

El otro Einstein

José Manuel Sánchez Ron

Está muy extendida la creencia de que la carrera como físico creativo de Albert Einstein comenzó a declinar rápidamente a partir de, básicamente, 1916; esto es, poco después de que hubiese dado con la formulación definitiva de la teoría de la relatividad general (1915), el mismo año en que aplicó ésta al conjunto del universo, creando la cosmología relativista como una ciencia exacta, predictiva, y que dedujo la ley de radiación de Planck introduciendo ciertas suposiciones sobre las transición entre estados atómicos (coeficientes de probabilidades espontáneas o inducidas).¹ Según esta visión de la obra einsteiniana, de la lista de trabajos que el genio de la física del siglo XX publicó a partir de entonces, realmente sólo es necesario recordar –por la huella que dejaron en la física posterior– muy pocos; básicamente, aquel (1924) en el que desarrolló la estadística de Satyendra Nath Bose, que él mismo presentó a la comunidad científica, y el que, en colaboración con Boris Podolsky y Nathan Rosen, dedicó a criticar los fundamentos de la mecánica cuántica.² Por supuesto, no se ignora que Einstein continuó investigando y publicando, pero se piensa que además de apenas poseer poco interés, tales trabajos estuvieron viciados por la obcecación del creador de las teorías especial y general de la relatividad, que, visceralmente contrario a los planteamientos y conclusiones obtenidas en la mecánica cuántica (en, más concretamente, la interpretación de Copenhague), se empeñó en el proyecto de desarrollar una teoría unitaria de campos que permitiese explicar, sin prescindir de la continuidad y la predictividad clásicas, los fenómenos de los que se ocupaba la física cuántica.

Es el propósito de este artículo mostrar, muy someramente, lo erróneo de semejante visión de la obra de Einstein, del, para muchos, *otro Einstein*. Además de defender que aunque finalmente no tuviese éxito su empeño “unificador” no fue totalmente baldío, ni, desde luego, ajeno a los procedimientos más rigurosos del método científico, me referiré a sus aportaciones al problema del movimiento en la teoría de la relatividad general, un problema de extraordinaria dificultad cuya importancia no ha hecho sino aumentar con el paso del tiempo.

1. Teorías del campo unificado, matemáticas y “otro Einstein”³

El dominio de aplicación de la teoría de la relatividad general es la interacción gravitacional, pero la gravitación no es la única fuerza que existe en el universo. Hoy creemos que son



Claustro de profesores de la Escuela de Matemáticas del Instituto de Estudio Avanzado de Princeton.

De izda. a dcha.: J. Alexander, M. Morse, A. Einstein, F. Aydelotte, H. Weyl y O. Veblen.

cuatro las interacciones (fuerte, débil, electromagnética y gravitacional) que controlan el universo, pero en la época en la que Einstein la desarrolló únicamente se conocía la existencia de la electromagnética y la gravitacional; todavía no se habían identificado claramente, aunque existiesen indicios de ellas, las interacciones débil y fuerte (de la primera, esos indicios eran, como ahora sabemos, la radiactividad, y en especial la emisión beta, la emisión de electrones; en cuanto a la segunda, los indicios eran más indirectos: tengamos en cuenta que el neutrón no se descubrió hasta 1932; hasta entonces se pensaba que los núcleos atómicos estaban formados por protones y electrones). Era, por consiguiente, natural que Einstein o algún otro se plantease incluir en el marco de la relatividad general también al electromagnetismo; esto es, geometrizar no sólo la fuerza gravitacional sino también la electromagnética. De hecho, Einstein era consciente de que la relatividad general no constituía sino un paso previo hacia una formulación más general. En sus célebres *Notas autobiográficas*, inmediatamente después de escribir las ecuaciones del campo de la teoría de la relatividad general, se refirió claramente a este punto:⁴ “Ni por un momento, por supuesto, dudé que esta formulación [la teoría de la relatividad general] fuese más que una solución provisional para dar al principio de relatividad un expresión cerrada preliminar. Porque en esencia no era *nada más* que una teoría del campo gravitacional, aislado éste, de manera algo artificial, de un campo total de estructura aún desconocida”.

Habida cuenta de que en la relatividad general la geometrización de la gravitación se llevaba a cabo utilizando el elemen-

¹A. Einstein, “Strahlungs –Emission und– Absorption nach der Quantentheorie”, *Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen* **18**, 318-323 (1916); “Zur Quantentheorie der Strahlung”, *Physikalische Gesellschaft Zürich. Mitteilung* **18**, 47-62 (1916), también publicado en *Physikalische Zeitschrift* **18**, 121-128 (1917).

²A. Einstein, “Quantentheorie des einatomigen idealen Gases”, *Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften* (Berlin), pp. 261-267 (1924); S. N. Bose, “Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese”, *Zeitschrift für Physik* **26**, 178-181 (1924); A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”, *Physical Review* **47**, 777-780 (1934).

³Aunque los temas que abordo allí son diferentes al que se trata en el presente artículo, algunos de los puntos que se mencionan en esta sección se desarrollan de manera más completa en: J. M. Sánchez Ron, “Einstein, la relatividad y las matemáticas”, *La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española* **7**, n.º. 1, 153-184 (2004), y *El triángulo mágico: Física, Matemáticas y Filosofía a propósito de Albert Einstein*, lección inaugural del curso 2003-2004, Universidad Autónoma de Madrid (2003).

⁴A. Einstein, “Autobiographisches/Autobiographical notes”, en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Paul A. Schilpp, ed. (Open Court, La Salle, Ill. 1949), pp. 2-94; cita en pp. 74-75. Existe versión en español: A. Einstein, *Notas autobiográficas* (Alianza Editorial, Madrid 1984).

to básico de los espacios de Riemann, el tensor métrico, $g_{\alpha\beta}$, la pregunta era si sería posible utilizarlo también para incluir al electromagnetismo. Y pronto se vio que no, que era preciso ir más allá de los espacios de Riemann, generalizarlos. No sorprendentemente no fue Einstein, ni algún otro físico, quien tomó la iniciativa en este programa, sino matemáticos. La historia es, de hecho, demasiado extensa como para poder siquiera resumirla adecuadamente aquí.⁵ Sí diré que estimulados por la aparición y poder de la teoría de la relatividad general, algunos matemáticos analizaron los fundamentos de la geometría riemanniana. Así, en 1917 Gerhard Hessenberg (1874-1925), catedrático de Matemáticas en la Escuela Técnica de Breslau (Wrocław, Polonia, en la actualidad), y Tullio Levi-Civita (1873-1941), publicaron sendos artículos en los que señalaban que la formulación natural de una geometría riemanniana era basándose en la noción de transporte paralelo infinitesimal de un vector, algo que también hizo el año siguiente el matemático holandés Jan Arnouldus Schouten (1883-1971). Conociendo estos trabajos, en 1918 Hermann Weyl (1885-1955) resaltó que al transportar paralelamente un vector, el valor de su módulo (su “longitud”) depende del camino que se sigue en tal transporte, de manera que para describir un espacio que tomase en cuenta tal propiedad era necesario introducir un nuevo conjunto de funciones; esto es, no bastaba para definirlo con el tensor métrico.

Weyl, un matemático absolutamente permeable a la física y a la filosofía, escogió para presentar sus ideas geométricas un libro titulado: *Raum-Zeit-Materie. Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie (Espacio-Tiempo-Materia. Conferencias sobre relatividad general)*. Cuando Weyl le informó del contenido de sus investigaciones y le envió su libro, Einstein quedó fascinado. “Estoy leyendo con genuino deleite las pruebas de su libro, que voy recibiendo página a página”, le escribía a Weyl el 8 de marzo de 1918. “Es como una pieza sinfónica maestra. Cada palabra tiene su relación con el conjunto, y el diseño de la obra es grandioso. ¡Que magnífico método es el desplazamiento infinitesimal de vectores para deducir el tensor de Riemann! Cuán naturalmente surge todo. Y ahora ha dado usted a luz al niño que yo no pude obtener: ¡la construcción de las ecuaciones de Maxwell a partir de los $g_{\alpha\beta}$!”.⁶

Es cierto que Einstein enseguida encontró puntos (consecuencias físicas) de la teoría de Weyl con los que estaba en desacuerdo, pero no olvidó la lección que este intento implicaba: nuevas matemáticas, generalizaciones de los espacios riemannianos que había utilizado para la relatividad general, podían abrir el camino para resolver el problema que siguiendo a Weyl él también asumió, encontrar una teoría geométrica unitaria de la gravitación y el electromagnetismo.⁷ En el camino se encontró con numerosas dificultades de tipo matemático, que le llevaron a dedicarse al estudio de cuestiones matemáticas (fundamentalmente en el dominio de la geometría) con una dedicación que nunca antes había practicado. De hecho, mientras se repasa la biografía científica de Einstein anterior a 1912-13, cuando explotando el principio de equivalencia que había intro-

ducido en 1907 en su búsqueda de una teoría relativista de la gravitación, llegó a la conclusión de que esa teoría tenía que construirse sobre un marco geométrico dinámico, y por consiguiente curvo, se encuentra que la matemática empleada en sus trabajos científicos (sobre la relatividad especial, la física cuántica o cuestiones —como el movimiento browniano— relacionadas con la existencia de los átomos) era bastante sencilla, accesible a cualquiera con una educación superior en física. Y en 1912-13 dependió de la ayuda que recibió de su amigo y compañero de estudios en el Politécnico de Zúrich, Marcel Grossmann (1878-1936), que ya había intervenido decisivamente en su vida años antes, en 1902, cuando el padre de Grossmann logró que la Oficina de Patentes de Berna emplease al entonces desvalido Albert. Fue Grossmann quien aportó a Einstein su conocimiento de la geometría riemanniana. De hecho, la estructura del artículo que ambos publicaron a finales de 1913, un trabajo que aunque no contuviese la teoría final forma parte de lo más valioso de la historia de la física, *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation (Esbozo de una teoría general de la relatividad y de una teoría de la gravitación)*,⁸ es clara: comenzaba con una “Parte física”, firmada por Einstein, y continuaba con una “Parte matemática”, debida a Grossmann. Lo que aprendió de éste fue, básicamente, suficiente para que Einstein continuase en solitario su programa, que le condujo en noviembre de 1915 a la formulación definitiva de la teoría de la relatividad general, pero todo cambió una vez que se comprometió con las teorías de campo unificado. Como señalé antes, tuvo que estudiar más matemáticas, relacionarse con matemáticos que estaban haciendo avanzar el dominio de la geometría, tuviesen éstos intereses físicos (los casos de David Hilbert y de Weyl) o no (Élie Cartan, con quien se relacionó a propósito de una clase de espacios de Riemann que Einstein estaba utilizando, unos espacios que incluían además de la noción tradicional de curvatura, otra denominada “torsión”, representada por un tensor antisimétrico).⁹ De hecho, a partir de entonces, y hasta el final de su vida, tuvo que tomar ayudantes especialmente dotados para las matemáticas, que le ayudasen con las dificultades técnicas que encontraba. En 1917, tomó como ayudante a Jakob Grommer (1879-1933), un judío ruso que cuando llegó a Gotinga se hizo notar por su extraordinaria capacidad de aprender rápidamente matemáticas. Grommer colaboró con Einstein hasta 1928, cuando consiguió un puesto en Minks, donde falleció. Con él trabajó en la teoría que propuso en 1921 el matemático polaco (asignando a Polonia sus fronteras actuales) y lingüista distinguido Theodor Kaluza (1885-1954). Tras Grommer, durante un año (1928-1929), Einstein recibió la ayuda del físico y matemático húngaro Cornelius Lanczos (1892-1974), un gran admirador de Einstein que ya había publicado trabajos sobre la relatividad, tema al que dedicaría una buena parte de su obra. Entre las cuestiones que abordaron figura la del paralelismo a distancia, pero no llegaron a publicar nada juntos. Después de Lanczos vino Walther Mayer (1887-1948), un matemático natural de Graz

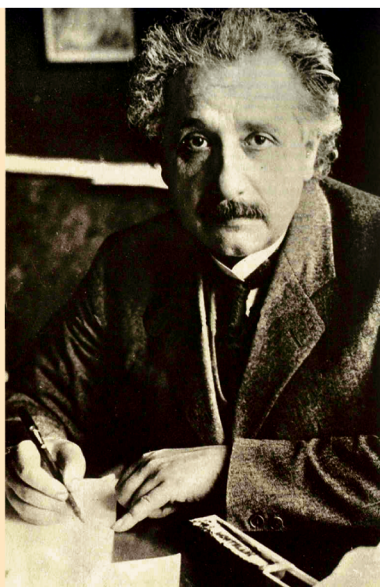
⁵Ver, por ejemplo, Vladimir P. Vizgin, *Unified Field Theories* (Birkhäuser, Basilea 1994).

⁶Citada en Robert Schulmann, A. J. Kox, Michel Janssen y Jozsef Illy, eds., *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 8, Parte B (Princeton University Press, Princeton 1998), pp. 669-670.

⁷Una tarea, por cierto, a la que también se unió pronto Arthur Eddington, que en 1921 profundizó en la línea abierta por Weyl, y cuyas ideas influyeron bastante en Einstein. A. S. Eddington, “A generalization of Weyl's theory of the electro-magnetic and gravitational fields”, *Proceedings of the Royal Society A* **99**, 104-122 (1921).

⁸A. Einstein y M. Grossmann, *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation* (“I. Physikalischer teil” por A. Einstein; “II. Mathematischer teil” por M. Grossmann), 28 págs. (Teubner, Leipzig, 1913). Casi un año más tarde, apareció en la revista científica *Zeitschrift für Mathematik und Physik* **62**, 225-259 (1914).

⁹Ver Robert Debever, ed., *Elie Cartan-Albert Einstein. Letters on Absolute Parallelisms*, 1929-1932 (Princeton University Press, Princeton 1979).



Albert Einstein

(Austria) que había estudiado en el Politécnico de Zúrich, Viena, París y Gotinga. A finales de 1929, cuando acababa de completar, en colaboración con Adalbert Duschek (1895-1957), un texto dedicado a la geometría riemanniana, que aparecería el año siguiente, Mayer comenzó a servir como ayudante de Einstein, naturalmente para ayudarlo con las teorías del campo unificado en las que estaba trabajando. Enseguida, en febrero de 1930, aparecía su primer artículo conjunto: trataba de soluciones estáticas de la teoría del paralelismo a distancia.¹⁰

El ejemplo de Mayer sirve de manera magnífica para mostrar la intensidad de la relación que Einstein mantenía entonces (y básicamente la mayor parte del resto de su vida) con las matemáticas. Cuando Albert y Elsa Einstein abandonaron Europa en su primer viaje a California (30 de diciembre de 1930-marzo de 1931), Mayer acompañó al matrimonio, puesto que el autor de las teorías de la relatividad no deseaba interrumpir su colaboración con él. Lo necesitaba. Y continuaba necesitándole cuando decidió abandonar Alemania, en la que no tenía cabida desde la llegada de Hitler al poder en enero de 1933, y Europa. Recibió muchas ofertas de trabajo (de la Universidad Central de Madrid entre ellas), pero se decidió por el Institute for Advanced Study de Princeton, en Estados Unidos, poniendo, eso sí, la condición *sine qua non*, de que se diese un puesto a Mayer en el Instituto, cuya filosofía era admitir únicamente investigadores extraordinarios. Como es natural, los dirigentes del Instituto, ávidos de contar con Einstein, aceptaron la condición. Un año después (1934), sin embargo, la colaboración finalizó, aunque Mayer se benefició del acuerdo impuesto por Einstein, permaneciendo en Princeton, ya dedicado a la matemática, hasta su muerte.

Tras Mayer llegaron para ayudar a Einstein otros jóvenes especialmente dotados para las matemáticas. Jóvenes como el inglés Banesh Hoffmann (1906-1986), el berlinés de padres rusos Valentine Bargmann (1908-1989), el también berlinés Peter Bergmann (1915-2002), que se doctoró (Praga 1936) con Philip Frank, sucesor de Einstein en la cátedra que éste ocupó en 1911 en la Universidad Alemana de Praga, el polaco Leopold

Infeld (1893-1968), aunque éste (y Hoffmann) le ayudó, como veremos más tarde, no con las teorías del campo unificado sino con el problema del movimiento en relatividad general, el alemán Ernst Gabor Straus (1922-1983) o la física teórica Bruria Kaufman (1918-). De hecho, Einstein pertenecía a la Escuela de Matemáticas del Instituto, cuyo primer claustro estaba formado por, nada más y nada menos, que: Oswald Veblen, Marston Morse, Hermann Weyl, John von Neumann y James Alexander, algunos de los cuales (como Veblen y, por supuesto, Weyl, habían realizado notables contribuciones a la geometría diferencial).

Una vez esbozado el origen y desarrollo de los trabajos de Einstein en la unificación de gravitación y electromagnetismo mediante una teoría unitaria de campos, debo explicar en qué sentido hablo, en el encabezamiento de la presente sección al igual que en el título de este artículo del “otro Einstein”. Pues bien, me refiero a “otro Einstein” no tanto porque se embarcase en un nuevo –y a la postre, contrariamente a sus trabajos precedentes, fallido– programa de investigación, un programa, además, más exigente desde el punto de vista matemático: ya vimos antes que en más de un sentido ese programa estaba presente incluso cuando dio con la formulación de la teoría general de la relatividad, que consideraba como un paso provisional hacia una formulación que incluyese un “campo completo”. Hablo de “otro Einstein” porque al desarrollar ese programa modificó drásticamente su “filosofía científica”. Antes había basado sus investigaciones en consideraciones físicas o en experimentos mentales, en los que demostró ser un maestro consumado; era la física, lo que “se observaba”, la que orientaba sus trabajos (no en vano fue inicialmente un firme seguidor de las tesis de Ernst Mach). Sin embargo, en el curso de sus investigaciones en busca de una teoría del campo unificado sucumbió a la matemática como guía heurística para la física teórica, aunque, bien es cierto, nunca olvidó que el juez último de una teoría física es siempre la experiencia. El Einstein de 1905, el de la relatividad especial, cuantificación de la luz o movimiento browniano nunca habría defendido las ideas que él mismo sostuvo 28 años más tarde, durante la conferencia Herbert Spencer que pronunció en Oxford el 10 de junio de 1933. Manifestó entonces:¹¹

“Si es verdad... que la base axiomática de la física teórica no puede ser extraída de la experiencia y debe ser inventada con libertad, ¿podemos esperar que alguna vez hallemos el camino correcto?... Sin ninguna vacilación responderé que, según mi opinión, existe un camino correcto y que nosotros somos capaces de hallarlo.

Hasta el momento presente nuestra experiencia nos autoriza a creer que la naturaleza es la realización de las ideas matemáticas más simples que se pueda concebir. Estoy convencido de que, por medio de construcciones matemáticas, podemos descubrir los conceptos y las leyes que los conectan entre sí, que son los elementos que proporcionan la clave para la comprensión de los fenómenos naturales. La experiencia puede sugerir los conceptos matemáticos apropiados, pero éstos, sin duda ninguna, no pueden ser deducidos de ella. Por supuesto que la experiencia retiene su cualidad de criterio último de la utilidad física de una construcción matemática. Pero el principio creativo reside en la matemática. Por tanto, en cierto sentido, considero que el pensamiento puro puede captar la realidad, tal como los antiguos habían soñado”.

Era, definitivamente, “otro Einstein”.

¹⁰A. Einstein y W. Mayer, “Zwei strenge statische lösungen der feldgleichungen der einheitlichen feldtheorie”, *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*, pp. 110-120 (1930).

¹¹A. Einstein, *On the Method of Theoretical Physics* (Clarendon Press, Oxford 1933); versión al español: “Sobre el método de la física teórica”, en *Ideas y Opiniones* (Bon Ton, Barcelona 2000), pp. 242-247; cita en pp. 245-246.

2. Un Einstein menos conocido: trabajos sobre el problema del movimiento en relatividad general

El “otro Einstein” del que voy a hablar ahora lo es –esto es, *otro*– no porque hubiese modificado aspectos esenciales de su, digamos, estilo o metodología científicas, como en el caso que he tratado en la sección anterior, sino porque tiene que ver con aportaciones suyas mucho menos conocidas (para muchos prácticamente desconocidas), que llevó a cabo después de 1915-16, cuando, según la leyenda extendida, sus contribuciones a la física dejaron de tener interés, con la excepción de sus ya citados trabajos sobre la estadística introducida por Bose y su artículo sobre los fundamentos de la mecánica cuántica en colaboración con Podolsky y Rosen.

Lejos de ser marginales para la física, los problemas que Einstein abordó en aquellas aportaciones forman parte de un área de gran interés, y también de gran dificultad. Es posible que ese interés no fuese evidente inicialmente para demasiados pero terminó siéndolo, constituyendo en la actualidad problemas todavía no cerrados y de indudable relevancia. El paso del tiempo, que nadie lo olvide, es el mejor –el definitivo– juez histórico.



Leopold Infeld con Albert Einstein

Los trabajos de ese “otro Einstein” forman parte del problema del movimiento en relatividad general; más concretamente, trataron de cuestiones como radiación gravitacional, ecuaciones de movimiento en relatividad general y lentes gravitacionales. Estudiar con un mínimo rigor histórico estos trabajos requeriría de mucho más espacio que el de que dispongo aquí, de manera que lo único que haré será mencionar breve y sucintamente algunos puntos.

2.1. Ondas gravitacionales

Cronológicamente, el primer trabajo que Einstein realizó en el dominio que estoy mencionando tuvo como objetivo la radiación gravitacional; esto es, la cuestión de si existen ondas gravitacionales análogas a las ondas electromagnéticas y qué efecto tienen éstas en sistemas físicos. Habida cuenta de la importancia de las ondas electromagnéticas –y de la, íntimamente asociada a ellas, radiación electromagnética– era difícil que Einstein no dirigiera su atención a su correlato gravitacional una vez que completó la teoría de la relatividad general. Y, efectiva-

mente, no tardó mucho en hacerlo, basándose en la aproximación lineal de las ecuaciones del campo gravitacional: primero, de forma muy sucinta, en 1916,¹² y luego, con mayor cuidado y extensión, en 1918.¹³ “Consideramos”, escribía allí en ese segundo artículo (“Sobre las ondas gravitacionales”), “un sistema mecánico aislado cuyo centro de gravedad coincida permanentemente con el origen de coordenadas. Los cambios en este sistema tendrán lugar tan lentamente y su extensión espacial será tan pequeña que el tiempo de luz [*Lichtzeit*] correspondiente a la distancia entre dos puntos materiales de él puede ser considerada como infinitamente pequeña. Buscamos las ondas gravitacionales del sistema emitidas en la dirección del eje positivo de las x del sistema”.¹⁴

Aun cuando posteriormente se realizarían cálculos más precisos, la visión del problema no ha variado esencialmente de la que se sigue de las conclusiones a las que llegó Einstein en 1918. Tampoco ha variado demasiado la situación observacional: hasta la fecha no hay confirmación *directa* de la existencia de las ondas gravitacionales, a pesar del esfuerzo de algunos científicos, entre los que destacó el estadounidense Joseph Weber.¹⁵ No ha disminuido por ello su interés, como se explica en la siguiente cita, extraída de uno de los textos más recientes de relatividad general:¹⁶ “Uno de los objetivos de alta prioridad de la física gravitacional y astrofísica contemporáneas es detectar directamente la radiación gravitacional. (Por directa queremos decir, 'observando la influencia de la onda gravitacional en cuerpos de prueba', en contraste a observar el efecto indirecto de la pérdida de energía, como en el pulsar binario). Existen sobradas razones para pensar que tal detección se producirá pronto, bien en los observatorios de ondas gravitacionales que ya existen o en los que se proyectan para el próximo futuro. Por supuesto, una vez que detectemos radiación gravitacional, lo que se intentará inmediatamente es extraer información astrofísica útil de las observaciones. Nuestro conocimiento actual del universo fuera del sistema solar proviene casi exclusivamente de la radiación electromagnética, con algunos elementos adicionales de neutrinos y rayos cósmicos; la llegada de la astrofísica de ondas gravitacionales abrirá una ventana completamente nueva en los fenómenos energéticos que tienen lugar en el universo distante”.

2.2 Ecuaciones de movimiento en relatividad general

En la cita anterior se menciona un punto central: es posible detectar las ondas gravitacionales de manera indirecta, detectando la pérdida de energía de un sistema debida a la radiación gravitacional asociada a las ondas gravitacionales. Tal pérdida de energía se identifica a través de la variación de parámetros que caracterizan el movimiento de los cuerpos que forman el sistema físico en cuestión. Estamos hablando, en definitiva, de ecuaciones de movimiento, y puesto que se trata de un fenómeno gravitacional, de ecuaciones de movimiento en relatividad general.

Ha sido mediante un mecanismo de este tipo como se ha detectado la radiación gravitacional. En 1974, Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor descubrieron, utilizando el radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico), un sistema estelar binario,

¹²A. Einstein, “Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation”, *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*, pp. 688-696 (1916); ver pp. 692-696..

¹³A. Einstein, “Über Gravitationswellen”, *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte*, parte I, pp. 154-167 (1918).

¹⁴*Ibid.*, p. 19.

¹⁵Ver su monografía clásica: J. Weber, *General Relativity and Gravitational Waves* (Interscience, Londres 1961).

¹⁶Sean M. Carroll, *Spacetime and Geometry. An Introduction to General Relativity* (Addison Wesley, San Francisco 2004), p. 315.

PSR1913+16, en el que ambos componentes (uno de ellos un pulsar) eran muy pequeños.¹⁷ El período de la órbita era de ocho horas, extremadamente pequeño para estándares astrofísicos, pero el hecho de que una de las estrellas fuese un pulsar, suministraba un reloj muy preciso (el basado en la variación del propio pulsar), con respecto al cual se podía medir el cambio del período del sistema según éste iba perdiendo energía (al radiar gravitacionalmente). Se comprobó que lo que se medía observacionalmente era consistente con la predicción de pérdida de energía mediante radiación gravitacional en relatividad general. Por estos resultados, Hulse y Taylor recibieron el premio Nobel de Física en 1993.

He citado estos hechos para mostrar la importancia que tiene para la física el estudio de las ecuaciones del movimiento –lo que se denomina el “problema del movimiento”– en relatividad general. Pues bien, en la historia de este campo de investigación también figura, de manera destacada, Albert Einstein.

El problema del movimiento en relatividad general es extremadamente complejo, e incluye varios aspectos de los que quiero referirme especialmente a dos. El primero es el de si es necesario postular las ecuaciones del movimiento independientemente de las ecuaciones del campo, tal y como ocurre en, por ejemplo, la electrodinámica maxwelliana, o si están contenidas en (se deducen de) las ecuaciones del campo. El segundo tiene que ver con la obtención y resolución, mediante aproximaciones, de las ecuaciones del movimiento de un sistema de N cuerpos.

En la estructura inicial de la relatividad general, tal y como Einstein la presentó en 1915, las ecuaciones de movimiento (ecuaciones de las geodésicas) se postulaban independientemente del campo. En 1926, con la ayuda de Jacob Grommer, Einstein comenzó a trabajar en la posible conexión entre ecuaciones del campo y ecuaciones del movimiento, produciendo el año siguiente un artículo en el que demostraban la relación entre ambas. Tal y como ellos mismos lo expresaban en la sección final del artículo:¹⁸ “Si en el campo gravitacional se consideran las masas como singularidades, entonces la ley de movimiento está completamente determinada por las ecuaciones de movimiento”, y aquí insertaban la siguiente nota a pie de página: “En el presente artículo esto no se ha demostrado de manera completa más que para el caso del equilibrio”.

Qué entendían por “singularidades” es algo que se explica bastante bien en las ya citadas *Notas autobiográficas* (1949), en donde Einstein se extendió sobre este punto. Después de señalar que “se ha comprobado que la ley del movimiento no puede (ni debe) postularse independientemente, sino que está conteni-

por ellos no se haga nunca singular fuera de los puntos materiales. Estos movimientos son precisamente aquellos que describen en primera aproximación las leyes de Newton. Cabe por tanto decir: las masas se mueven de manera que la ecuación del campo en el espacio exterior a las masas no determina en ningún punto singularidades del campo. Esta propiedad de las ecuaciones de la gravitación está íntimamente relacionada con su no-linealidad, la cual viene condicionada a su vez por el grupo de transformaciones más amplio Cabría hacer, sin embargo, la siguiente observación: si se permiten singularidades en las localizaciones de los puntos materiales, ¿qué justificación existe entonces para prohibir la aparición de singularidades en el espacio restante? La objeción sería válida si las ecuaciones de la gravitación hubiera que contemplarlas como ecuaciones del campo total. Pero, tal y como son las cosas, habrá que decir que el campo de una partícula material podrá contemplarse tanto menos como un campo gravitatorio puro cuanto más se acerque uno a la verdadera localización de la partícula. De tener la ecuación de campo del campo total, habría que exigir que las partículas mismas pudiesen representarse como soluciones de las ecuaciones del campo completas, libres de singularidades en todos los puntos. Sólo entonces sería la teoría general de la relatividad una teoría completa.”

da implícitamente en la ley del campo gravitacional”, Einstein explicaba:¹⁹

No deseo, sin embargo, detenerme más en estas cuestiones, que he mencionado únicamente para indicar algunas de las ideas que sostuvo Einstein sobre el particular a lo largo de las últimas décadas de su vida. En lo que sí quiero hacer hincapié en que su artículo con Grommer marcó el punto de partida de un interés de Einstein por el problema del movimiento que tuvo como momento más destacado el artículo que publicó, en colaboración con Leopold Infeld y Banesh Hoffmann, en 1938 y que contiene un método (conocido como EIH) para obtener soluciones aproximadas del movimiento de N cuerpos, artículo que tuvo como secuela otros dos publicados por Einstein e Infeld en 1940 y 1949.²⁰ También hay que mencionar, aunque su relevancia para el problema del movimiento fuese mucho menor, el que publicó en 1936 con Nathan Rosen sobre el problema de los dos cuerpos en relatividad general, en el que argumentaban que la solución de Schwarzschild representaba al espacio físico como formado por dos “hojas” idénticas, que entraban en contacto a lo largo de una hipersuperficie, a la que llamaban “puente” y que pretendían interpretar como una partícula neutra.²¹

El método EIH ha sido y continúa siendo hasta la fecha una referencia clásica en los estudios del problema del movimiento en relatividad general. Ahora bien, esto no significa que la historia de los trabajos sobre ese problema, al igual que el de la deducción de las ecuaciones del movimiento de las ecuaciones del campo, comenzase (o terminase) con Einstein y sus colaboradores. De hecho, resulta que en prácticamente todos sus trabajos en este campo Einstein se vio adelantado por otros cientí-

“La esencia de esta situación, de suyo tan complicada, cabe visualizarla como sigue. Un único punto material en reposo queda representado por un campo gravitacional que es finito y regular en todas partes menos en el lugar donde reside el punto material; el campo tiene allí una singularidad... Sin embargo, es posible estipular un movimiento de los puntos materiales de suerte que el campo gravitacional determinado

¹⁷R. A. Hulse y J. H. Taylor, “A high sensitivity pulsar survey”, *Astrophysical Journal* **191**, L59-L61 (1974).

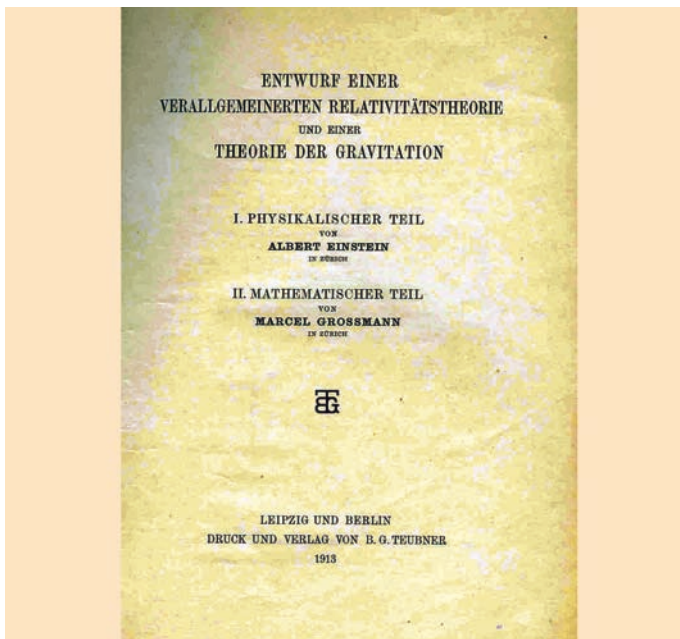
¹⁸A. Einstein y J. Grommer, “Allgemeine Relativitätstheorie und Bewegungsgesetz”, *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte*, pp. 2-13 (1927); p. 13.

¹⁹A. Einstein, “Autobiographisches/Autobiographical notes”, op. cit., pp. 78-81.

²⁰A. Einstein, L. Infeld y B. Hoffmann, “Gravitational equations and the problem of motion”, *Annals of Mathematics* **39**, 65-100 (1938); A. Einstein y L. Infeld, “Gravitational equations and the problem of motion II”, *Annals of Mathematics* **41**, 455-464 (1940), y “On the motion of particles in general relativity theory”, *Canadian Journal of Mathematics* **3**, 209-241 (1949).

²¹A. Einstein y N. Rosen, “Two-body problem in general relativity theory”, *Physical Review* **49**, 404-405 (1936). Algunos aspectos de este artículo se tratan en J. M. Sánchez Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad* (Alianza Editorial, Madrid 1985), pp. 203-206.

ficos –físicos o matemáticos como Weyl, Théophile De Donder, Eddington, Jean Becquerel, Johannes Droste, Lorentz, Myron Mathisson, Lanczos o Levi-Civita–, y aunque Einstein (también en algunos casos Infeld) pudo conocer, o ciertamente estuvo informado, de tales trabajos no los consideró, o mencionó marginalmente. La historia es demasiado compleja y extensa para tratarla aquí, y además ha sido analizada en detalle por Peter Havas,²² únicamente quiero señalar que el comportamiento de Einstein (no el de Infeld) no se debe entender como egoísta o traicionero para con sus colegas. Es bien sabido que con frecuencia Einstein prefería –especialmente una vez que se embarcó en la búsqueda de una teoría relativista de la gravitación– seguir su propio camino sin preocuparse mucho de lo que hicieran o publicaran otros. Semejante comportamiento no condujo a ningún problema de “prioridades” en los casos en los que el genio creador de Einstein brilló a alturas a las que nadie más podía llegar, pero esto no es lo que ocurría con el problema del



movimiento, campo en el que hay que considerar a Einstein como un participante más, aunque ciertamente destacado.

2.3 Lentes gravitacionales

Para finalizar me voy a referir a otro artículo de Einstein que la mayoría desconocen y que trata de unos objetos, que aunque inicialmente se pensó que serían difícilmente observables, con el paso del tiempo han ido creciendo en importancia: las lentes gravitacionales. Estos “objetos” son grandes acumulaciones de masas (como cúmulos de galaxias) que al desviar la luz procedente de, por ejemplo, galaxias situadas tras ellos (con respecto a nosotros) dan lugar a, en lugar de una imagen más o menos

puntual, a un halo de luz, a una imagen “desdoblada”. Fueron observados por primera vez en 1979, cuando Walsh, Carswell y Weyman descubrieron una imagen múltiple de un cuasar en 0957+561.²³ Posteriormente, se han tomado fotografías con el telescopio espacial Hubble de un cúmulo de galaxias situada a unos mil millones de años-luz de distancia en las que además de las galaxias que forman el cúmulo se observan numerosos arcos (trozos de aros) que se detectan con mayor dificultad debido a ser más débiles luminosamente. Estos arcos son en realidad las imágenes de galaxias mucho más alejadas de nosotros que las que constituyen el propio cúmulo, pero que observamos mediante el efecto de lente gravitacional (el cúmulo desempeña el papel de la lente que distorsiona la luz procedente de tales galaxias). Además de proporcionar nuevas evidencias en favor de la relatividad general, estas observaciones tienen el valor añadido de que la magnitud de la desviación y distorsión que se manifiesta en estos arcos luminosos es mucho mayor del que se esperaría si no hubiese nada más en el cúmulo que las galaxias que vemos en él. De hecho, las evidencias apuntan a que estos cúmulos contienen entre cinco y diez veces más materia de la que se ve. ¿Se trata de materia oscura?

El artículo de Einstein en el que exploraba esta posibilidad apareció en 1936.²⁴ No obstante, no respondía a una idea de Einstein sino a la de un científico aficionado de origen checo pero afincando en Estados Unidos, Rudi W. Mandl, al que se le había ocurrido la idea de las lentes gravitacionales y que insistió con Einstein hasta que éste publicó y defendió la idea aunque señalando que “no existen grandes posibilidades de observar este fenómeno”. Lo curioso es que, como han demostrado Jürgen Renn y Tilman Sauer²⁵, Einstein había considerado la misma idea en una fecha tan temprana como 1912, realizando esencialmente los mismos cálculos que un cuarto de siglo después llevó a cabo tras la insistencia de Mandl, aunque entonces no llegase a publicarlos. Obviamente, había olvidado sus antiguas reflexiones. Y la historia no termina aquí, ya que resulta que también llegaron a la misma idea, antes de 1936, publicándola, Arthur Eddington (1920) y el físico ruso Orest Chwolson (1924).²⁶

3. Conclusión

Hemos visto que aunque, ni en originalidad ni en resultados, los trabajos que Albert Einstein publicó tras su último gran logro (la relatividad general) pudiesen competir con aquellos que le han reservado un lugar de privilegio en la historia de la ciencia de todos los tiempos, sí que le habrían adjudicado el respeto de sus colegas. En ciertos aspectos científicos y metodológicos fue “otro” Einstein, y ciertamente “otro” también para los que piensan que su carrera científica terminó, salvo un par de excepciones, hacia finales de la década de 1910, pero aun así

José Manuel Sánchez Ron

está en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid

²²P. Havas, "The early history of the 'problem of motion' in general relativity", en *Einstein and the History of general Relativity*, D. Howard y J. Stachel, eds. (Birkhäuser, Boston 1989), pp. 234-276.

²³D. Walsh, R. F. Carswell y R. J. Weyman, "0957+561 {A}, {B}: twin quasistellar objects or gravitational lens?", *Nature* **279**, 381 (1979).

²⁴A. Einstein, "Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field", *Science* **84**, 506-507 (1936).

²⁵J. Renn y T. Sauer, "Eclipses of the stars", en *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics. Festschrift in Honor of John Stachel*, A. Ashtekar, R. S. Cohen, D. Howard, J. Renn, S. Sarkar y A. Shimony, eds. (Kluwer, Dordrecht 2003), pp. 69-92. Ver, asimismo, Jürgen Renn, Tilman Sauer y John Stachel, "The origin of gravitational lensing: A postscript to Einstein's 1936 *Science* paper", *Science* **275**, 184-186 (1997).

²⁶A. S. Eddington, *Space, Time and Gravitation* (Cambridge University Press, Cambridge 1920), pp. 133-135. O. Chwolson, "Über eine mögliche Form fiktiver Doppelsterne", *Astronomische Nachrichten* **221**, 329-330 (1924). Los pasajes pertinentes de estos trabajos, junto con otros documentos, se reproducen en Jürgen Renn y Tilman Sauer, *Eclipses of the Stars -Mandl, Einstein, and the Early History of Gravitational Lensing*, Max-Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte, Preprint 160 (2000).