

FÍSICA, GRAVITACIÓN Y RELATIVIDAD EN ESPAÑA. DOS DÉCADAS DE PROGRESOS A TRAVÉS DE SU SOCIEDAD CIENTÍFICA

Jesús Fernando Barbero González
Presidente de la Sociedad Española de Gravitación y Relatividad

RESUMEN

La relatividad especial y la relatividad general son dos de los pilares de la física contemporánea. Su formulación por parte de Albert Einstein supuso un cambio radical en nuestra concepción del espacio y el tiempo. La dinámica relativista permitió resolver problemas tan interesantes como el origen de la energía que producen las estrellas y abrió las puertas de la tecnología nuclear. Por último, la relatividad general nos ha proporcionado una descripción muy precisa de la física gravitacional basada en un bello formalismo geométrico que nos ha abierto la posibilidad de estudiar el universo en su conjunto como un sistema físico y comprender algunos de los objetos más exóticos que lo pueblan. En este artículo describiré brevemente los aspectos más importantes de la física relativista, repasaré la historia de la relatividad en España hasta nuestros días y hablaré sobre la **Sociedad Española de Gravitación y Relatividad**.

1. INTRODUCCIÓN

Este año celebramos dos efemérides importantes relacionadas con la historia de la relatividad en España: el centenario de la visita que realizó Albert Einstein a nuestro país en 1923 y el vigésimo aniversario del nacimiento de la Sociedad Española de Gravitación y Relatividad (SEGRE), que agrupa a buena parte de las personas que aquí trabajamos en física gravitacional. Dedicaré este artículo a describir brevemente lo que es la relatividad y repasar la historia de la física relativista española desde sus inicios hasta el vibrante momento presente.

2. ¿QUÉ ES LA RELATIVIDAD?

Durante las primeras décadas del siglo XX tuvieron lugar de forma casi simultánea dos de las revoluciones científicas más importantes de la historia: el nacimiento de la relatividad y la formulación de la mecánica cuántica. Su impacto no se restringe únicamente a los aspectos más fundamentales de la física sino que podemos afirmar que estas dos teorías han configurado de manera dramática el mundo en el que vivimos, dando lugar a aplicaciones tecnológicas que abarcan desde la energía nuclear a la revolución de la electrónica y las telecomunicaciones.

La relatividad especial fue formulada por Albert Einstein en dos famosos artículos publicados en el año 1905 (su *annus mirabilis*). En el primero, titulado *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento), Einstein resuelve una serie de problemas, relacionados con el electromagnetismo y el comportamiento de la luz, que se habían ido acumulando a lo largo del siglo XIX sin que los físicos consiguieran dar cuenta de ellos de manera satisfactoria. Entre las consecuencias más profundas de las celebradas ecuaciones de Maxwell está el hecho de que la luz es un fenómeno electromagnético. Uno de los indicios que llevó a Maxwell a esta sorprendente conclusión fue que aquellas predecían la existencia de ondas que se propagan a una velocidad, determinada por

ciertas constantes de la teoría (la permitividad y la permeabilidad del vacío), que coincide con gran precisión con la velocidad de la luz. Una de las conclusiones que extrajeron los físicos de este hecho era la existencia de un sistema de referencia absoluto, el medio en el que se propaga la luz, al que se denominó *éter lumínico*. Esta conclusión era perfectamente natural desde la perspectiva de la física galileana/newtoniana, sin embargo, las propiedades físicas de ese medio tenían que ser, por fuerza, muy particulares.

A partir del estudio de otros fenómenos ondulatorios, como el sonido, se sabía que la velocidad de propagación de una onda en un medio material depende de algunas propiedades de este, en particular de su rigidez y de su densidad. Cuanto más rígido o menos denso es un medio mayor es la velocidad de propagación de las ondas en él. Teniendo en cuenta que la velocidad de la luz es varios órdenes de magnitud mayor que las velocidades de los otros fenómenos ondulatorios conocidos quedaba claro que las propiedades físicas del éter tenían que ser muy particulares, sobre todo porque esta sustancia tendría que llenar el vacío por el que se propaga la luz sin interferir de manera alguna con el movimiento de los objetos materiales (por ejemplo, los cuerpos celestes). Durante el siglo XIX algunos de los más avezados físicos experimentales se afanaron por estudiar el movimiento de la luz con el propósito de detectar el misterioso *éter* y estudiar sus propiedades. Estos esfuerzos culminaron en el famoso experimento de Michelson y Morley del año 1887, cuyo propósito era detectar diferencias en la velocidad de propagación de la luz en direcciones perpendiculares debidas al movimiento de la Tierra con respecto al éter. El resultado negativo de este experimento sumió a la física de finales del siglo XIX en una profunda crisis.

Pese a que se propusieron algunas soluciones *ad hoc* para dar cuenta de ese resultado, el enigma del éter no quedó resuelto de forma definitiva hasta el trabajo de Einstein que he mencionado anteriormente. En él se formulan los dos postulados básicos de la relatividad especial: el llamado principio de relatividad, que establece que las leyes de la física toman la misma forma en todos los sistemas inerciales de referencia y el postulado de la constancia de la velocidad de la luz. Según este último, la velocidad de la luz medida en dos sistemas de referencia es exactamente la misma independientemente de la velocidad relativa de uno con respecto al otro. A partir de sus postulados Einstein deduce las leyes de transformación de los campos eléctricos y magnéticos y llega a la conclusión de que un campo puramente eléctrico para un observador ha de ser percibido como una combinación de campos eléctricos y magnéticos por parte de otro que se mueva con respecto a él.

Entre las consecuencias cinemáticas más importantes del planteamiento de Einstein hay que destacar las relacionadas con el papel del tiempo y el concepto de simultaneidad. Mientras que en la física clásica el tiempo era absoluto y afectaba a todos los objetos físicos de la misma manera, en la relatividad especial se convierte en un tiempo propio, podríamos decir que personal e intransferible, que afecta a cada observador físico de forma diferente. Una consecuencia inmediata de este hecho es que si dos observadores sincronizan sus relojes en un momento y un lugar dados, al comparar lo que marcan en un instante posterior, obtendrán resultados genéricamente diferentes y condicionados por su movimiento relativo. De manera análoga, el espacio deja también de ser absoluto, lo que tiene consecuencias directas cuando intentamos medir distancias en un contexto relativista. Otras consecuencias muy llamativas de los postulados de Einstein son el hecho de que ningún objeto material pueda moverse a la velocidad de la luz (o cualquier velocidad superior) en ningún sistema de referencia inercial y el hecho, relacionado con esto último, de que la ley relativista de composición de velocidades difiera significativamente de la correspondiente ley galileana.

El segundo artículo sobre relatividad que Einstein publicó en 1905 contiene la que, sin duda, es la ecuación más conocida de la física contemporánea: la celebrada, y en ocasiones mal interpretada, $E=mc^2$, que establece lo que, de manera algo coloquial, conocemos como la equivalencia entre masa y energía. En este artículo titulado: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* (¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?) Einstein se apoya en el hecho de que las ondas electromagnéticas transportan energía y momento lineal (¡los rayos del Sol no solo nos queman, también nos empujan!) para llegar a la conclusión sorprendente de que en cierto sentido la masa de un cuerpo puede transformarse en energía y viceversa. Desde un punto de vista conceptual lo que hizo

Einstein fue fundir los conceptos de energía y momento y redefinir la masa de manera que para sistemas compuestos deja de ser simplemente la suma de las masas de sus constituyentes.

Cuando se aplican las reglas de la dinámica relativista al estudio de la interacción de los cuerpos, por ejemplo, en el contexto de la física nuclear, se entiende cuál es la procedencia de las ingentes cantidades de energía que liberan las estrellas y otros objetos astronómicos. La tecnología nuclear se basa también en esta dinámica relativista que Einstein formuló. El que la energía que se intercambia en las reacciones químicas sea mucho menor que la producida en las reacciones nucleares puede ser entendido de forma cuantitativa a partir del balance de masas en los procesos involucrados.

Antes de pasar a describir *la otra* relatividad quisiera hacer un inciso relacionado con la interpretación matemática de la relatividad especial. En su formulación original Einstein adoptó una perspectiva anclada de manera firme en el concepto de sistema de referencia. Lo que le interesaba fundamentalmente era entender la relación entre las descripciones de los fenómenos físicos para observadores distintos. Un cambio radical de punto de vista con respecto a esta cuestión se debió al matemático Hermann Minkowski, de quien el propio Einstein fue alumno en Zúrich. En esencia, Minkowski encontró la forma de entender la cinemática relativista desde un punto de vista *geométrico* basado en la idea de combinar los conceptos de espacio y tiempo —asociados con observadores— en un ente geométrico absoluto conocido como espacio-tiempo. No solo eso, Minkowski comprendió que los fenómenos relativistas admitían una descripción particularmente simple en términos de objetos geométricos definidos en ese espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Por ejemplo, en lugar de ver los campos eléctricos y magnéticos como objetos físicos separados, los interpretó como componentes (en un sentido análogo a las de un vector) de un objeto geométrico que conocemos como tensor campo electromagnético.

De forma análoga, la energía y el momento lineal asociados con una partícula puntual pasaron a ser interpretados como las componentes de un vector en el espacio-tiempo (lo que conocemos como *cuadrimento*). Por último, Minkowski introdujo su famosa métrica, que nos permite definir el intervalo relativista: una relación, similar a la distancia, que existe entre cualquier par de sucesos. Pese a nuestra inevitable falta de intuición geométrica más allá de las tres dimensiones del mundo que nos rodea, desde el punto de vista matemático la geometrización de la relatividad especial fue el punto culminante del trabajo de Einstein y un precursor imprescindible de la relatividad general de la que me ocuparé ahora.

3. LA RELATIVIDAD GENERAL

El alcance del postulado de la relatividad de Einstein es realmente ambicioso porque se aplica a *todas* las leyes de la física. Como hemos visto al hablar de la relatividad especial, el primer trabajo de Einstein de 1905 se ocupaba de la electrodinámica de los objetos en movimiento. En él Einstein no modifica la teoría del electromagnetismo, sino que introduce una serie de cambios conceptuales relacionados con el significado del espacio y del tiempo que permiten resolver los problemas planteados por la propagación de la luz en el siglo XIX. Sus planteamientos muestran, por ejemplo, que es posible prescindir del éter lumínico.

El electromagnetismo de Maxwell fue la primera teoría de campos relativista, de hecho, es interesante señalar que lo era incluso antes de que se formulara la relatividad especial. Una pregunta natural que se plantearon los físicos, y muy en especial el propio Einstein, fue la siguiente: ¿cómo podemos describir la gravitación newtoniana de manera que también sea compatible con el principio de relatividad?

A finales del siglo XIX la teoría de la gravitación de Newton era uno de los pilares de la física. Los cálculos detallados que los astrónomos realizaban para determinar las órbitas de los objetos que pueblan el Sistema Solar se basaban en esta ley y describían su movimiento con total precisión. Las escasas anomalías observadas podían ser explicadas de forma más o menos natural apelando a la

existencia de objetos planetarios no descubiertos. Nada parecía indicar que fuera necesario reemplazar la teoría de Newton por otra mejor. Sin embargo, la ley de la gravitación universal es claramente incompatible con la relatividad especial porque la interacción gravitatoria se propaga con velocidad infinita. Esto es así porque la fuerza entre dos masas depende de su posición en un instante de tiempo dado (recuérdese que el tiempo de la física newtoniana es absoluto).

La relatividad general es la teoría relativista de la gravitación. No este el lugar para discutir qué es más general en esta teoría, pero es necesario destacar que no se trata simplemente de una extensión de la relatividad especial a sistemas de referencia no inerciales (es decir, acelerados). Para buscar la teoría relativista de la gravedad parecía natural apoyarse en el electromagnetismo, que como he comentado es compatible con los postulados de la relatividad especial. De hecho, en su momento algunos físicos pensaron que, recurriendo a campos de naturaleza diferente a la del campo electromagnético, sería quizá posible encontrar una teoría relativista apropiada. Ninguno de los intentos que físicos y matemáticos hicieron en esta dirección tuvo éxito.

La solución la halló el propio Einstein basándose en las ideas propuestas por Minkowski y en su perspectiva geométrica. Su teoría se basó en permitir que la geometría del espacio-tiempo fuera distinta de la descrita por la métrica de Minkowski y que esta geometría estuviera determinada por el contenido de materia y energía del espacio-tiempo a través de unas ecuaciones de campo apropiadas. Tras años de esfuerzos, a finales de 1915 Einstein encontró la formulación correcta que publicó en su artículo titulado *Die Feldgleichungen der Gravitation* (Las ecuaciones de campo de la gravitación). Para ello tuvo que emplear herramientas matemáticas que no formaban parte del bagaje técnico de los físicos, en particular la geometría diferencial, que fue desarrollada durante el siglo XIX y principios del XX por matemáticos de la talla de Gauss, Riemann, Christoffel, Beltrami, Bianchi, Ricci-Curbastro o Levi-Civita. En esta tarea recibió la ayuda de su amigo el matemático Marcel Grossmann.

Einstein fue capaz de demostrar que en circunstancias ordinarias (velocidades relativas bajas y concentraciones de masa pequeñas), su teoría hacía predicciones equivalentes a las de la gravitación universal, aunque evitaba los problemas asociados con esta última (cuestión más sutil de lo que parece a primera vista). Sin embargo, también hacía algunas predicciones incompatibles con la teoría de Newton. Mencionaré aquí dos de ellas: la rotación anómala del perihelio de Mercurio y la desviación de la luz por el Sol en una cuantía incompatible con las predicciones de la física clásica. Con respecto a la primera, en este punto tengo que volver a lo que mencioné antes sobre la dinámica del Sistema Solar y los cálculos de los astrónomos para predecir la posición de los planetas. Aunque es cierto que el objeto que domina el movimiento planetario es el Sol, la interacción gravitatoria mutua entre los planetas introduce perturbaciones que alteran la forma de sus órbitas.

Aunque con una aproximación razonable podemos afirmar que éstas son elípticas, una observación detallada nos muestra que esto no es así. El planeta que es más sensible a este tipo de influencia, y que manifiesta las desviaciones más importantes con respecto a una órbita elíptica kepleriana, es Mercurio. El astrónomo francés Urbain Le Verrier fue el primero en darse cuenta de que las perturbaciones debidas al resto de los planetas del Sistema Solar no bastaban para explicar las características de su órbita. En este punto es pertinente apuntar que, mediante un análisis similar, Le Verrier fue capaz de predecir la existencia del planeta Neptuno, que fue descubierto por el astrónomo alemán Johann Galle muy cerca de la posición calculada. Le Verrier sabía de lo que hablaba. Para dar cuenta de las anomalías de la órbita de Mercurio, postuló la existencia de un planeta —Vulcano— que no habría podido ser observado por su cercanía al Sol.

Nada había cambiado a este respecto cuando Einstein dio los toques finales a la relatividad general en 1915, por lo que intentó comprobar si su teoría podía explicar las observaciones sobre Mercurio. Constató que, en efecto, dentro de los márgenes de error, su nueva teoría daba cuenta *perfectamente* de las irregularidades orbitales observadas. El otro efecto que he mencionado anteriormente, la desviación de los rayos de luz por la masa del Sol en una magnitud incompatible con la predicción newtoniana fue corroborado en 1919 por dos expediciones astronómicas a Sobral, en

Brasil, y a la isla del Príncipe, en el Golfo de Guinea. Estas observaciones fueron llevadas a cabo bajo la dirección de los astrónomos británicos Arthur Eddington y Frank Dyson, a la sazón, Astrónomo Real.

La relatividad general hace otras muchas predicciones: algunas de ellas, como el corrimiento al rojo gravitacional de la luz (un aumento de su longitud de onda de la luz emitida por un objeto masivo, como una estrella, al alejarse de ella) o el retardo temporal de Shapiro (que afecta al tiempo que un rayo de luz tarda en llegar a la Tierra desde un planeta si pasa cerca del Sol) pudieron ser comprobadas experimentalmente, o mediante el uso de sondas espaciales, en la segunda mitad del siglo XX. Otras predicciones, algunas de ellas realmente espectaculares, han sido más difíciles de comprobar, pero han abierto auténticas ventanas al universo por las que hemos empezado a mirar muy recientemente. Entre ellas me gustaría destacar la existencia de los agujeros negros —“objetos” tan densos que ni siquiera la luz puede salir de ellos— y las lentes gravitatorias, que deforman las imágenes de los astros que pueblan el universo primitivo y nos permiten observar, como si se tratara de telescopios de dimensiones astronómicas, detalles que estarían siempre fuera del alcance de nuestros instrumentos.

Otra consecuencia realmente sorprendente de la relatividad general es la existencia de radiación gravitatoria. En este sentido esta teoría hace una predicción análoga a la que en su momento hizo el electromagnetismo de Maxwell. Las ondas gravitatorias son extremadamente difíciles de detectar —no lo conseguimos hasta 2015— pero nos permiten observar el universo de una forma completamente distinta a todas las existentes hasta hace unos años. Con su ayuda podemos estudiar fenómenos como las colisiones de agujeros, que no podríamos ver de otra manera. Hemos entrado en la era de la astronomía gravitatoria.

Quizá la aplicación más impresionante de la relatividad general es al estudio de la física del universo. Las observaciones de la distribución de materia en el cosmos nos dicen que es homogénea e isotrópica. A partir de este hecho es posible averiguar cuál es la geometría a gran escala del universo utilizando las ecuaciones de Einstein de la relatividad general. Esta geometría es realmente interesante porque presenta una *singularidad* inicial que marca un límite que podemos interpretar como el principio de todo. Combinando las soluciones cosmológicas de las ecuaciones de Einstein con las modernas teorías físicas sobre las interacciones fundamentales, la física estadística y la física nuclear, es posible determinar con gran precisión las condiciones del universo primitivo y calcular su influencia en la composición y estructura del universo actual. De esta manera se ha conseguido formular un modelo estándar (la conocida popularmente como teoría del *Big Bang*) que da cuenta de todas las observaciones y del que la relatividad general es un ingrediente fundamental.

Para terminar, quisiera mencionar por su importancia práctica una última aplicación de la relatividad general (también de la relatividad especial): el GPS. Este sistema de satélites artificiales, que nos permite determinar posiciones sobre la Tierra con precisiones de centímetros, se basa en el uso de relojes atómicos de alta precisión que permiten determinar la posición de receptores adecuados situados en la superficie de la Tierra. Para que sea posible alcanzar la precisión necesaria es imprescindible tener en cuenta las correcciones relativistas debidas a la velocidad a la que se mueven los satélites con respecto al suelo y los efectos relacionados con los cambios de la longitud de onda de las señales de radio emitidas por ellos debidos a su posición en el campo gravitatorio de la Tierra. Si en el momento de haber puesto en servicio este sistema no hubiéramos conocido las dos teorías de la relatividad, habríamos tenido que inventarlas...

4. LA RELATIVIDAD LLEGA A ESPAÑA

Aunque en la extensión de este artículo no me es posible hacer una revisión exhaustiva de la historia de la relatividad en nuestro país, para poner en perspectiva la situación actual de esta importante rama de la física y el nacimiento de la Sociedad Española de Gravitación y Relatividad tengo que decir algo sobre sus hitos más importantes. Aquellas personas interesadas en esta apasionante cuestión podrán encontrar abundante información en la excelente tesis doctoral de Pablo Soler Ferrán titulada: *La teoría de la relatividad en la física y matemática españolas: un capítulo de la historia de la ciencia en España*.

Los primeros físicos españoles que se ocuparon de la relatividad fueron Esteban Terradas, que da nombre al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), y Blas Cabrera. A ellos se deben las primeras conferencias (1908) en las que se mencionó en España la entonces nueva teoría de la relatividad. Aunque inicialmente pensaron que ésta se circunscribía exclusivamente al ámbito del electromagnetismo, pronto comprendieron su alcance real para toda la física. Entre los años 1918 y 1919, el físico y matemático José María Plans había empezado a escribir también sobre relatividad, preocupándose de sus aspectos matemáticos.

En este sentido cabe destacar que en 1924 publicó sus *Nociones de cálculo diferencial absoluto y sus aplicaciones*, que es la primera obra en español que trata sobre cálculo tensorial y lo que ahora conocemos como geometría diferencial, imprescindible para la formulación de la relatividad general. También publicó en 1921 su libro *Nociones fundamentales de mecánica relativista*. Plans dirigió la tesis doctoral del matemático Pedro Puig Adam, titulada *Resolución de algunos problemas elementales en mecánica relativista restringida*. Si bien es muy destacable el nivel técnico de la meritoria obra de Plans, la tesis de Puig Adam, como el propio título indica, se ocupaba de cuestiones sencillas muy alejadas de los problemas que en 1922 estudiaban los físicos teóricos más relevantes en el campo de la relatividad. Otros científicos, como Pedro Carrasco o Enrique de Rafael, se ocuparon también de algunos aspectos experimentales u observacionales de la relatividad y publicaron análisis sobre estas cuestiones.

5. EINSTEIN EN ESPAÑA: ¿UNA OCASIÓN PERDIDA?

Cualquier intento, por sumario que sea, de relatar la historia de la relatividad en España tiene que hacer mención a la visita que hizo Albert Einstein a nuestro país en 1923. En ese momento Einstein era una celebridad mundial y su visita generó unas expectativas a la altura de la magnitud de su figura científica. Como he mencionado anteriormente la confirmación de la desviación por el Sol de los rayos de luz procedentes de estrellas lejanas por parte de Eddington y Dyson, que ocupó la portada de importantes diarios de la época, convirtió a Einstein en una celebridad internacional. A partir de ese momento viajó de forma continuada por todo el mundo invitado por las más prestigiosas instituciones académicas y científicas. Desde el año 1920 Einstein recibió invitaciones para visitar España por parte de algunos de los científicos más prominentes de la época, como Esteban Terradas y Julio Rey Pastor. El propio Santiago Ramón y Cajal apoyó la iniciativa de Rey Pastor en nombre del Ministro de Instrucción Pública. Estos esfuerzos culminaron con éxito aunque, debido a la sobrecargada agenda de Einstein, la visita no se produjo hasta finales de febrero de 1923. Einstein repartió la mayor parte de su tiempo entre Barcelona y Madrid. En ambas ciudades impartió conferencias sobre relatividad —tanto la restringida como la general— a las que asistió un numeroso público y una parte relevante de la intelectualidad de la época.

Para poner en contexto el impacto científico de la visita de Einstein es necesario comentar brevemente la situación de la física española en los albores del siglo XX. Aunque, sin duda, las primeras décadas de ese siglo fueron un periodo de expansión de la ciencia española, en particular de la física, la situación general distaba mucho de ser ideal. Entre los años 1910 y 1937 Blas Cabrera fue director del Laboratorio de Investigaciones Físicas de Madrid, dedicado fundamentalmente a la física experimental. Por este laboratorio pasaron muchos de los físicos españoles más prominentes de la época. Entre ellos, el espectroscopista Miguel Catalán, descubridor de los multipletes electrostáticos, Arturo Duperier, experto en rayos cósmicos, el químico-físico Enrique Moles o Julio Palacios, que había trabajado en física de bajas temperaturas en el laboratorio de Heike Kamerlingh-Onnes en Leyden. Estos científicos recorrieron Europa y trajeron a España los conocimientos que allí adquirieron.

La situación de la física teórica española era, sin duda, mucho peor: podemos afirmar sin temor a equivocarnos que estaba en mantillas. De hecho, ninguno de los físicos y matemáticos de la época hizo contribuciones relevantes en esta área, pese al interés, mencionado en el apartado anterior, que algunas notables figuras prestaron a los problemas de la física candentes en aquel momento. Esto es particularmente descorazonador si tenemos en cuenta los cambios revolucionarios en las teorías físicas que tuvieron lugar durante las tres primeras décadas del siglo XX. Una de las consecuencias de este

lamentable estado de cosas es el relativamente escaso impacto que causó la revolución relativista entre los científicos españoles, al menos en comparación con el que tuvo en las potencias científicas de la época.

Como era esperable, en este contexto pocos científicos podían entender razonablemente las conferencias de Einstein, aunque queda constancia de que algunos de los asistentes formularon preguntas interesantes, relacionadas, por ejemplo, con la existencia de cuerpos rígidos en relatividad. Cabe afirmar sin temor a equivocarse que, pese al indudable éxito de público reflejado en la prensa de la época, no parece que mucha gente se enterara de lo que dijo Einstein, que impartió sus conferencias en francés y alemán e insistió en contar con una pizarra para dar detalles matemáticos sobre sus teorías. Un párrafo de una noticia del diario *ABC* del día 6 de marzo de 1923 lo dice todo:

“La segunda conferencia de Einstein [...] resulta absolutamente inaccesible, aún para un público de cultura extensa”

Sin duda Einstein disfrutó de su estancia en tierras españolas —siendo persona de gran interés por la cultura, no desaprovechó la oportunidad de visitar varias veces el Museo del Prado y viajar a Toledo— y con encomiable deferencia se esforzó por transmitir lo más importante de su trabajo científico.

Diez años después de la visita de Einstein se produjo un acontecimiento que pudo haber tenido enormes consecuencias para la física española. En 1933 el Consejo de Ministros del Gobierno de la República aprobó la creación de una cátedra extraordinaria para Albert Einstein en la Universidad de Madrid que éste aceptó. Sin embargo los trámites para su venida a España se alargaron hasta 1935 y ante el deterioro de la situación política que desembocó en la Guerra Civil la iniciativa no prosperó.

6. DE LA POSGUERRA A LOS SETENTA: LA TRAVESÍA DEL DESIERTO

Tras la visita de Einstein, el desastre de la Guerra Civil, que condenó al exilio a una parte muy significativa de los científicos que habían destacado en las primeras décadas del siglo XX, dejó a la física española en un estado lamentable. Para colmo, el aislamiento que siguió al final de la Segunda Guerra Mundial no favoreció la llegada a nuestro país de los enormes avances científicos que se produjeron a partir de 1945. Nada bueno proporcionó la autarquía a la física teórica española y, desde luego, muy poco a la difusión de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, los pilares más importantes de la física contemporánea.

Esto no significa que nadie se interesara por la relatividad en España ni que entre la pequeña comunidad de físicos y matemáticos que prestaron atención a esta materia no hubiera quien entendiera cabalmente sus aspectos más importantes, al menos por lo que respecta a la relatividad especial. Hay que tener en cuenta que en la década de los cincuenta del siglo pasado ya se habían formulado de manera satisfactoria teorías relativistas que hacían predicciones enormemente detalladas que fueron corroboradas experimentalmente. Entre ellas cabe destacar la electrodinámica cuántica, una teoría cuántica de campos *relativista*, o la física nuclear en las que la dinámica relativista desempeña un papel central. Dicho con otras palabras, a mediados del siglo veinte la confirmación experimental de la relatividad especial era apabullante. Era imposible ignorar este hecho.

La situación de la relatividad en España no era buena. Sirva de ejemplo que en aquella época, en la que insisto, las consecuencias más importantes de la relatividad especial habían sido confirmadas de manera inequívoca, Julio Palacios —uno de los pocos físicos con alguna influencia que quedó en España y apoyó a Franco— se había embarcado en una fútil cruzada antirrelativista. Por dar una pincelada rápida sobre su posición con respecto a la relatividad cito aquí un párrafo que aparece en la solapa de su libro de 1960 titulado *Relatividad, una nueva teoría*:

“El que la teoría de Einstein no fuese incluida desde su aparición entre los estudios básicos, ha de atribuirse a la desproporción entre sus grandes dificultades lógicas, que eran la causa de que fuese

rechazada por prestigiosos físicos y filósofos, y su escasa utilidad científica, incomparablemente menor que su coetánea la teoría cuantística de Planck.”

Esta actitud de Palacios fue contestada por algunos físicos españoles. Entre ellos destaca Ramón Ortiz Fornaguera, que fue jefe de la División de Física Teórica de la Junta de Energía Nuclear y traductor —directamente del ruso— de los libros del celebrado Curso de Física Teórica de Landau y Lifshitz. Él, en colaboración con Esteban Terradas, publicó en 1952, dos años después de la muerte de este último, un libro titulado *Relatividad* en el que se tratan con rigor multitud de aspectos teóricos, experimentales, observacionales y de interpretación, tanto de la relatividad especial como de la general. En estas controversias se vieron involucrados, en el bando ortodoxo, otros físicos y científicos de la época, entre los que me gustaría mencionar a Luis Ruiz de Gopegui, que fue responsable de las actividades de la NASA en España en la época dorada de la investigación espacial que culminó con la llegada a la Luna del Apollo XI.

La realidad es que en los años sesenta los físicos españoles habían comenzado, tímidamente al principio y con mayor intensidad según progresaba la década, a formarse en el extranjero y a participar en algunos de los campos punteros de la física fundamental, en particular en física de partículas y teoría cuántica de campos. Para estos investigadores, como para la inmensa mayoría de los físicos teóricos del mundo, la relatividad especial era un ingrediente importante —y en la práctica muy poco controvertido— de su trabajo.

Para hablar sobre la situación de la relatividad general en España en esa época, hay que entender cuál era su estado en el resto del mundo. Tras el impacto inicial de esta teoría y su espectacular confirmación observacional, podemos afirmar que sufrió un periodo de letargo que se prolongó hasta bien entrada la década de los cincuenta. Durante aquellos años solo un grupo reducido de científicos se ocupó de ella. Para la mayor parte de los físicos se trataba de una teoría de enorme complejidad formal que, en la práctica, se limitaba a introducir pequeñas correcciones en las predicciones de la gravitación newtoniana. Es interesante señalar también la confusión que reinó durante décadas por lo que respecta a algunos de sus elementos más importantes, como por ejemplo la existencia de radiación gravitacional, asunto sobre el que el propio Einstein cambió de opinión varias veces. En aquellas horas bajas la relatividad general ni siquiera era percibida por la comunidad científica como un campo independiente de investigación. Esto se reflejaba en varios hechos que dificultaban su difusión y desarrollo, en particular la falta de revistas técnicas dedicadas a esta materia o de congresos y conferencias especializados.

La situación cambió de manera drástica como consecuencia del aumento de financiación que la física teórica experimentó a mediados de la década de los cincuenta, sin duda consecuencia de sus aportaciones al esfuerzo bélico durante la Segunda Guerra Mundial y a la Guerra Fría que la sucedió. En ese entorno favorable, diversos centros de investigación del mundo, principalmente en Europa y Estados Unidos, pusieron en marcha programas de investigación sobre distintos aspectos de la relatividad general. También entonces se celebraron los primeros congresos y conferencias internacionales sobre esta materia, el primero en Berna en 1955, con motivo de los cincuenta años de la relatividad especial, seguido por otros —de memoria casi legendaria— como el de Chapel Hill de 1957, Royaumont en 1959 o el de Varsovia/Jablonna de 1962, en los que participaron algunos de los físicos teóricos más importantes del siglo XX. Desde entonces, se han seguido celebrando de manera periódica y hasta nuestros días congresos sobre relatividad general. Uno de ellos, la *Vigésima segunda conferencia internacional sobre relatividad general y gravitación*, tuvo lugar en Valencia en julio de 2019. En palabras de Clifford Will podemos afirmar que en los años cincuenta se produjo el Renacimiento de la relatividad general que desembocó en la Edad de Oro que vivimos ahora.

Con el inevitable retraso, debido al aislamiento que he mencionado anteriormente, la pequeña comunidad española dedicada a la física teórica comenzó a participar de este renovado auge de la relatividad general. En 1965, en el primer encuentro de físicos teóricos que se celebró en Santander, participó Lluís Bel, que desarrollaba su tarea científica en Francia y a quien podemos considerar como

el padre de la relatividad general en España. Bel es el primer científico español que hizo aportaciones importantes a la relatividad general, en particular es bien conocido el tensor de Bel-Robinson, que proporciona una definición local de la energía del campo gravitatorio (“super-energía”), con propiedades físicas relevantes (ser positivo definido y anularse solo para métricas Ricci-planas) así como su trabajo en ondas gravitatorias, cosmología y mecánica cuántica relativista.

Parafraseando a José María Martín Senovilla, Catedrático del Departamento de Física en la Universidad del País Vasco y renombrado experto mundial en relatividad general, si contemplamos el “árbol genealógico doctoral” que Bel encabeza veremos que en sus ramas aparecen casi todas las personas que investigan sobre este tema en España. Aunque Bel es, sin duda, el representante más conocido de aquella época heroica hubo otros físicos, entre ellos Lluís Mas y Alfonso Capella, que hicieron sus doctorados en Francia y contribuyeron también a poner en marcha la investigación española en el campo de la relatividad general.

7. CINCUENTA AÑOS DE EXPANSIÓN DE LA RELATIVIDAD GENERAL ESPAÑOLA

Entre los años 1971 y 1973 Lluís Bel se incorporó al Departamento de Física Teórica de la recién nacida Universidad Autónoma de Madrid. En el corto periodo de tiempo que pasó en ella sembró las semillas de lo que posteriormente se convertiría en una comunidad científica pequeña pero activa y dinámica, que en el momento presente cuenta con destacados especialistas en física gravitacional cuyos trabajos abarcan desde los aspectos matemáticos a cuestiones relacionadas con las ondas gravitacionales, campo de enorme actualidad y trascendencia. No hay que olvidar tampoco a los destacados grupos que se dedican a la relatividad general numérica, la astrofísica y cosmología relativistas y la gravedad cuántica.

Además de los citados Bel, Mas y Capella, entre los primeros investigadores que en los años setenta se interesaron por problemas relacionados con la relatividad general en sus muchas vertientes hay que citar a Enrique Álvarez, Javier Chinae, José Gracia Bondía, Jesús Ibáñez, Jaime Julve, Ramón Lapiedra, Jesús Martín, Joaquín Olivert, José Manuel Sánchez Ron, Alfredo Tiemblo y Enric Verdaguer, que llegado el momento pusieron en marcha sus propios grupos de investigación tras realizar estancias postdoctorales en importantes centros extranjeros. Hay que señalar, además, que otros importantes físicos teóricos españoles, como Luis Boya, Alberto Galindo y Adolfo de Azcárraga, que comenzaron a investigar en los años sesenta, dedicaron también parte de su actividad científica al estudio de cuestiones relacionadas con la relatividad general.

Un hito relacionado directamente con la figura de Bel es el nacimiento de los Encuentros Relativistas Españoles (ERE), convertidos en la actualidad en los Encuentros Relativistas Españoles y Portugueses (EREP), que él puso en marcha en 1976 con ayuda de algunos de sus colaboradores más directos. En el tiempo transcurrido desde entonces los EREP, de periodicidad anual, se han convertido en prestigiosos encuentros internacionales en los que participan no solo una representación considerable de los relativistas españoles, sino también un número destacado de expertos procedentes de todo el mundo. Como comentaré en la última sección de este artículo, una de las actividades centrales de la Sociedad Española de Gravitación y Relatividad es, precisamente, colaborar en la organización de esta serie de congresos.

La importante expansión que se produjo en todos los ámbitos de la ciencia española a partir de los años sesenta y, en particular en la física gravitacional, ha dado lugar a una comunidad científica activa y bien relacionada internacionalmente. En el momento presente podemos decir que hay grupos dedicados a la relatividad en universidades de la mayoría de las comunidades autónomas de España. Estos grupos participan, por ejemplo, en las colaboraciones internacionales dedicadas a la detección de ondas gravitatorias, los observatorios LIGO en Estados Unidos y Virgo en Italia, así como en proyectos en desarrollo como LISA y Einstein Telescope. En este aspecto me gustaría destacar la reseñable figura de Alicia Sintes (Catedrática de Física Teórica en la Universidad de las Islas Baleares), que al terminar su tesis doctoral mediados los años noventa se incorporó a la Colaboración Científica del Observatorio

LIGO, casi veinte años antes de la primera detección directa de radiación gravitatoria. Otros grupos españoles que trabajan en este campo se encuentran en el Instituto de Ciencias del Espacio del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en Barcelona y en la Universidad de Valencia.

Son también muy destacables los grupos de investigación dedicados a la relatividad numérica, de importancia fundamental tanto en astrofísica relativista como en detección de ondas gravitacionales. Estos grupos se encuadran fundamentalmente en la Universidad de Valencia y la Universidad de las Islas Baleares.

En el campo de la relatividad matemática, sus aspectos geométricos y el estudio de las soluciones exactas a las ecuaciones de Einstein hay destacados investigadores —físicos y matemáticos— en las universidades de Barcelona, Granada, Málaga, Salamanca, Santiago de Compostela, País Vasco, la Rioja, Valladolid y en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Podemos encontrar grupos dedicados a la cosmología relativista en varias universidades madrileñas (Autónoma, Complutense y Alcalá de Henares) en Barcelona, Bilbao y Granada. Para terminar, hay que mencionar a varios grupos españoles dedicados a la gravedad cuántica, en sus diversas variantes. Destacan en este sentido los grupos del Instituto de Física Teórica (CSIC/Universidad Autónoma de Madrid) y la Universidad de Barcelona, que se dedican a los aspectos relacionados con la cuantización de la gravedad en el marco proporcionado por la teoría de cuerdas, los grupos de la Universidad Complutense de Madrid, la Universidad de Valencia, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) y la Universidad de Granada, que trabajan en aspectos semiclásicos y teorías alternativas de gravitación, y el grupo del Instituto de Estructura de la Materia del CSIC, pionero en la introducción de la Gravedad Cuántica de Lazos en España.

8. LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE GRAVITACIÓN Y RELATIVIDAD (SEGRE)

En 2023 celebramos el vigésimo aniversario de la fundación de la SEGRE, sociedad de la que son miembros una parte considerable de las personas que en España se dedican a la investigación sobre relatividad general y gravitación. La creación de la Sociedad se debió a la iniciativa de Leonardo Fernández Jambrina, su primer presidente, Tomás Ortín, Ruth Lazcoz, Marc Mars, Alejandro Oscoz, José Fernando Pascual y Alicia Sintés, que formaron la primera Junta Directiva. En esta empresa contaron con el apoyo de los relativistas españoles más veteranos.

Según consta en el Artículo 4 de sus estatutos:

La finalidad de la SEGRE es y será promocionar la investigación y la divulgación de la Gravitación y de la Relatividad en su sentido más amplio, por todos los medios adecuados y, en particular:

1. Proporcionar un foro independiente para la discusión de asuntos de interés común.
2. Tomar posiciones públicas conjuntas en defensa de sus fines estatutarios.
3. Mantener relaciones institucionales con otras sociedades cuyos objetivos sean similares.
4. Promover la difusión y divulgación de las actividades de investigación relacionadas con la Gravitación y la Relatividad en su sentido más amplio, incluyendo la organización de reuniones científicas, conferencia y publicaciones.
5. Apoyar la enseñanza y la formación de investigadores en las áreas de Gravitación y Relatividad en su sentido más amplio.

Una de las actividades centrales de la SEGRE es colaborar con la organización de los *Encuentros Relativistas Españoles*, convertidos desde 2016 en *Encuentros Relativistas Españoles y Portugueses (EREP)* en los que participa la *Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação (SPRG)*. Desde la incorporación de nuestros colegas portugueses, por cada dos ediciones de los EREP que tienen lugar en

España se celebra una en Portugal. Estos encuentros cuentan con una nutrida participación de investigadores españoles y portugueses, pero en ellos también suelen tomar parte, como conferenciantes invitados o presentando ponencias, destacados científicos de todo el mundo, por lo que tienen un carácter netamente internacional. El contenido científico de los EREP intenta abarcar a todos los aspectos de la física gravitacional. A ello contribuye el hecho de que la organización corre siempre a cargo de grupos de investigación de las distintas universidades y centros de investigación, con sus características particulares, temas de trabajo e inclinación científica. Como novedad, en la edición del pasado año 2022, se entregó por vez primera el Premio Lluís Bel, financiado con una donación de Alan Barnes, a la mejor ponencia presentada por un investigador joven.

En la actualidad el número de socios y socias de la SEGRE ronda la centena. Entre los objetivos que nos planteamos para el futuro inmediato está el de compensar el fuerte desequilibrio existente entre hombres y mujeres, atrayendo a más investigadoras a nuestro campo de trabajo y a la Sociedad. Otro objetivo importante es captar a investigadores jóvenes y apoyarles en sus carreras científicas. De la misma manera que hemos establecido una relación estrecha con la SPRG, queremos fomentar actividades científicas en colaboración con otras sociedades similares de nuestro entorno geográfico, así como con la *Gravitational Physics Division* de la *European Physical Society* (EPS).

Podemos afirmar con entusiasmo que nos encontramos en una auténtica Edad de Oro de la física gravitacional. Muchas de las predicciones de la relatividad general que parecían completamente imposibles de verificar, han sido comprobadas recientemente, en particular, las relacionadas con la radiación gravitatoria. De hecho, y como sucedió en su momento —pensemos en las ondas de radio— en poco tiempo pasaremos a utilizar la nueva ventana al universo abierta por este nuevo tipo de radiación para desarrollar una astronomía de ondas gravitatorias, que nos permitirá explorar los objetos astrofísicos y el universo en su conjunto, su geografía y su historia, desde una perspectiva observacional completamente distinta. En este contexto, una sociedad como la nuestra, en colaboración con sociedades similares de otros países, puede desempeñar un papel muy importante como promotora de la investigación básica y difusora del conocimiento científico en la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la información proporcionada por Tomás Ortín, primer vicepresidente de la SEGRE, sobre los orígenes de la sociedad y la historia de la física gravitacional en España, así como sus atinados comentarios sobre la primera versión de este trabajo. Quiero agradecer también a Gonzalo Olmo sus observaciones sobre el manuscrito. Este trabajo ha contado con el apoyo del proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Ciencia Innovación y Universidades-Agencia Estatal de Investigación PID2020-116567GB-C22.