein sobre el espacio no euclideo; o pueden llegar a un resultado de todavía mayor alcance en sus consecuencias: deflexión nula.*⁶⁴

La expedición de A. C. D. Crommelin se dirigió a Sobral, al norte de Brasil; la dirigida por A. S. Eddington tomó como punto de observación la isla Príncipe, situada en el golfo de Guinea. *"Fueron los primeros [la expedición dirigida por Crommelin] más afortunados en sus observaciones por la perfección de las placas fotográficas obtenidas de la región del cielo en que se hallaba el Sol eclipsado; pero las de los segundos [la expedición de Eddington] constituyen una plena confirmación de aquéllas, de valor tanto mayor cuanto que se referían a un*

⁶¹ W. DE SITTER publicó un artículo en la revista *Observatory* sobre la relatividad general, en el n° 39 (1916), p. 412, igualmente publicaría tres artículos en la revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, en los que De Sitter desarrollaba la relatividad general y señalaba la importancia del experimento propuesto por Einstein, estos artículos aparecieron en los números 76 (1916) y 78 (1917).

⁶² A. S. EDDINGTON presentó dicho informe a la *Royal Astronomical Society* en febrero de 1917, siendo publicado por la *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* en el número 77 de 1917, p. 377.

⁶³ DYSON, F. W.: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, n° 77, 1917, p. 445.

⁶⁴ EDDINGTON, A. S.: *Observatory*, n° 42, 1919, p. 119.

*lugar de condiciones bastante diversas de las características de la primera estación. Además, en Sobral, algún tiempo después, se fotografió con el mismo sistema óptico la región del cielo en que el Sol se proyectaba el 29 de mayo, cuando nuestro astro central estaba ya muy alejado de ella, y en Príncipe se obtuvieron inmediatamente fotografías de otras regiones celestes que, comparadas con otras obtenidas en Inglaterra, habrían de permitir el descubrimiento de cualquier modificación en los instrumentos por el viaje y la diferencia de las condiciones metereológicas.*⁶⁵

Los resultados obtenidos por ambas expediciones, una vez contrastados, probaron que las predicciones establecidas por la Teoría de la Relatividad General, sobre la curvatura de los rayos lumínicos bajo la acción de un campo gravitatorio, eran correctas. Se había verificado uno de sus resultados más importantes. La curvatura prevista por la relatividad era de 1,61 segundos de arco. Mientras que las observaciones realizadas por Crommelin daban una desviación de 1,98 segundos de arco (con una oscilación de error de $\pm 0,12$ segundos de arco); mucho más ajustados resultaron los resultados obtenidos por Eddington, que coincidían exactamente con las predicciones de la Teoría de la Relatividad General, es decir, una desviación de 1,61 segundos de arco (con una oscilación de error de $\pm 0,30$ segundos de arco). Estos resultados fueron presentados por Dyson, Crommelin y Eddington como la confirmación de la teoría de la relatividad, y así fueron acogidos por la comunidad internacional de físicos, a través del informe preliminar presentado por Eddington en la reunión de la Asociación Británica celebrada en Bournemouth los días 9 y 13 de septiembre de 1919 y, posteriormente, en la famosa sesión conjunta de la *Royal Society* y la *Royal Astronomical Society* celebrada el 6 de noviembre de 1919 en Londres⁶⁶.

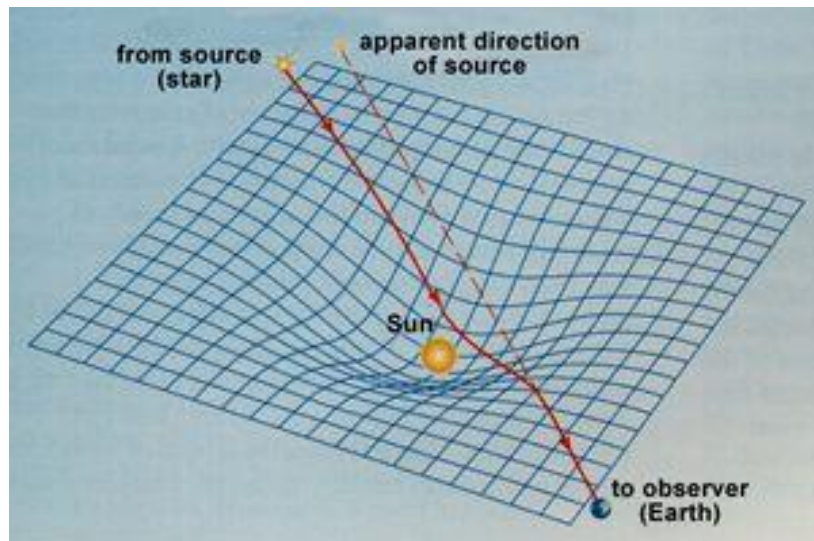
La reunión del 6 de noviembre de 1919 estuvo precedida de una gran expectación. Sir Frank Watson Dyson abrió la sesión mediante la descripción de los resultados obtenidos por las dos expediciones que, a su juicio, confirmaban la teoría de Einstein, su intervención culminó con las siguientes palabras: *"Después de un cuidadoso estudio de las placas estoy dispuesto a decir que confirman la predicción de Einstein. Se ha obtenido un resultado muy definido: que la luz se deflecta de acuerdo con la teoría de gravitación de Einstein."*⁶⁷

⁶⁵ CABRERA, B.: *Principio de Relatividad. Sus fundamentos experimentales y filosóficos y su evolución histórica*. Publicaciones de la Residencia de Estudiantes, Serie I, vol. 7, Madrid, 1923, pp. 252-253. Existe reedición facsímil en Editorial Alta Fulla "Mundo Científico", Barcelona, 1986.

⁶⁶ BERTOTTI, B.; BRILL, D. y KROTKOV, R. en *Gravitation* (L. Witten, ed.), Wiley, Nueva York, 1962, p. 1; EARMAN, J y GLYMOUR, G: "Relativity and Eclipses: The British Eclipse Expeditions of 1919 and their Predecessors" en *Historical Studies in the Physical Sciences*, n° 11 1, 1980, pp. 49-85; MOYER, D. F.: *On the Path of Albert Einstein*, Plenum Press, Nueva York, 1979, p. 55.

⁶⁷ *Observatory*, n° 42, 1919, p. 389 y ss.

Eddington resaltó que tanto las observaciones sobre la curvatura de los rayos lumínicos en presencia de un campo gravitatorio, como el cálculo exacto de la trayectoria del perihelio de Mercurio no hacían sino confirmar sin lugar a dudas la validez de la Teoría de la Relatividad General. Como *"abogado del diablo"* intervino Ludwick Silberstein, quien señaló que no existían pruebas suficientes para atribuir la deflexión de la luz por efecto de la gravitación, mientras que el efecto del corrimiento hacia el rojo de las rayas espectrales no había tenido hasta el momento confirmación, por lo que no se podía concluir con la validación de la relatividad general, terminando sus palabras con una advertencia: *"Por respeto a aquel hombre [se refería a Newton, cuyo retrato presidía la sala de reuniones], debemos proceder muy cuidadosamente al modificar o retocar su ley de gravitación."*⁶⁸ Joseph John Thomson, presidente de la *Royal Society* y una de las máximas autoridades de la física británica de aquellos años, se pronunció en favor de la teoría de la relatividad como presidente de la sesión conjunta, dando así por válidos los resultados presentados por Dyson, Crommelin y Eddington, sus palabras fueron significativas: *"Este es el resultado más importante obtenido por lo que se refiere a la teoría de la gravitación desde los días de Newton y es apropiado que sea anunciado en una reunión de la sociedad tan íntimamente vinculada a él... El resultado [es] uno de los más altos éxitos del pensamiento humano."*⁶⁹



Al día siguiente el periódico londinense *Times* se hacía eco de los resultados de la sesión conjunta de la *Royal Astronomical Society* y de la *Royal Society*, bajo el expresivo titular: *"Revolución en la ciencia/ Nueva Teoría del Universo./ Las*

⁶⁸ *Observatory*, n° 42, 1919, p. 389 y ss.

⁶⁹ *Observatory*, n° 42, 1919, p. 389 y ss. Ver también *Proceedings of the Royal Society*, n° 96 A, 1919.

ideas de Newton destronadas." (Revolution in Science / New Theory of the Universe / Newtonian ideas overthrown)⁷⁰.

El avance del perihelio de Mercurio: un enigma que desaparece.

Las discrepancias registradas entre la observación de la órbita de Mercurio y los resultados previstos por la teoría de la gravitación de Newton constituyeron un motivo de preocupación y debate sobre su significado desde que fueron registradas a mediados del siglo XIX. De hecho, cronológicamente ésta fue la primera sombra de duda sobre la validez exacta de la ley de Newton, aunque hasta la aparición de la relatividad general no pudo ser explicada correctamente. La elipse descrita por Mercurio en su movimiento alrededor del Sol no permanecía estacionaria en el espacio, como debía ocurrir según la teoría de Newton, sino que giraba lentamente, con su eje mayor inclinándose en un pequeño ángulo, en el transcurso de cada revolución. El desconcierto fue completo cuando el astrónomo francés O. J. J. Leverrier (que predijo, simultáneamente con el inglés J.C. Adams, la existencia de Neptuno en 1846), calculó el efecto de las perturbaciones de otros planetas sobre la órbita de Mercurio, y obtuvo una discrepancia de 43 segundos angulares por siglo entre los cálculos y las observaciones. Desde entonces el avance del perihelio (punto de máxima aproximación al Sol) de Mercurio era considerado como un enigma sin solución. La relatividad general vino a resolver el enigma, como señaló el propio Einstein en 1916⁷¹. *"Según la teoría newtoniana, los planetas se mueven en torno al Sol según una elipse que conservaría eternamente su posición respecto a las estrellas fijas si se pudiera prescindir de la influencia de los demás planetas sobre el planeta considerado, así como del movimiento propio de las estrellas fijas. Fuera de estas dos influencias, la órbita del planeta debería ser una elipse inmutable respecto a las estrellas fijas, siempre que la teoría de Newton fuese exactamente correcta. En todos los planetas, menos en Mercurio,*

⁷⁰ *Times*, 7 de noviembre de 1919, p. 12.

⁷¹ En una carta dirigida a su amigo Michele Besso el 10 de diciembre de 1915, Einstein se refiere a los cálculos establecidos por la relatividad general sobre el movimiento del perihelio de Mercurio, sus palabras son elocuentes: "Te he enviado hoy los trabajos [por el texto se deduce que son sus comunicaciones de noviembre de 1915 en los que presentó la relatividad general a la Academia de Ciencias Prusiana]. Los sueños más audaces se han convertido en realidad. Covariancia *general*. Movimiento del perihelio de Mercurio, una precisión espléndida. Esto último está perfectamente asegurado desde el punto de vista astronómico, pues las determinaciones de las masas de los planetas interiores han sido hechas por Newcomb según las perturbaciones *periódicas* (y no [según] las *seculares*). Esta vez, la verdad se encontraba en lo que estaba más cerca", SPEZIALI, P. (ed.): *Albert Einstein correspondencia con Michele Besso. (1903-1955)*, pp. 114-115 Sobre este tema Einstein escribiría un artículo en 1915 titulado: "Erklärung der Perihelbewegung der Merkur aun der allgemeinen Relativitätstheorie" en la revista *Sitzungsberichte der Königlichen Preussischen Akademie der Wissenschaften*, Berlín, 1915, pp. 831-839. Ver también la carta dirigida a Michele Besso el 3 de enero de 1916, reproducida en SPEZIALI, P. (ed.): *Albert Einstein correspondencia con Michele Besso. (1903-1955)*, pp. 117-118, en la que vuelve a insistir sobre el tema.

el más próximo al Sol, se ha confirmado esta consecuencia -que se puede comprobar con eminente precisión- hasta el límite de exactitud que permiten los métodos de observación actuales. Ahora bien, del planeta Mercurio sabemos desde Leverrier que la elipse de su órbita respecto a las estrellas fijas, una vez corregida en el sentido anterior, no es fija, sino que rota -aunque lentísimamente- en el plano orbital y en el sentido de su revolución... La explicación de este fenómeno dentro de la Mecánica clásica sólo es posible mediante la utilización de hipótesis poco verosímiles, inventadas exclusivamente con este propósito. Según la teoría de la relatividad general resulta que toda elipse planetaria alrededor del Sol debe necesariamente rotar en el sentido indicado anteriormente, que esta rotación es en todos los planetas, menos en Mercurio, demasiado pequeña para poder detectarla con la exactitud de observación hoy día alcanzable, pero que en el caso de Mercurio debe ascender a 43 segundos de arco por siglo, exactamente como se había comprobado en las observaciones.⁷²

Los cálculos establecidos por la relatividad general señalaban que las trayectorias elípticas descritas por los planetas en su movimiento alrededor del Sol no permanecían estacionarias en el espacio, como establecía la ley de Newton, debido a la curvatura del espacio-tiempo provocada por la acción del campo gravitatorio del Sol, En la figura se representa la trayectoria del movimiento de un planeta alrededor del Sol conforme al continuo espacio-temporal curvo de la relatividad general.

El desplazamiento hacia el rojo de la luz en la Tierra.

Otro de los resultados que la Teoría de la Relatividad General preveía, y que podía servir para su confirmación experimental, era la constatación de la disminución de la frecuencia de la luz proyectada desde las estrellas, su comprobación vendría determinada por el corrimiento de la longitud de onda de las rayas espectrales hacia el extremo rojo del espectro. Tal hecho responde a pérdida de energía que debe experimentar un fotón de luz al escapar de un campo gravitatorio, esta variación en la energía del fotón viene determinada por la acción del campo gravitatorio sobre la masa del fotón. Tal resultado fue predicho por Einstein en 1916 cuando publicó la Teoría de la Relatividad General. *"Al margen de esto, sólo se ha podido extraer de la teoría otra consecuencia accesible a la contrastación experimental [el otro hecho experimental al que se refiere es al avance del perihelio de Mercurio], y es un corrimiento espectral de la luz que nos envían las grandes estrellas respecto a la luz generada de manera equivalente (es decir, por la misma clase de moléculas) en la Tierra. No me cabe*

⁷² EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 90-91.

*ninguna duda de que también esta consecuencia de la teoría hallará pronto confirmación.*⁷³

Dicho resultado descansa en los mismos presupuestos teóricos que preveía la curvatura de la trayectoria de los rayos lumínicos bajo la acción de un campo gravitatorio, y es, pues, una extensión de los mismos. Las dificultades para realizar una observación precisa eran muchas debido a que la desviación hacia el rojo de los rayos luminosos procedentes del Sol se acercaba mucho a los márgenes de error experimentales. A pesar de las enormes dificultades que entrañaba su comprobación, se realizaron varios intentos entre 1916 y 1922, como los realizados por Schwarzschild, St. John, Evershed, Grebe, Bachen. En ellas se observó la existencia de un corrimiento en el sentido previsto por la teoría, pero su magnitud no era constante de unas rayas a otras y, además, era sólo la mitad del previsto. Ello provocó una fuerte discusión donde los resultados eran interpretados de manera dispar según los autores.⁷⁴ Paul Langevin era mucho más tajante, y en la conferencia que pronunció el 30 de marzo de 1922 ante sus alumnos en presencia de Einstein, afirmó: *"Efectivamente, podemos constatar que las líneas del espectro solar debidas a ciertas sustancias están desplazadas respecto a las líneas de las mismas sustancias emitidas en la Tierra, y que el desplazamiento es exactamente el previsto por la teoría. Es muy pequeño, pero los ópticos tienen los medios para detectarlo y la verificación experimental es perfecta. El desplazamiento de las líneas previsto por la nueva teoría está completamente de acuerdo con los resultados del experimento.*⁷⁵

Si bien los resultados parecían apuntar en la dirección indicada por la teoría de Einstein, no eran lo suficientemente concluyentes como para que fueran esgrimidos incuestionablemente en favor de la relatividad general. Fueron la curvatura de los rayos lumínicos por efecto del campo gravitatorio y el movimiento del perihelio de Mercurio los que jugaron el papel primordial a la hora de inclinar la balanza a favor de la nueva teoría. Decenios más tarde, con

⁷³ EINSTEIN, A.: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, p. 91. En una carta dirigida a Michele Besso, el 12 de febrero de 1915, Einstein ya señala el fenómeno del desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales: "Desde el punto de vista científico, tengo dos bellos resultados que comunicarte: 1. Gravitación. Corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales. Las estrellas dobles espectroscópicas tienen la misma velocidad media según la visual [en el rayo de luz visible]. Las masas de las estrellas se obtienen por las desviaciones periódicas de las líneas [espectrales] según [el efecto] Doppler. La componente de mayor masa [la estrella de masa] debe mostrar un corrimiento medio hacia el rojo de las líneas espectrales respecto a la componente de menor masa. Eso se ha comprobado. Como se puede estimar los radios de las estrellas (según su tipo espectral), resulta una comprobación cuantitativa aproximada de la teoría, que se revela satisfactoria", reproducida en SPEZIALI, P. (ed.): *Albert Einstein correspondencia con Michele Besso. (1903-1955)*, p. 113.

⁷⁴ CABRERA, B.: *Principio de Relatividad...*, pp. 233-234.

⁷⁵ LANGEVIN, P.: "Aspect générale de la théorie de la relativité", *Bulletin scientifique des étudiants de Paris*, nº 2, abril-mayo de 1922, citado en BIEZUNSKI, M.: "Einstein en Paris", *Mundo Científico*, nº 15, 1982, p. 599.

motivo de la Conferencia celebrada en la ciudad de Basilea en conmemoración del Jubileo de la Teoría de la Relatividad, en 1955, J. R. Trumpler presentó el resultado de sus investigaciones sobre el corrimiento hacia el rojo de las bandas espectrales procedentes de la estrella NGC 2264, una *enana blanca*, que al ser 100 veces más pesada que el Sol con sólo un radio 4 ó 5 veces superior tenía un campo gravitatorio muy superior al solar, por lo que el corrimiento hacia el rojo debía ser mucho mayor de acuerdo con la relatividad general. Los cálculos de Trumpler establecían un corrimiento hacia el rojo de 9,8 km. por segundo, con un error estimado de $\pm 12\%$.⁷⁶ Quedaba pues así confirmado el tercer gran resultado previsto por Einstein en 1915.

⁷⁶ Algunos años más tarde fue comprobado experimentalmente el corrimiento hacia el rojo en la Tierra. En 1959, H.J. Hay, J.P. Schiffer, T. E. Cranshaw y P. A. Engelstaff procedieron a medir la frecuencia de la luz procedente de una fuente luminosa que se movía a unos 500 ciclos por segundo alrededor del borde de un cilindro. La aceleración radial experimentada por la fuente de luz se comporta de la misma manera que si estuviese sometida a la acción de un campo gravitatorio, por lo que en correspondencia con lo establecido por la relatividad general se debía producir un desplazamiento de la frecuencia hacia el rojo, los resultados confirmaron tal predicción, concordando casi exactamente con los cálculos previstos por la teoría de la relatividad, con un margen de error de $\pm 2\%$. Un año después, en 1960, R. V. Pound y G. A. Rebka jr., en el laboratorio Lyman de Física de la Universidad de Harvard (EE.UU.), en otro experimento destinado a observar el mismo fenómeno obtuvieron un corrimiento hacia el rojo de cinco partes en un billón, valor que se correspondía con la predicción teórica con un margen de error $\pm 10\%$, TAYLOR, J. G.: *La nueva Física*, Madrid, Alianza, 1984, pp. 193-196.