EINSTEIN, LA LUZ, EL ESPACIO- TIEMPO Y LOS CUANTOS

EINSTEIN, LIGHT, SPACE-TIME AND QUANTA

J. Fernando Barbero G.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas
fbarbero@iem.cfmac.csic.es

Cómo citar este artículo/Citation: Barbero G., J. F. (2015). "Einstein, la luz, el espacio-tiempo y los cuantos". *Arbor*, 191 (775): a266. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2015.775n5005>

Copyright: © 2015 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-Non Commercial (by-nc) Spain 3.0.

Recibido: 11 diciembre 2014. Aceptado: 6 marzo 2015.

RESUMEN: El estudio de la luz, su naturaleza y sus propiedades ocupó un lugar central en los trabajos de Albert Einstein. En este artículo se discute el papel de la luz en la formulación de la relatividad especial, en particular como instrumento para la definición operacional de las magnitudes cinemáticas básicas, se muestra su importancia para la comprensión de la relatividad general y, por último, se considera brevemente su comportamiento cuántico.

PALABRAS CLAVE: luz; relatividad especial; relatividad general; cuantos.

ABSTRACT: The study of light, its nature and properties was a central topic in the works of Albert Einstein. This paper discusses the role of light in the formulation of special relativity, in particular as a tool to provide operational definitions of the basic kinematic concepts. It also discusses the role of light in understanding general relativity and ends by briefly considering its quantum behaviour.

KEYWORDS: light; special relativity; general relativity; quanta.

I. INTRODUCCIÓN: EINSTEIN Y LA LUZ

La naturaleza de la luz ha sido una de las cuestiones que han captado con mayor fuerza la atención de pensadores, filósofos y científicos desde la más remota antigüedad. Los fenómenos ópticos han jugado siempre un papel importante en nuestra forma de percibir el mundo. Sin la información que recibimos a través de nuestros ojos o analizamos con nuestros instrumentos —lentes, espejos, telescopios o microscopios—, poseeríamos un conocimiento muy limitado y rudimentario de la naturaleza y del universo.

La luz es un fenómeno físico. De manera cotidiana jugamos con ella iluminando, creando sombras o manipulándola de multitud de formas mediante instrumentos ópticos, algunos de ellos de exquisita precisión. Preguntarse por su esencia en el contexto de la Física significa intentar comprender cuáles son los atributos que la caracterizan, sus propiedades, cómo podemos actuar sobre ella o cómo interacciona con la materia. El hecho de que la indagación sobre la naturaleza de la luz nos haya abierto la puerta al conocimiento físico del espacio y del tiempo, y mostrado el camino hacia el mundo cuántico, es uno de los legados más sorprendentes de la ciencia del siglo XX y la aportación fundamental de uno de los pensadores más influyentes de todos los tiempos: Albert Einstein.

Este trabajo está dedicado a describir las tres principales contribuciones de Einstein a la física de la luz. Por una parte la teoría especial de la relatividad con la que consiguió resolver de una forma elegante y profunda las numerosas dificultades que los científicos —sobre todo en el siglo XIX— habían encontrado al estudiar su propagación. La formulación inicial de la relatividad supuso un cambio revolucionario en nuestra visión del espacio y del tiempo que culminó en la interpretación geométrica de Minkowski. Apoyándose en ella, Einstein logró encontrar una teoría de la gravitación compatible con los principios de la relatividad: la relatividad general. En esta teoría la luz juega un papel central que se puso inmediatamente de manifiesto por estar en la base de las primeras constataciones observacionales de su validez. Los fenómenos de propagación de la luz en los espacios-tiempos curvos de la relatividad general son también muy importantes en la astrofísica y cosmología contemporáneas. Por último, Einstein comprendió que el comportamiento termodinámico de la radiación no era compatible ni con una visión corpuscular sobre su naturaleza ni con un punto de vista ondulatorio. Anticipó así la dualidad cuántica esencial del mundo físico.

La estatura científica de Einstein y su papel en la historia de la ciencia han atraído a numerosos estudiosos y eruditos. Su vida y su obra han sido analizadas de forma exhaustiva desde una multitud de puntos de vista; es difícil por ello aportar una visión original al respecto. Este artículo aspira a servir simplemente de guía para la comprensión de algunos aspectos concretos relacionados con el papel de la luz en la física relativista y con su naturaleza cuántica. Considero obligado, en cualquier caso, proporcionar al lector una bibliografía básica que le permita profundizar en los temas que aquí se esbozan sin perderse en la vastísima literatura disponible. Un excelente estudio que combina el rigor histórico con una descripción detallada de los aspectos físicos relevantes puede encontrarse en el libro de Sánchez Ron (1985). Aunque la visión operacional sobre la definición de las magnitudes básicas en relatividad especial se remonta al mismo Einstein, y fue promovida por algunos físicos como Milne, no es posible pasar por alto los magníficos libros de Bondi (1965) y Geroch (1986). Por último la fascinante historia de las paradojas sobre la propagación de la luz aparece descrita en el trabajo de Janssen y Stachel (2004).

II. LA LUZ Y EL ÉTER: PARADOJAS EN LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ

Einstein fue un pensador precoz; un problema que le interesó desde los años de su adolescencia fue el de la óptica de los cuerpos en movimiento. Esta cuestión preocupó a numerosos físicos y astrónomos durante buena parte del siglo XIX, y pasó a jugar un papel científico central tras la formulación por parte de Maxwell de la teoría del electromagnetismo que unificó los fundamentos de la electricidad, el magnetismo y la óptica.

No es exagerado decir que Einstein estaba obsesionado con la luz; así lo demuestra la siguiente cita (Einstein, 1951) en la que, en las postrimerías de su vida, evocaba sus primeras reflexiones sobre esta materia recordando...

«[...] una paradoja de la que me di cuenta a los dieciséis años: si persiguiera a un rayo de luz a la velocidad de la luz en el vacío c , debería percibirlo como un campo electromagnético en reposo, aunque oscilante en el espacio. Sin embargo no parece que exista nada así; ni se ha detectado experimentalmente ni viene descrito por las ecuaciones de Maxwell. Siempre me pareció intuitivamente claro que, desde el punto de vista de un observador como ése, todo debería suceder con arreglo a las mismas leyes que rigen para otro

Figura 1. Albert Einstein a la edad de catorce años

que se encuentre en reposo relativo con respecto a la Tierra; porque, ¿cómo podría el primer observador determinar que se encuentra en un rápido movimiento uniforme? Es posible ver que en esta paradoja se encuentra ya el germen de la relatividad especial.»

No me ocuparé en estas líneas de interpretar con detalle el significado de las afirmaciones vertidas en este breve párrafo —el lector quedará quizá sorprendido por las conclusiones de algunos estudiosos sobre este asunto, ver por ejemplo (Norton, 2013)— pero me parece oportuno resaltar la presencia de varios elementos fundamentales en el camino hacia la relatividad especial: el papel de la luz, el del electromagnetismo y la necesidad de considerar estos fenómenos desde distintos sistemas de referencia. Queda patente, en todo caso, hasta qué punto los problemas relacionados con la propagación de la luz habían llegado a ser relevantes en la Física de las últimas décadas del siglo XIX.

Teorías sobre la naturaleza de la luz: una breve historia

No hay que interpretar el comentario que cierra el párrafo anterior en el sentido de que en épocas precedentes no se hubiera prestado atención al estudio de la luz y su naturaleza, en particular al intentar

comprender el sentido de la vista. Los antiguos pensadores griegos, por ejemplo, propusieron diversas teorías al respecto. En algunas de ellas las imágenes formadas en el ojo se atribuían a la recepción de una especie de copia de los objetos. En otras la percepción visual consistía en la emisión por parte del ojo de algún agente encargado de captar información del entorno y llevarla de vuelta hasta él.

La idea de que las imágenes se deben a la recepción de rayos de luz, reflejados en todas direcciones por los objetos y procedentes de focos emisores, fue propuesta por Alhacén en los albores del segundo milenio de nuestra era. Este sabio musulmán postuló que la luz es un agente físico que se propaga de unos objetos a otros portando información sobre ellos. En la Edad Media se desarrolló de forma notable la elaboración de lentes de aumento, que dieron lugar a la invención en siglos posteriores de numerosos instrumentos ópticos, entre ellos los microscopios y telescopios. Para el diseño de estos aparatos fueron útiles algunas ideas básicas sobre el comportamiento de la luz en medios transparentes, aunque su perfeccionamiento se apoyó en gran medida en la acumulación paulatina de conocimientos empíricos por parte de los artesanos ópticos.

A la par que fueron formulándose las leyes fundamentales sobre la luz, se buscaron modelos teóricos que fueran capaces de justificarlas. Dado que la idea de que la luz es portadora de información es compatible con diversas posibilidades sobre su naturaleza se plantearon varias propuestas al respecto: ¿Consiste, quizá, en sutiles y veloces corpúsculos? ¿Es, por el contrario, similar al sonido? Estas dos preguntas contienen en sus enunciados los elementos que definen a las teorías corpusculares y ondulatorias de la luz, respectivamente.

El modelo corpuscular, del que Isaac Newton llegó a ser el defensor más conocido, postulaba que la luz está formada por pequeñas partículas en movimiento. Este modelo permite explicar fácilmente algunos fenómenos ópticos, en particular el hecho de que la luz parezca propagarse en línea recta, así como las leyes de la reflexión, fenómeno similar al rebote de un objeto contra una superficie. En este tipo de esquema parece razonable atribuir una velocidad a las partículas que constituyen la luz y, lo que es aún más importante, no hay ninguna razón natural que nos lleve a pensar que estas no puedan moverse con un cierto rango de velocidades parcialmente determinadas por los distintos estados de movimiento de las fuentes luminosas.

Al modelo ondulatorio de la luz se llegó comparando su comportamiento con otros fenómenos simples, en particular la propagación del sonido. El hecho de que la luz tenga características que pueden ser explicadas interpretándola como una onda fue puesto de manifiesto por Robert Hooke (1665). Christiaan Huygens (1690), explicó de manera satisfactoria muchos fenómenos luminosos y ópticos en este contexto.

Desde la perspectiva moderna aportada por la mecánica cuántica, hay que señalar la existencia de una dualidad inevitable entre los aspectos corpusculares y ondulatorios del comportamiento de la luz y la materia (Einstein, 1905b; Arons y Peppard, 1965). Cabe añadir, además, que en la llamada *aproximación eikonal*, juegan un papel relevante ciertas curvas perpendiculares a los frentes de onda que es posible interpretar como rayos. Como comentaré posteriormente en relatividad los rayos de luz juegan un papel central en la definición operacional de las magnitudes cinemáticas básicas (longitudes, velocidades, etc.) y en este contexto se interpretan a veces como trayectorias de partículas.

La velocidad de la luz

Para el desarrollo primitivo de la óptica no fue necesario conocer la velocidad de la luz aunque algunos filósofos y pensadores consideraron esta cuestión y debatieron sobre si se movía con una enorme velocidad finita o si se propagaba de manera instantánea. El primer científico en aportar evidencia sólida al respecto fue el astrónomo danés Ole Christensen Rømer, quien al observar las ocultaciones de los satélites de Júpiter y medir con precisión cuándo se producían (en especial las de Ío, el de menor periodo entre los satélites galileanos), apreció un retraso paulatino que atribuyó a la velocidad de propagación finita de la luz (ver figura 2). El tiempo que la luz procedente de Júpiter tarda en llegar a la Tierra es apreciablemente mayor cuando esta, debido a su movimiento orbital, se encuentra en conjunción superior con Júpiter, es decir, al otro lado del Sol. Aunque en aquella época no se conocía con demasiada precisión el tamaño de la órbita terrestre, Rømer pudo estimar la velocidad de la luz en unos 220.000 kilómetros por segundo; un valor aceptable para la época que difiere solo en un 30% del valor real.

Una de las predicciones de las teorías ondulatorias es la existencia de una velocidad característica de propagación de las señales que es independiente del estado de movimiento del objeto que las emite. El lector habrá observado, sin duda, que al hacer rebotar una piedra plana contra el agua se producen ondas cuyos

Figura 2. Ocultación (DC) de Ío por Júpiter (B) vista desde distintos puntos de la órbita de la Tierra alrededor del Sol (según Rømer).

FIG. 70.

frentes son siempre perfectamente circulares (y, por tanto, se alejan de un punto central con velocidad constante) pese a que son producidas por un agente en rápido movimiento.

Debido al enorme valor de la velocidad de la luz en comparación con las velocidades ordinarias, e incluso con las de los objetos astronómicos más cercanos a la Tierra, es difícil diseñar experimentos u observaciones que nos permitan decidir si realmente es independiente del estado de movimiento del emisor. Aún después de la formulación de la relatividad especial persistió cierta controversia sobre este asunto. De hecho, uno de los argumentos más convincentes al respecto no fue enunciado hasta 1913, año en el que Willem de Sitter, intentando rebatir una teoría de emisión de Walther Ritz, dio con una evidencia incontestable (de Sitter, 1913b).

Figura 3. Imagen simulada de una estrella en órbita alrededor del centro de la Vía Láctea según la teoría de emisión de Ritz. Nótese la aparición de múltiples imágenes que se superponen a lo largo de casi toda la órbita. La posición de cada imagen cambiaría con el tiempo debido al movimiento de la estrella

En pocas palabras el argumento de de Sitter era el siguiente: si la luz de una estrella en un sistema binario se moviera con una velocidad relativa constante con respecto a la fuente emisora, su velocidad con respecto a la Tierra dependería del estado de movimiento de la estrella en el instante de la emisión. Esto haría que los rayos de luz procedentes de distintos puntos de la órbita fueran adelantándose unos a otros en su recorrido para llegar, en ocasiones, en un orden distinto de aquél en el que fueron emitidos. Debido a esto las observaciones telescópicas de estrellas binarias mostrarían comportamientos que no se observan en la realidad: veríamos variaciones bruscas en las curvas de luz y los espectros no se corresponderían con los observados. De forma incluso más dramática, las imágenes que obtendríamos con los medios actuales de los objetos astronómicos lejanos mostrarían una distorsión apreciable —aparición y desaparición de imágenes múltiples como la que se muestra en la figura 3— que se haría tanto más evidente cuanto

mayor fuera su distancia. En la actualidad es posible, por ejemplo, estudiar con precisión las órbitas de las estrellas más cercanas al centro de nuestra galaxia, situado a 27000 ± 1000 años luz de nosotros (Ghez *et al.*, 2014), y comprobar que no se produce distorsión alguna, salvo las pequeñas —pero muy interesantes— desviaciones del comportamiento kepleriano atribuibles a la curvatura del espacio-tiempo en las cercanías del agujero negro que ocupa el centro de la Vía Láctea.

El éter luminífero

Una de las consecuencias del modelo ondulatorio de la luz es que parecía implicar necesariamente la existencia de un medio transmisor de las perturbaciones luminosas, que consistirían en cambios en sus propiedades. Fue el propio Huygens (1960) quien postuló la existencia de un éter *luminífero*.

«Ahora, si examinamos cuál es la naturaleza de esta materia en la que se propaga el movimiento generado

por un cuerpo luminoso, que yo llamo materia etérea, veremos que no es la misma que sirve para la propagación del sonido. Porque sabemos que ésta es realmente la que sentimos y la que respiramos y que si la quitamos de una región del espacio todavía deja otra materia que sirve para propagar la luz.»

Es interesante señalar en este punto que el propio Newton consideró la existencia de un éter, aunque para él su función era otra: explicar los fenómenos ópticos (la refracción o la aparición de los llamados anillos de Newton) como consecuencia de la interacción de los corpúsculos de luz con este medio hipotético.

La introducción del éter planteó de manera inmediata una serie de problemas experimentales y observacionales: su detección, la medida del movimiento de la Tierra con respecto a él y la determinación física de sus propiedades. Dado que algunas de las paradojas en la propagación de la luz surgieron en este contexto dedicaré los siguientes párrafos a relatar brevemente su historia. La resolución última de las contradicciones e incompatibilidades aparentes entre las diversas explicaciones propuestas fue uno de los primeros triunfos de la relatividad especial.

La llamada aberración estelar fue descubierta por James Bradley (1727) a principios del siglo XVIII al intentar detectar la paralaje estelar, que consiste en

el cambio aparente de la posición de una estrella sobre la bóveda celeste debido al efecto de perspectiva producido por el movimiento orbital de la Tierra. La aberración estelar, un fenómeno distinto, se debe a la variación de la velocidad orbital de la Tierra, en particular al cambio en su dirección (ver figura 4). Consiste en una variación aparente de la posición de todas las estrellas sobre la bóveda celeste con periodicidad anual y una dependencia simple y característica en la latitud eclíptica. Una explicación bastante sencilla de este fenómeno se basa en utilizar la ley de composición galileana de velocidades. Al sumar la velocidad de la luz, entendida como un chorro de corpúsculos, con la velocidad orbital de la Tierra, cuya dirección cambia a lo largo del movimiento orbital de esta, se obtiene una velocidad relativa de dirección variable que es necesario tener en cuenta al apuntar un telescopio. Una analogía simple es el cambio aparente de la dirección de procedencia de la lluvia que cae verticalmente cuando se ve desde un vehículo en movimiento.

La observación de la aberración estelar demostró de manera definitiva que la Tierra se desplaza realmente alrededor del Sol y sirvió para estimar la velocidad de la luz utilizando un método independiente del usado por Rømer. También apoyó de manera indirecta la idea de que la luz se mueve con una velocidad característica independiente del estado de movimiento

Figura 4. Aberración estelar. El telescopio está representado por un tubo hueco. Para que un «corpúsculo de luz» procedente de la estrella se mueva a lo largo del eje del telescopio es necesario inclinarlo un cierto ángulo α_{ap} , distinto del ángulo de elevación α de la estrella. Se representa la posición del telescopio en tres instantes distintos: el de entrada de la luz, el de la llegada de esta al detector y un instante intermedio. La Tierra se mueve con respecto al éter con velocidad $\vec{v}$.

del emisor porque una dispersión grande e irregular en la posición aparente de las estrellas habría sido incompatible con las observaciones. Nótese que, aunque hayamos justificado la aberración estelar con un simple modelo corpuscular, el hecho de que sea posible atribuir una velocidad a la luz sirve de apoyo a las teorías ondulatorias. De hecho es posible adaptar la explicación anterior a este contexto siempre que las velocidades se interpreten con respecto a un éter en reposo absoluto a través del cual se desplaza la Tierra. Una cita de Thomas Young, uno de los principales defensores de la teoría ondulatoria de la luz a finales del siglo XVIII y principios del XIX, resume en pocas líneas lo anterior (Young, 1804)

«Al considerar el fenómeno de la aberración estelar me inclino a creer que el éter *luminífero* impregna la sustancia de todos los cuerpos materiales ejerciendo una resistencia muy pequeña e incluso nula, moviéndose a su través con tanta libertad como lo hace el viento en una arboleda.»

Hay que tener en cuenta, sin embargo, la dificultad que supone la ausencia en el ámbito terrestre de un fenómeno análogo a la aberración. Esto sugiere que el éter es estacionario con respecto a la Tierra por ser, quizá, arrastrado por ella. Un instante de reflexión le permitirá al lector apreciar que si tal arrastre se produjera no se detectaría aberración estelar, de la misma manera que si situáramos una serie de tubos verticales en el techo del vehículo que se desplaza a través de la lluvia, el agua que entraría en el interior parecería moverse verticalmente.

La existencia de un medio material o semimaterial que sirva de soporte a la propagación de las ondas luminosas planteó inmediatamente una serie de cuestiones relacionadas con su interacción con los objetos. Aunque podría pensarse en el éter como un medio fluido es bien sabido que la propagación de ondas transversales solo puede producirse en sólidos elásticos. Dado que la explicación más natural del fenómeno de la polarización, descubrimiento que cabe atribuir también a Huygens, consiste precisamente en considerar que las ondas luminosas son transversales —una idea propuesta por Young y Fresnel— el éter debería ser un medio sólido. Algunas de sus propiedades físicas podrían ser deducidas a partir del valor observado para la velocidad de la luz. Por ejemplo, puesto que el cuadrado de la velocidad de una onda en un sólido es directamente proporcional a un coeficiente elástico e inversamente proporcional a su densidad, el éter tendría que tener una enorme rigidez, una densidad muy pequeña o ambas cosas simultáneamente.

Se trataría, sin duda, de una sustancia con propiedades muy alejadas de las de la materia ordinaria.

Cabe mencionar aquí de pasada los intentos de Sir George Gabriel Stokes (2009) de reconciliar las diversas observaciones —que atribuían al éter estados dinámicos incompatibles entre sí— mediante la introducción de un complejo modelo en el que el éter compartía propiedades de sólidos y fluidos, como si de un medio *viscoelástico* se tratara (Schaffner, 1972). Stokes postuló, además, que el éter debería ser totalmente arrastrado por la Tierra en sus proximidades sin que por ello se viera modificado su estado de reposo absoluto a grandes distancias de ella. Mediante un modelo relativamente sofisticado consiguió acomodar el fenómeno de la aberración estelar dentro de su esquema teórico. Sin embargo, Hendrik Antoon Lorentz demostró a finales del siglo XIX que las hipótesis en las que se basaba este modelo no eran consistentes porque el éter no podía ser a la vez un fluido *irrotacional* y moverse de forma que su velocidad fuera nula en la superficie de la Tierra.

Una dificultad aún mayor se presentó al considerar el comportamiento de la luz en medios refractivos en movimiento. A principios del siglo XIX Dominique-François Arago —que llegó a ser el vigésimo quinto primer ministro de Francia— se preocupó por este problema utilizando prismas y lentes. Según la ley de composición galileana de velocidades, que él aplicaba a los corpúsculos de luz, el movimiento orbital de la Tierra debería hacer que la velocidad de llegada a un telescopio de la luz procedente de una estrella particular variara a lo largo del año. Para comprobar si era así Arago registró durante varios meses la posición observada de algunas estrellas cuya luz hacía pasar por un prisma. Sorprendentemente encontró que siempre se cumplía la ley de Snell de la refracción. Dentro del contexto de las teorías corpusculares —las preferidas por Arago—, solo fue capaz de explicar los efectos observados suponiendo que las partículas luminosas emitidas por los cuerpos se movían con una infinidad de velocidades distintas pero que el ojo podía detectar únicamente aquellas dotadas de una velocidad específica muy concreta; una explicación decididamente poco plausible.

Para averiguar si sus experimentos podían tener una interpretación más natural en el contexto de los modelos ondulatorios Arago buscó la ayuda de Augustin-Jean Fresnel. Este físico e ingeniero francés fue, junto con Young, uno de los principales defensores de las teorías ondulatorias de la luz en esta época. Entre sus aportaciones más importantes está el estudio del

fenómeno de la doble refracción con el que demostró de manera concluyente el carácter transversal de las ondas luminosas. Uno de las consecuencias más sorprendentes de los experimentos de Arago fue la predicción de que la aberración estelar tenía que ser independiente de que el telescopio utilizara lentes o espejos e incluso de que estuviera lleno de un medio transparente distinto del aire (por ejemplo agua). La explicación que dio Fresnel a estos resultados —basada en la hipótesis de la existencia de un éter estacionario parcialmente arrastrado por los cuerpos refringentes— le llevó a la introducción del concepto de coeficiente de arrastre (Fresnel, 1818). La idea fundamental era que en un medio transparente en movimiento la luz es arrastrada con una velocidad que es igual a la velocidad del medio multiplicada por un coeficiente que depende del índice de refracción de una forma sencilla. Esta idea, combinada con la mencionada anteriormente sobre la necesidad de tener un éter estacionario para explicar la aberración estelar, se convirtió en la explicación más satisfactoria disponible hasta aquel entonces de los fenómenos asociados con la propagación de la luz en medios transparentes. A finales del siglo XIX el astrónomo real británico, Sir George Biddell Airy, comprobó que no se producían cambios medibles en el fenómeno de la aberración estelar incluso si se observaban las estrellas a través de un telescopio lleno de agua.

Fresnel intentó dar con un mecanismo físico concreto para explicar el arrastre del éter, pero no tuvo éxito (hoy sabemos que la explicación definitiva la ofrece la relatividad especial). Uno de los problemas con los que chocaron sus planteamientos fue la posibilidad de explicar de muchas formas distintas los cambios en la velocidad de propagación de una onda en un medio; por ser atribuibles, entre otras posibilidades, a cambios en su densidad, en sus propiedades elásticas o a una combinación de ambos efectos, sin que ninguno de ellos resultara especialmente natural.

La explicación que dio Fresnel a los resultados negativos de Arago podía parecer artificial por hacer uso de un elemento *ad hoc*: la existencia de un arrastre parcial del éter. Era posible, no obstante, diseñar experimentos para detectar directamente este arrastre y medirlo mediante la determinación de la velocidad de la luz en un fluido en movimiento.

Armand Hippolyte Louis Fizeau fue, junto con Jean Bernard Léon Foucault, el primer físico en medir la velocidad de la luz en un experimento terrestre. También ideó un procedimiento para detectar de forma directa el arrastre por un medio fluido y medir el coeficiente de Fresnel (Fizeau, 1851). Su idea consistió en comparar la diferencia de velocidades de la luz arrastrada por dos corrientes de agua que se movían en direcciones opuestas (ver figura 6).

Figura 5: Aberración estelar en un telescopio lleno de agua. El efecto de esta sobre la luz (que suponemos incide perpendicularmente sobre la superficie frontal) consiste en disminuir su velocidad efectiva. Para que no se observe cambio en el ángulo α_{ap} el agua debe «arrastrar» a la luz que se mueve a través del telescopio. En el tiempo que transcurre entre la entrada de la luz y su llegada al detector, el telescopio se desplaza una distancia mayor que la que recorrería si estuviera vacío

Figura 6. Esquema del dispositivo experimental utilizado por Fizeau. Autor: Éleuthère Mascart

Para ello utilizó métodos interferométricos (un interesante precedente del celebrado experimento de Michelson y Morley). El resultado de las medidas de Fizeau implicaba que el coeficiente de arrastre tenía el valor esperado y se tomó como una confirmación del modelo de Fresnel. La idea de un éter en reposo absoluto, arrastrado ligeramente por los medios refringentes, se vio aparentemente corroborada.

Preludio a la relatividad: Michelson y Lorentz

La necesidad de determinar cuál de los modelos propuestos era correcto —el éter en reposo relativo defendido por Fresnel o el éter completamente

arrastrado por la materia postulado por Stokes— fue la inspiración de los famosos experimentos de Michelson (1881) y Michelson y Morley (1887) cuya finalidad era medir la velocidad de la Tierra con respecto al éter (Swenson, 2012). Es interesante hacer notar que el propio Michelson había realizado medidas precisas del coeficiente de arrastre de Fresnel, con lo que prestó soporte experimental a este modelo, y experimentos sobre la detección del «viento de éter» que apoyaban, por el contrario, al modelo de Stokes.

El primer experimento de Michelson (realizado en Potsdam, localidad donde hoy se encuentra el *Albert*

Figura 7. Interferómetro utilizado en el experimento de Michelson-Morley. El dispositivo estaba montado sobre una losa de piedra que flotaba en un baño de mercurio. (Autores: Michelson y Morley).

Einstein Institut dedicado a la física gravitatoria) obtuvo un resultado negativo —uno de los más célebres en la historia de la Física— que este tomó en un principio como un argumento decisivo en favor del modelo de Stokes de arrastre total del éter. De todos modos Lorentz hizo notar que la incertidumbre en las medidas no permitía refutar de manera definitiva el modelo de Fresnel. El más preciso experimento de Michelson y Morley fue, de hecho, interpretado de forma menos rotunda por sus autores aunque ciertamente sugería que la velocidad de la Tierra a través del éter era muy pequeña.

En este contexto quedaba claro que solo una nueva teoría podía dar cuenta de todas las observaciones. Esta fue desarrollada por Lorentz dentro de lo que se conoció como «la teoría del electrón», que completó la formulación de Maxwell con una serie de hipótesis sobre la naturaleza eléctrica de la materia. Al estudiar la electrodinámica de los cuerpos en movimiento introdujo una serie de conceptos que, por una parte, proporcionaron explicaciones para varios fenómenos relacionados con la óptica y la electrodinámica y, por otra, fueron materia prima para la relatividad de Einstein.

Entre los resultados de Lorentz cabe destacar la obtención teórica del coeficiente de Fresnel utilizando un éter en reposo absoluto y sin recurrir a ningún arrastre parcial (Lorentz, 1892a). Para ello propuso una explicación del fenómeno de la refracción basada en un modelo microscópico de la materia en el que las cargas que la forman se mueven bajo la acción del campo electromagnético y emiten, a su vez, radiación cuya interferencia con la luz incidente da lugar a una velocidad efectiva inferior a la de la luz en el vacío. Lorentz también explicó los resultados negativos del experimento de Michelson-Morley postulando una contracción física de los objetos en la dirección del movimiento (Lorentz, 1892b, 1892c) equivalente a la que había propuesto poco antes George Francis FitzGerald (1889).

Es importante reconocer que la teoría clásica del electrón de Lorentz en su versión final era realmente capaz de resolver muchas de las paradojas planteadas por la óptica de los cuerpos en movimiento, aunque para otras cuestiones se hizo necesario recurrir a hipótesis *ad hoc* que fueron criticadas, entre otros científicos de prestigio, por Poincaré. En sus trabajos Lorentz introdujo varios conceptos físicos e ideas matemáticas que terminaron jugando un papel central en la formulación de la relatividad especial; entre ellos las transformaciones de Lorentz (o más propiamente de Lorentz-Larmor) y la contracción de

longitudes. El hecho de que no terminara de unificar todas estas aportaciones en una visión como la que proporciona la relatividad, no resta mérito al que podemos considerar el primero de los físicos teóricos en sentido moderno.

III. UN NUEVO ÉTER GEOMÉTRICO: EL ESPACIO-TIEMPO

La teoría de la relatividad especial nace en 1905 al publicar Albert Einstein su famoso trabajo sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento (Einstein, 1905a, 2001). En este se culmina, de forma magistral y con la economía conceptual característica de las revoluciones científicas, el ingente esfuerzo teórico y experimental que realizaron durante el último tercio del siglo XIX los físicos más insignes de la época. No obstante, la formulación inicial de la relatividad especial solo fue un paso intermedio hacia una visión geométrica de la física mucho más rica y poderosa desde una perspectiva conceptual. De hecho, este punto de vista está en la base de la relatividad general: la teoría relativista de la gravitación que nos permite abordar el estudio de la física del universo en su conjunto. En palabras de Roger Penrose (2006):

«En mi opinión, la teoría de la relatividad especial no estuvo realmente completa, pese a las maravillosas intuiciones físicas de Einstein y las profundas contribuciones de Lorentz y Poincaré, hasta que Mikowski aportó su perspectiva revolucionaria y fundamental: el concepto de espacio-tiempo.»

Las aportaciones esenciales de Einstein fueron de varios tipos. Por una parte convirtió en principios fundamentales algunas de las cuestiones que realmente se encontraban entre los problemas que los físicos se afanaban por resolver. Por ejemplo, en lugar de tener que explicar por qué la velocidad de la luz parecía ser la misma para todos los observadores inerciales, Einstein postuló que esto se cumplía siempre (segundo postulado de la relatividad especial). Análogamente, en el primer postulado de la relatividad especial estableció que las leyes de la Física son las mismas en todos los sistemas inerciales y de él se deduce, por tanto, la imposibilidad de detectar ningún movimiento absoluto. Por otra parte, a partir de sus dos postulados, Einstein llegó a la conclusión de que el espacio y el tiempo no pueden tener naturaleza absoluta. Aunque en el contexto moderno el tránsito desde esta afirmación a la formulación del concepto de espacio-tiempo introducido por Minkowski se lleva a cabo de forma casi mecánica, es muy importante darse cuenta de que no se trata simplemente de añadir un cuarto eje a nuestras representaciones mentales del mo-

vimiento de los objetos —algo nada original— sino de reconocer la necesidad de introducir elementos geométricos concretos para dotar realmente de contenido a la descripción espacio-temporal. En palabras de Minkowski (Minkowski, 1909, 1952).

«El punto de vista sobre el espacio y el tiempo que voy a presentar ante ustedes ha surgido del terreno de la física experimental y de ahí procede su fortaleza. Es una visión radical. El espacio y el tiempo por sí mismos están condenados a desvanecerse en las sombras; solo un cierto tipo de unión entre ellos conservará una realidad independiente.»

Una de las grandes aportaciones de Minkowski a la construcción de la relatividad especial —y en una medida apreciable a la de la relatividad general— consistió en la identificación de un objeto geométrico, lo que conocemos hoy en día como métrica de Minkowski, a partir del cual es posible deducir todo el contenido cinemático de la relatividad. Esta métrica permite definir un intervalo espacio-temporal entre pares de sucesos —una especie de distancia— y asignarle una medida que puede ser interpretada en unos casos como un intervalo de tiempo y en otros como distancia espacial. También juega un papel fundamental a la hora de formular las teorías dinámicas relativistas, tanto de partículas como de campos.

La visión espacio-temporal y geométrica que introdujo Minkowski tiene varias virtudes importantes. Nos permite, por ejemplo, definir distintos tipos de curvas en el espacio-tiempo y dotarlas de una interpretación física concreta. Las partículas materiales ordinarias, incluyendo de forma idealizada a los observadores físicos, vienen representadas por trayectorias espacio-temporales (conocidas también como líneas de universo o simplemente historias) de tipo *temporal*. La caracterización geométrica de este tipo de curvas es muy simple: son aquellas cuyos vectores tangentes tienen «longitud al cuadrado negativa» cuando esta se calcula utilizando la métrica de Minkowski con signatura $(- + + +)$. Al lector que no esté muy versado en geometría puede resultarle útil pensar en lo anterior como la aplicación de un teorema de Pitágoras modificado en el que, en lugar de sumar los cuadrados de las componentes de un vector para determinar su módulo, uno de estos cuadrados se resta.

Entre las infinitas curvas espacio-temporales, juegan un papel especial aquellas que en cierto modo definen «el camino más largo» entre dos puntos: las geodésicas temporales de la métrica de Minkowski. Estas trayectorias representan a los observadores

inerciales, que juegan un papel tan importante en la relatividad einsteniana como en la galileana. La posibilidad de construir sistemas de referencia especiales asociados con este tipo de observadores (sistemas inerciales), es consecuencia de las simetrías de la métrica de Minkowski. De hecho, este grupo de simetrías —conocido como grupo de Poincaré— juega un papel fundamental no solo en la interpretación conceptual de la relatividad, sino en otros aspectos relacionados con la teoría cuántica de campos y la visión cuántica de la luz sobre la que hablaré al final de este trabajo. Por último cabe asociar, usando nuevamente la métrica, una idea de longitud para este tipo de trayectorias que admite una interpretación física muy particular: la de tiempo propio asociado de forma unívoca a cada observador. En este contexto incluso la imagen distorsionada de la geometría de Minkowski que podemos obtener a partir de la euclidiana puede ser útil y permitirnos aceptar sin demasiadas dificultades ciertos hechos que, a veces, se presentan de forma errónea como contradictorios, en particular la famosa paradoja de los gemelos.

Pasemos ahora al asunto que nos preocupa en este trabajo ¿Dónde aparecen los rayos de luz en este esquema? Los rayos de luz son curvas geodésicas de tipo *nulo* o *luminoso*, es decir, aquellas a las que la métrica de Minkowski asigna longitud cero y cumplen, además, que los vectores tangentes a ellas son transportados paralelamente. Por cada punto del espacio-tiempo (*suceso*) pasa una familia de curvas nulas que forman lo que se conoce como *cono de luz*. Cada curva está caracterizada por un vector que podemos asociar con su dirección de propagación. La independencia de la velocidad de la luz del estado de movimiento de los emisores (representados por curvas de tipo temporal) es una cuestión puramente geométrica: Dado un vector nulo, que define la dirección de un rayo, y un suceso solo hay una geodésica que pase por él y vaya en la dirección prescrita.

Al considerar el espacio-tiempo como un ámbito geométrico en el que podemos contemplar las historias de todos los objetos y sus relaciones mutuas —lo único que podemos realmente observar— estamos confiriéndole un carácter absoluto que recuerda en gran medida al papel del éter en las visiones decimonónicas, de ahí el título que le he dado a esta sección. Los puntos del espacio-tiempo son los objetos sobre los que se apoya la definición de los campos que utilizamos para representar todas las magnitudes observables y son el soporte, matemático si se quiere, de toda la realidad física.

IV. EL PAPEL DE LOS RAYOS DE LUZ EN LA DEFINICIÓN OPERACIONAL DE LAS MAGNITUDES CINEMÁTICAS

Definición operacional de las magnitudes cinemáticas básicas

El tránsito desde los postulados einstenianos a la formulación del concepto de espacio-tiempo se apoyó fundamentalmente en el profundo análisis que realizó Einstein sobre el significado de algunos conceptos básicos para la formulación de la cinemática —entre ellos hay que señalar los de simultaneidad, tiempo propio, velocidad y longitud— y también sobre los procesos físicos mediante los cuales medimos estas magnitudes u otras relacionadas.

Una de las enseñanzas más profundas de la relatividad es la necesidad de definir de forma operacional las magnitudes físicas que intervienen en el estudio de la cinemática y la dinámica de los cuerpos. Esto es necesario para entender de forma satisfactoria una serie de comportamientos que, de otra forma, se nos presentarían como paradojas o contradicciones. Entre ellas es obligatorio mencionar la contracción relativista de longitudes o la diferencia entre los tiempos propios medidos por dos observadores cuyas distintas historias coinciden en dos puntos del espacio-tiempo —la celeberrima paradoja de los gemelos—. El contenido físico de estos fenómenos solo puede ser comprendido completamente cuando se define de manera precisa lo que se entiende por la longitud de un cuerpo en movimiento y se acepta que los tiempos que miden los observadores son necesariamente tiempos *propios* asociados de forma independiente e individual a cada uno de ellos.

Las definiciones operacionales a las que me refiero consisten en prescripciones experimentales idealizadas que se apoyan en la utilización de dispositivos físicos aparentemente simples: relojes y reglas. Una dificultad conceptual que se presenta con respecto a ambos surge al considerar su composición ya que están formados por un número enorme de constituyentes elementales. En el caso de muchos relojes —desde luego de aquéllos que se conocían en la época de Einstein— se trata de mecanismos con una cierta complicación.

Aunque las reglas son aparentemente más sencillas de entender, la necesidad de que sean objetos rígidos (si no conservaran su forma al cambiar su estado de movimiento difícilmente podrían servir como instrumentos de medida) choca con uno de los pilares de la propia relatividad especial: la existencia de una veloci-

dad máxima finita para la propagación de las señales. La rigidez absoluta de una estructura implica que al poner cualquier punto de ella en movimiento toda tiene que empezar a moverse instantáneamente, para lo que sería necesario que se transmitiera información a velocidad infinita de unas partes a otras.

Al menos por lo que respecta a las reglas es posible evitar estos problemas reemplazándolas por *rayos de luz*, objetos simples y sin estructura que admiten la sencilla representación geométrica que he descrito anteriormente y plantean por ello muchas menos cuestiones conceptuales. En mi opinión este papel de la luz en la formulación de la relatividad es de enorme importancia. El lector puede encontrar una discusión muy didáctica sobre este punto de vista en los libros de Bondi (1965) y Geroch (1986) que se citan en la bibliografía. Aunque es estrictamente equivalente usar reglas ideales o utilizar rayos de luz, el papel de la luz como agente que sirve a los observadores inerciales para «salir» de su línea del universo, explorar sus alrededores y determinar la distribución y el estado de movimiento de la materia en su entorno es, en mi opinión, muy sugerente.

Existe una relación interesante entre el punto de vista geométrico sobre la relatividad especial y la perspectiva operacional. Una de las características básicas del concepto de variedad diferenciable —que subyace a la formulación geométrica de la relatividad— es la idea de independencia de las coordenadas. Aunque las coordenadas puedan ser convenientes, o incluso imprescindibles, para construir y manipular ejemplos concretos, las propiedades y magnitudes verdaderamente geométricas son intrínsecas. Por ejemplo, la métrica de Minkowski admite una infinidad de representaciones en distintos sistemas coordinados; algunas de ellas, como la que tiene la forma $Diag(-1, +1, +1, +1)$, son muy simples pero hay otras que son complicadas y en las que no se aprecian más regularidades que el carácter simétrico de su representación matricial. Sin embargo, las propiedades intrínsecas de la métrica no cambian; por ejemplo, su signatura es invariante, la curvatura calculada a partir de ella es siempre cero y el grupo de simetría definido por sus campos de Killing es siempre el de Poincaré.

La definición operacional de las magnitudes cinemáticas básicas en el contexto de la relatividad especial puede llevarse a cabo sin utilizar ningún sistema de coordenadas por lo que encaja perfectamente dentro del punto de vista geométrico.

Simultaneidad, longitudes e intervalos temporales

Discutiré ahora con cierto detalle varios ejemplos. Consideremos en primer lugar el importante concepto de *simultaneidad* asociado con un observador inercial, a quien supondremos dotado de un reloj ideal que mide su tiempo propio. Decimos que dos sucesos que no se encuentran en la línea de universo de este observador (y que, por tanto, no experimenta directamente, ver figura 8) son simultáneos cuando puede emitir dos señales luminosas, hacer que reboten en los dos sucesos y recibir las señales reflejadas de manera que el intervalo de tiempo propio entre las emisiones sea el mismo que el intervalo entre las recepciones. Como puede verse en este enunciado no ha sido necesario recurrir a ningún sistema de referencia. Es interesante mencionar que en esta situación el orden de recepción de los rayos es opuesto al de emisión.

Figura 8. Procedimiento operacional para determinar la simultaneidad de los sucesos B y C con respecto a un observador inercial. Nótese que el intervalo de emisión y recepción de los rayos de luz es el mismo. El suceso A es simultáneo con B y C

No todos los sucesos en el espacio-tiempo pueden ser simultáneos para algún observador inercial; aquellos que pueden serlo definen lo que se conoce como intervalos de tipo *espacial*. Una vez hemos determinado que dos procesos son simultáneos podemos definir la distancia entre ellos sin más que multiplicar el intervalo de tiempo transcurrido entre las dos emisiones o las dos recepciones de rayos por una constante universal c a la que identificamos con la velocidad de la luz. Este papel de la velocidad de la luz como factor de conversión es compatible con el espíritu geométrico (los rayos de luz son trayectorias «impresas» en el espacio-tiempo y definidas por la métrica de Minkowski) e interviene, de hecho, en la definición fundamental de la unidad de longitud en el Sistema Internacional, el metro (17CGPM, 1983)

«El metro es la longitud de la trayectoria que recorre un rayo de luz en el vacío en un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de un segundo.»

Una vez introducido el concepto de distancia es posible dar sin dificultad las definiciones necesarias para los ángulos y construir así todos los elementos necesarios para determinar la forma de los objetos.

Los pares de sucesos que no pueden ser nunca simultáneos y que es imposible conectar mediante rayos de luz definen los llamados intervalos de tipo *tiempo*. Siempre es posible encontrar observadores inerciales para los que estos sucesos forman parte de su historia. El intervalo de tiempo propio que estos observadores asignarían midiendo con sus relojes puede ser obtenido por cualquier otro observador inercial mediante un procedimiento similar al descrito para la determinación de distancias espaciales. Este consiste en la emisión y recepción de pares de rayos de luz que, en este caso, llegan reflejados al emisor en el mismo orden en el que fueron emitidos.

Con los procedimientos descritos en los párrafos anteriores es posible asignar una «distancia espacio temporal», conocida como *intervalo* a cada par de sucesos. De esta manera podemos obtener la métrica espacio-temporal de manera operacional e independiente de los sistemas de coordenadas: como debe ser para un objeto geométrico. Una vez introducidos de forma precisa los conceptos relacionados con las distancias y los tiempos es posible definir sin gran esfuerzo otras magnitudes de tipo cinemático —por ejemplo, las velocidades relativas— utilizando métodos similares. El uso de rayos de luz permite llevar a cabo lo anterior de una forma conceptualmente muy sencilla.

Quisiera terminar este apartado con dos comentarios. El primero tiene que ver con ciertos comportamientos aparentemente extraños de las longitudes y tiempos propios; el segundo con la aparente ausencia de las transformaciones de Lorentz en lo dicho anteriormente.

Entre los fenómenos de tipo cinemático más llamativos que predice la relatividad especial están la contracción de longitudes y la llamada paradoja de los gemelos. El primer fenómeno se produce al comparar las longitudes de una regla rígida medidas por un observador inercial en reposo con respecto a ella y otro observador inercial en movimiento relativo. Nótese en este punto que, pese a que hemos definido lo que entendemos por distancia espacial entre dos sucesos, esta definición no nos dice inmediatamente qué debemos entender por la longitud de una regla. Para un observador en reposo con respecto a ella y situado en un extremo, existe una definición operacional muy natural (ver figura 9): este observador determina la longitud por el simple procedimiento de mandar un rayo de luz de un extremo a otro en el que se refleja, medir el tiempo entre la emisión y la recepción del rayo reflejado y multiplicar la mitad de este tiempo por la velocidad de la luz c (téngase en cuenta que el rayo va y vuelve). La longitud así definida es la distancia espacial entre el suceso situado en la línea del universo del observador «a mitad de camino» entre la emisión y la recepción y el suceso correspondiente al rebote de la luz en el otro extremo. Podemos referirnos a esta longitud como *propia*.

¿Qué sucede con la determinación de la longitud de la misma regla por un observador inercial en movimiento relativo con respecto a ella? En primer lugar hay que decir que es posible dar un método mediante el cual el observador en movimiento puede obtener la longitud propia de la regla emitiendo y recogiendo rayos de luz reflejados y midiendo intervalos de tiempo propio con su reloj (ver figura 9). Desde esta perspectiva no cabría hablar de ninguna contracción porque todos los observadores inerciales determinarían la misma longitud propia. No obstante hay una definición de longitud medida por el observador en movimiento y naturalmente asociada con él. Esta viene dada por un procedimiento operacional que consiste en emitir dos rayos de luz que se reflejen en ambos extremos de la regla de forma tal que se cumpla que los intervalos de tiempo propios entre las emisiones y recepciones coincidan. Multiplicando este intervalo por $c/2$ obtenemos una longitud que es la que parece ser menor que la longitud propia de la regla.

Quizá le resulte interesante al lector saber que, pese a lo que se lee y se muestra en las ilustraciones de muchos libros dedicados a exposiciones populares o semipopulares de la relatividad, las imágenes que registraríamos de objetos moviéndose a velocidades relativistas se verían distorsionadas, pero no comprimidas en la dirección del movimiento (Penrose, 1959; Terrell, 1959). Por ejemplo, una esfera parecerá girada pero siempre se verá con una silueta circular; la razón tiene que ver con el hecho de que la información luminosa registrada por un cierto observador en un instante determinado de su tiempo propio no es emitida de manera simultánea con respecto a un referencial situado en el objeto.

Figura 9: Procedimiento operacional para medir la longitud de una regla tanto por un observador en reposo con respecto a ella como por un observador inercial *Obs* en movimiento relativo. La longitud en reposo de la regla es simplemente $c \cdot \tau$. La longitud medida por el observador en movimiento es $c \cdot \tau_1$. Este observador puede determinar también la longitud propia de la regla a partir de τ_1 , T_α y T_β .

El caso de la mal llamada paradoja de los gemelos es aún más simple de entender que el anterior. De la misma manera que aceptamos como natural que la distancia que hemos de recorrer para ir de una ciudad a otra depende del itinerario que utilicemos, el carácter geométrico del intervalo espacio-temporal hace plausible que el tiempo propio que dos observadores distintos miden entre pares de sucesos en sus respectivas líneas de universo (una magnitud similar a la longitud de una curva) sea distinto.

Finalizaré mencionando brevemente el papel de las transformaciones de Lorentz desde la perspectiva operacional. El hecho de que no sea necesario recurrir a sistemas de coordenadas para describir los fenómenos relativistas no significa que no pueda hacerse. Dado un observador inercial cualquiera, este puede asignar coordenadas a los sucesos del espacio tiempo mediante un procedimiento que consiste en enviar rayos de luz, recoger los que rebotan en el suceso en cuestión y medir los tiempos propios de emisión y recepción. Si dos observadores inerciales distintos siguen el mismo procedimiento para asignar coordenadas a un mismo suceso, no obtendrán los mismos valores, sin embargo, existirá una relación entre ellas que viene dada precisamente por una transformación de Lorentz.

Un ejercicio para el lector

Haré aquí un pequeño alto en el camino para proponerle al lector un ejercicio que le sirva como reflexión sobre lo que se ha discutido brevemente hasta este punto, en especial con respecto al papel del éter en la Física prerrelativista y a los problemas conceptuales provocados por el recurso a este concepto. Lo haré con un ejemplo que puede resultar pintoresco pero que recoge de una manera concreta y próxima muchas de las cuestiones mencionadas anteriormente: *la parábola de los murciélagos relativistas* que podríamos resumir en la siguiente pregunta: ¿tienen los murciélagos una percepción relativista del mundo?

Es bien sabido que muchas especies de murciélagos se han adaptado a la vida en la oscuridad de las cavernas en las que habitan. Para estos animales, de movimiento relativamente rápido, es de importancia capital tener información espacial precisa sobre su entorno, poder volar sin chocar con las paredes y encontrar su alimento en ausencia de luz. Para ello han desarrollado un fino sentido que les permite utilizar ultrasonidos para explorar el mundo que les rodea: utilizan las ondas sonoras como nosotros utilizamos

una linterna. Visto desde esta perspectiva el uso que hacen estos animales del sonido es muy parecido al que hemos hecho de los rayos de luz al definir operacionalmente longitudes y velocidades. En su mundo el aire se comporta como un verdadero éter; ¿qué falta-ría entonces para que su vida, o mejor, su percepción de la realidad fuera «relativista»?

Dado que sabemos que es posible hacer una definición operacional de todas las magnitudes cinemáticas mediante relojes y rayos de luz (que podemos reemplazar en este caso por pulsos de sonido) el problema tiene que radicar necesariamente en los relojes. ¿Cuál es la naturaleza del reloj interno que usan los murciélagos para procesar la información que captan con sus sentidos? De las enseñanzas de Lorentz podemos deducir que si la interacción responsable de hacer funcionar el mecanismo interno de los relojes fuera el sonido y, suponiendo que pudieran moverse a través del aire sin producir grandes distorsiones en su estado, detectarían efectos de tipo relativista como los que hemos descrito anteriormente.

¿Es posible construir relojes sónicos? La respuesta es afirmativa. De manera ideal podemos hacerlo haciendo rebotar de forma reiterada una señal sonora entre dos paredes situadas a una distancia fija (en la práctica tendríamos que amplificar la señal para compensar las inevitables pérdidas de energía que se producirían en el proceso y tener cuidado para no arrastrar el aire de manera indebida). Si dotáramos a los murciélagos de relojes sónicos ¿no notarían que el tiempo que marcan cuando se desplazan con ellos transcurre más lentamente que el indicado por relojes en reposo? La respuesta es otra vez afirmativa.

Hagámonos ahora una última pregunta: ¿Envejecen los murciélagos en movimiento más despacio que sus congéneres en reposo? La respuesta es ahora negativa. La razón es fácil de entender: las interacciones que gobiernan el comportamiento de las partículas —átomos y moléculas— que forman cualquier objeto material están controladas por fenómenos electromagnéticos, no por el sonido. Si fuera posible construir estructuras dinámicas suficientemente complejas y mantener su integridad mediante ondas sonoras (aunque pueda parecer a primera vista que algo así es una quimera se puede hacer levitar objetos mediante ultrasonidos) podríamos estudiar una especie de relatividad sonora en la que el medio haría de manera efectiva el papel del éter. Piense el lector en ello.

V. LUZ Y RELATIVIDAD GENERAL

Sabemos que en realidad no hay una sola relatividad sino dos: la especial (o restringida) y la general. En apariencia son teorías muy distintas que se ocupan de problemas también muy diferentes: por un lado, la resolución de las paradojas asociadas con la electrodinámica y la óptica de los cuerpos en movimiento, por el otro la descripción relativista de la gravitación. El lenguaje en el que tradicionalmente se presentan es también muy distinto: la teoría especial se sustenta en los dos postulados básicos enunciados por Einstein y, de forma práctica, en el uso de las transformaciones de Lorentz entre sistemas inerciales, mientras que la teoría general se apoya de forma imprescindible en la geometría diferencial y sus conceptos. La razón de esta diferencia es una pretendida economía de medios técnicos y conceptuales: el formalismo de la geometría diferencial no forma parte de la formación básica de la mayor parte de los físicos e ingenieros y se considera, en muchas ocasiones, como un recurso matemático avanzado que superficialmente no es necesario para abordar los problemas y los métodos de la relatividad especial. Como el lector sospechará si ha llegado hasta aquí, en mi opinión la geometría no solo ilumina muchos de los conceptos básicos de la relatividad especial, sino que apoya de manera natural la visión operacional sobre la que he insistido en los párrafos precedentes.

El concepto fundamental de espacio-tiempo dotado de la estructura geométrica que define el tensor métrico nos proporciona una perspectiva muy poderosa sobre la relatividad y sus conceptos básicos y allana notablemente el camino —lo hizo para el mismísimo Einstein— hacia la relatividad general. En un sentido técnico concreto la relatividad especial no es sino la teoría que se obtiene al considerar un tipo particular de métrica espacio-temporal que podemos caracterizar de modo intrínseco como aquella cuya simetría viene dada por el grupo de Poincaré: la métrica de Minkowski.

La idea central de la relatividad general es que la gravitación es un fenómeno que admite una explicación geométrica. La intuición fundamental de Einstein —reflejada en sus famosas ecuaciones de la relatividad general— consistió en darse cuenta de que una métrica espacio-temporal determinada por el contenido de materia y energía del universo podía servir para describir los fenómenos gravitatorios en un contexto compatible, hasta cierto punto, con la relatividad especial. En este sentido la métrica

espacio-temporal pasa a ser un objeto dinámico que interacciona con la materia y la energía y no un mero objeto geométrico pasivo *de fondo*.

Quisiera destacar, aún a riesgo de parecer reiterativo, hasta qué punto la perspectiva proporcionada por Minkowski jugó un papel fundamental. En relatividad general las trayectorias de los objetos (al menos aquellos que de manera idealizada podemos representar como puntuales) vienen dadas por las geodésicas de la métrica. En ese sentido son partículas libres como lo son los observadores inerciales de la relatividad especial. Sin embargo el comportamiento de estas geodésicas es mucho más rico en la teoría general. Para hacerse una idea de lo que quiero decir recurriré a una analogía tomada de la geometría ordinaria y que se basa en comparar las geodésicas del plano —líneas rectas— con las de una esfera —círculos máximos como el ecuador—. Es fácil apreciar diferencias claras entre unas y otras. Mientras que dos partículas que siguen trayectorias rectilíneas del plano que no sean paralelas se irán alejando de manera progresiva, la situación análoga sobre la superficie de una esfera es distinta: aunque inicialmente se alejen, terminarán por converger en un instante posterior en las antípodas del punto del que partieron. Aunque no es recomendable llevar esta analogía demasiado lejos, sin duda sirve para ilustrar cómo es posible atribuir la gravitación a un efecto de tipo geométrico.

La propagación de la luz en espacios-tiempos curvos

Como mencioné anteriormente, las métricas que se usan en relatividad permiten asignar «longitudes» a los vectores y clasificar las trayectorias del espacio-tiempo en varios tipos: espaciales, temporales y de tipo luminoso. Estas últimas nos permitían identificar los rayos de luz con cierto tipo particular de geodésicas «de longitud nula». Las geodésicas nulas determinadas por métricas «curvas» son la representación de los rayos de luz en relatividad general.

Dado que la relatividad general tiene como objetivo explicar la gravitación en un contexto compatible con las ideas relativistas, es natural suponer que el comportamiento de los rayos de luz juegue un papel importante tanto en su confirmación experimental como en la determinación y medida de numerosas magnitudes físicas. De hecho, una de las tres predicciones básicas en las que se apoyó la confirmación observacional de la teoría es la desviación de los rayos de luz por el campo gravitatorio del Sol. Es discutible hasta qué punto la gravitación newtoniana puede acomodar un fenómeno de este tipo. En principio es posible calcular el ángulo

de desviación, debido a la presencia del Sol, de partículas de masa no nula procedentes de regiones muy alejadas (en la práctica del infinito). Este valor no es nulo y, por tanto, puede aceptarse como una predicción de la teoría newtoniana de la gravitación. Nótese, de todas maneras, que si la luz estuviera compuesta por partículas de masa exactamente nula el problema planteado de determinar su desviación no estaría bien puesto (la fuerza sería cero pero la aceleración sería arbitraria). Una teoría ondulatoria de la luz tampoco daría lugar a una desviación detectable de la radiación con longitud de onda correspondiente al espectro visible.

La predicción de la relatividad general difiere en un factor dos de la que hace la teoría de Newton por lo que una medida directa de la posición aparente de las estrellas visibles muy cerca del limbo solar permitiría obtener evidencia fuerte en favor de una u otra teoría. La historia de la expedición de Eddington y los resultados que obtuvo a favor de la relatividad general es bien conocida, el lector interesado puede consultar la referencia (Dyson, Eddington y Davidson, 1920).

Quisiera mencionar de pasada que, además de la enorme importancia que tuvo la observación de la desviación de la luz por los campos gravitatorios para la consolidación de la relatividad general, el estudio de las propiedades de familias de curvas de tipo luz juega también un papel central en sus aspectos teóricos. Por ejemplo, la definición del concepto de agujero negro se basa en una caracterización geométrica del llamado horizonte de sucesos en la que juegan un papel central cierto tipo de geodésicas nulas que «no son capaces de escapar al infinito». Por otra parte los celebrados teoremas de singularidad de Hawking y Penrose —de los que la existencia de una singularidad inicial en el origen del universo, o en el interior del horizonte de sucesos de los agujeros negros, son consecuencias inevitables— se apoyan también en el estudio de geodésicas de este tipo; es decir de rayos de luz que se desplazan en un espacio-tiempo curvo.

Lentes gravitatorias

Como sucede tantas veces en Física, el fenómeno que un día aparece como la confirmación de una nueva teoría se convierte con el paso del tiempo en una herramienta más para el estudio de la naturaleza. Un ejemplo notable en el campo de la cosmología astrofísica es el uso de las *lentes gravitatorias* para analizar la distribución de materia en el universo, estudiar objetos muy primitivos —que serían inobservables de otra forma sin el efecto amplificador de estas lentes— y buscar planetas extrasolares.

Figura 10. Reproducción de una imagen en negativo tomada por la expedición de Eddington en Sobral (Brasil). Se muestra la posición de las estrellas cuya luz pasaba cerca del limbo solar (Dyson, Eddington y Davidson, 1920)

Aunque *sensu stricto* la primera lente gravitatoria detectada fue el Sol —en las citadas observaciones de Dyson y Eddington—, se acepta que el primer descubrimiento de un fenómeno de este tipo fue debido a los astrónomos Dennis Walsh, Bob Carswell y Ray Weymann (1979), que desde el Observatorio Nacional de Kitt Peak (Estados Unidos) detectaron un par de cuásares —núcleos de galaxias activas— muy próximos entre sí. Aunque era en principio posible que se tratara de la alineación fortuita de dos objetos muy alejados y sin relación mutua, el estudio detallado de su desplazamiento hacia el rojo (una medida indirecta de su distancia a nosotros) indicaba que su distancia a la Tierra era esencialmente la misma y sugería la existencia de una asociación física real entre ellos.

Lo que resultó verdaderamente sorprendente para los descubridores de este curioso par de cuásares fue la extraordinaria similitud entre sus espectros. Esto les llevó a interpretar el fenómeno como debido a una lente gravitatoria que producía imágenes múltiples de un único cuásar muy lejano. Aunque inicialmente se pensó que la lente gravitatoria era una sola

galaxia posteriormente se llegó a la conclusión de que se trataba de un cúmulo de galaxias interpuesto en la trayectoria original de la luz de forma que se producía una alineación casi perfecta entre el cuásar, el cúmulo y la Tierra.

Un fenómeno parecido al que acabo de describir fue predicho por el propio Einstein en uno de sus trabajos (Einstein, 1936). En este artículo explica que si se produjera una alineación perfecta entre dos estrellas suficientemente alejadas y un observador terrestre, la imagen que se observaría de la estrella más lejana tendría forma de anillo centrado alrededor de la imagen de la estrella interpuesta. En palabras del propio Einstein:

«Se deduce de la ley de desviación que un observador situado exactamente en la extensión de la línea central AB percibirá en lugar de una imagen puntual de la estrella A un círculo luminoso de radio angular β alrededor del centro de B .»

Curiosamente unas líneas más adelante añadió: «Por supuesto no hay ninguna esperanza de observar este fenómeno directamente». El hecho de que en la

práctica abundan las imágenes múltiples de galaxias producidas por lentes gravitatorias y no los anillos de Einstein es consecuencia de la baja probabilidad con la que se producen las alineaciones casi perfectas necesarias para que se dé este último fenómeno. De todas maneras en el momento presente se han observado varias decenas de auténticos anillos de este tipo (ver figura 11) en distintas bandas del espectro electromagnético.

Los medios técnicos actuales, en particular los modernos telescopios, han permitido a los astrónomos extender las observaciones del universo hasta hacer posible la detección de objetos enormemente lejanos. En estas circunstancias es casi inevitable encontrar multitud de lentes gravitatorias formadas por las enormes concentraciones de masa de los cúmulos de galaxias. Estas lentes gravitatorias se han convertido en una herramienta esencial para el estudio de la distribución de materia en el universo que, a su vez, juega un papel central tanto en la comprensión de su estructura como en la resolución de problemas físicos fundamentales, en especial el de la materia oscura. Mediante estudios estadísticos de precisión sobre la

Figura 11. Un anillo de Einstein casi completo. Imagen NASA/ESA.

forma de las imágenes de galaxias (lo que se conoce como *weak lensing*, que podríamos traducir como distorsión débil por lentes gravitatorias) es posible obtener información sobre la distribución de materia sin necesidad de recurrir a las hipótesis estructurales que es inevitable utilizar para extraer este tipo de información a partir de las lentes gravitatorias «fuertes» como las que producen los anillos de Einstein.

Mencionaré para terminar esta sección otra aplicación interesante de las lentes gravitatorias: la detección de planetas extrasolares mediante lo que se conoce como *microlensing*. Se observa este fenómeno estudiando las curvas de luz de centenares de miles de estrellas situadas en un campo de visión concentrado en una cierta zona de cielo en la dirección del centro de la Vía Láctea o de las Nubes de Magallanes. Para ello se utilizan telescopios especialmente dedicados a esta tarea dotados con detectores fotométricos

muy precisos que registran de forma casi continua la intensidad de la luz recibida desde cada una de estas estrellas. Dada la enorme cantidad de objetos observados se producen de vez en cuando alineamientos fortuitos entre una estrella cercana al centro de la galaxia, otra que actúa como lente y la Tierra. Estas alineaciones dan lugar a variaciones de la intensidad de la luz recibida que presentan una forma característica que permite excluir con un elevado grado de confianza que se deban a fenómenos de naturaleza puramente estelar. En algunas raras ocasiones se aprecian picos secundarios en las curvas de luminosidad debidos a la presencia de objetos en órbita de la estrella observada. Es posible determinar algunas de sus propiedades a partir de la información proporcionada por la curva de luz. En muchos casos la única explicación posible para estas variaciones de luminosidad es suponer la presencia de planetas.

Figura 12. Hubble Frontier Field Abell 2744. Imagen NASA/ESA. Pueden apreciarse las imágenes distorsionadas por lentes gravitatorias de numerosas galaxias lejanas

VI. LA NATURALEZA CUÁNTICA DE LA LUZ

Einstein y los cuantos

Einstein no solo se preocupó por los problemas asociados con la propagación de la luz a los que he dedicado la primera parte de este artículo sino también hizo un gran esfuerzo para comprender su naturaleza y lograr una descripción teórica satisfactoria de ella. Aunque pueda parecer que la interpretación que hizo Maxwell de la luz como un fenómeno electromagnético había zanjado de manera definitiva y brillante estas cuestiones, realmente no fue así, como acertadamente percibió Einstein al considerar con cuidado los problemas asociados a la emisión y absorción de luz y su comportamiento termodinámico y estadístico. Las afirmaciones de Einstein (1905b) sugieren que el electromagnetismo de Maxwell solo proporciona una explicación coherente de la física de la luz a escalas macroscópicas pero no a escalas microscópicas.

«A pesar de la confirmación experimental completa de la teoría [ondulatoria de la luz] en sus aplicaciones a la difracción, reflexión, refracción, dispersión etc. es concebible que la teoría de la luz basada en el uso de funciones continuas pueda llevar a contradicciones con la experiencia cuando sea aplicada a los fenómenos de emisión y transformación de la luz.»

Einstein (1909) se dio cuenta de que, si se extiende la validez de las ecuaciones de Maxwell al dominio microscópico, la mecánica estadística lleva a una ley sobre la distribución de energía de la radiación del cuerpo negro que es incompatible con los experimentos. Además, en el citado artículo de 1905 (Einstein, 1905b), en el que propuso su explicación del efecto fotoeléctrico, mostró que del estudio de las propiedades termodinámicas de la radiación se deducía que ha de estar constituida necesariamente por corpúsculos —conocidos como *fonones*— en lugar de tratarse de un campo.

«En mi opinión las observaciones asociadas con la radiación de cuerpo negro, fluorescencia, la producción de rayos catódicos por la radiación ultravioleta y otros fenómenos relacionados con la emisión o transformación de la luz se entienden más fácilmente si se supone que la energía de la luz está distribuida en el espacio de forma discontinua. Según la hipótesis que se hará en lo que sigue, la energía de un rayo de luz que se propaga desde una fuente puntual no está distribuida de forma continua sino que está formada por un número finito de cuantos de energía que se encuentran localizados en puntos del espacio, se

desplazan sin dividirse y solo pueden ser emitidos o absorbidos en unidades completas.»

La explicación que la hipótesis de los cuantos de Einstein proporcionó para el efecto fotoeléctrico supuso una confirmación clave del carácter corpuscular de la luz y fue, de hecho, el motivo por el que recibió el premio Nobel de Física en 1921 «por sus servicios a la Física Teórica y, especialmente, por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico» (The Nobel Foundation, 2014).

La visión que nos proporciona la teoría cuántica de campos moderna da cuenta de manera perfecta de lo que dice Einstein en las dos citas anteriores. Para teorías de campos lineales, como el electromagnetismo, es posible construir estados cuánticos (los llamados estados coherentes) que cumplen que los valores esperados del operador campo son soluciones de las ecuaciones de Maxwell clásicas y, por tanto, se comportan como genuinas ondas electromagnéticas. Su comportamiento cuántico solo queda de manifiesto al utilizar detectores de mucha sensibilidad y precisión. En sus consideraciones Einstein fue más allá que Planck, para quien la introducción de los cuantos no pasó de ser una «suposición formal» (Sánchez Ron, 1985) o, si se quiere un truco de cálculo. Para Planck la radiación electromagnética no estaba constituida por partículas.

Einstein fue uno de los primeros físicos en apreciar las debilidades del concepto clásico de campo y sustituirlo por una versión microscópica en la que juegan un papel central los cuantos de energía. En esto anticipó, como comentaré al final, el papel que juegan ciertas partículas como mediadoras de las interacciones en la teoría cuántica de campos contemporánea. Durante una etapa de su vida científica Einstein no solo pretendió desterrar el concepto de éter de la Física sino también la propia idea de campo aunque, llegado el momento, abandonó estos planteamientos por no ser compatibles con su formulación de la relatividad general donde la métrica espacio-temporal es un campo que juega el papel determinante de dotar de geometría al espacio-tiempo.

La estadística de Bose-Einstein

Como he mencionado anteriormente, tras una serie de consideraciones de tipo termodinámico o estadístico, Einstein llegó a la conclusión de que la luz tenía que estar compuesta por corpúsculos. Una de las aproximaciones posibles a la mecánica estadística hace uso de la llamada colectividad microcanónica. La idea básica de

este planteamiento consiste en determinar la entropía de un sistema cuántico (que supondremos, para simplificar, que cuenta con un conjunto discreto de estados de energía) como función de la energía y de otros parámetros relevantes como puede ser el volumen. El problema que hay que resolver en la práctica es de tipo combinatorio y consiste en contar, para cada energía, el número de estados del sistema con una energía menor. La entropía de conteo así obtenida no puede ser utilizada directamente porque carece de las propiedades de diferenciabilidad necesarias para que sea posible utilizar el formalismo habitual de la termodinámica, sin embargo, en el llamado límite termodinámico da lugar a una función suficientemente regular que contiene toda la información físicamente relevante.

Para sistemas compuestos, este problema de conteo depende fuertemente de lo que podamos considerar como estados distinguibles. Uno de los fenómenos característicos del mundo cuántico —muy alejado de nuestra experiencia cotidiana— está relacionado con la distinguibilidad de los objetos microscópicos. Esto tiene gran relevancia para el conteo de estados al que me he referido anteriormente. Los padres de la mecánica estadística, en particular Gibbs, se toparon con paradojas al calcular la entropía de un gas ideal ya que los métodos más naturales para hacer esto no daban una cantidad extensiva. Aunque se propusieron soluciones *ad hoc* para resolver este problema, su resolución definitiva llegó con la propuesta de Einstein de modificar el conteo de microestados considerando como indistinguibles ciertos estados que en el planteamiento clásico de Maxwell y Boltzmann no lo eran. Su idea estuvo inspirada en otra análoga que Satyendra Nath Bose propuso para obtener la fórmula de Planck para la radiación del cuerpo negro.

Desde el punto de vista de la mecánica cuántica lo anterior está relacionado con ciertas propiedades intrínsecas de los sistemas físicos, en particular su momento angular. Aquéllos sistemas cuánticos compuestos a partir de objetos de momento angular cuantizado semientero están sujetos a la estadística de Fermi-Dirac mientras que los de momento angular entero están sometidos a la de Bose-Einstein. Desde el punto de vista técnico la propiedad fundamental que ha de cumplir la función de onda del sistema completo es que ha de ser antisimétrica o simétrica, respectivamente, bajo permutaciones de las partículas constituyentes. Esta propiedad determina el número de estados que corresponden a un cierto nivel de energía de un sistema compuesto y, por ello, es relevante para la obtención de su entropía.

Los sistemas de *bosones* (partículas con momento angular cuántico entero) presentan comportamientos físicos interesantes, en particular el fenómeno de la condensación de Bose-Einstein o la superfluidez en el caso del helio líquido. Un fenómeno que merece una mención aparte —por estar relacionado con el comportamiento de la luz— es la posibilidad de conseguir haces de luz coherente constituidos por un enorme número de fotones de idénticas propiedades: el láser.

Los fotones y la teoría cuántica de campos relativista

A modo de epílogo terminaré con unos breves comentarios sobre la visión moderna de los fotones que nos proporciona la teoría cuántica de campos. Pese a que Einstein no tuvo un protagonismo directo en el desarrollo de este marco teórico, su influencia fue indiscutible porque muchos de los fenómenos de los

Figura 13. Láser utilizado en el sistema de óptica adaptativa del VLT del ESO. Junto al telescopio Yepún, que forma parte del VLT, aparece el haz de un láser de sodio. En el fondo de la imagen se ve la Vía Láctea. (Autor de la fotografía G. Hüdepohl/ESO)

que era necesario dar cuenta fueron predichos por él. Esto es así no solo porque en la teoría cuántica de campos se realiza de manera concreta la dualidad a la que me he referido en otras partes de este artículo, sino porque la compatibilidad del formalismo cuántico con la relatividad especial impone restricciones importantes a su forma.

La teoría cuántica de campos puede ser definida de forma muy general como la mecánica cuántica de los sistemas con un número infinito de grados de libertad. Aunque no existe un método general de cuantización que sea aplicable a todos los sistemas clásicos concebibles, existen una serie de reglas que permiten tratar, al menos dentro de lo que se conocen como esquemas perturbativos, ciertos tipos de teorías de campos obtenidas a partir de lagrangianas. Las teorías cuánticas de campos pueden ser clasificadas en dos grandes grupos: aquellas compatibles con los postulados de la relatividad especial (que se construyen a partir de lagrangianas invariantes bajo el grupo de Poincaré) y las no relativistas, que encuentran una aplicación fundamental en el contexto de la Física de la materia condensada. La teoría cuántica de la gravitación merece una consideración independiente.

Si nos concentramos en las teorías cuánticas de campos utilizadas para describir las interacciones fundamentales de la Física es posible reducirlas conceptualmente a la fusión de la mecánica cuántica con la relatividad. En palabras de Steven Weinberg, uno de los creadores del modelo estándar de las interacciones fundamentales:

«[...] la teoría cuántica de campos es como es, porque (dejando al margen teorías como las de cuerdas en las que hay infinitos tipos de partículas) es la única manera de reconciliar los principios de la mecánica cuántica (incluido el principio de descomposición en racimos) con los de la relatividad especial.» (Weinberg, 1995).

El papel concreto de la simetría de Poincaré en la formulación de la teoría cuántica de campos es indirecto pero profundo. La formulación de una teoría cuántica compatible con el principio de relatividad se basa en la utilización de espacios de Hilbert —un cierto tipo de espacio de vectores que describen los estados cuánticos— que sirven como base para representaciones irreducibles de este grupo. La clasificación de estas representaciones fue llevada a cabo por Wigner. Cada una de las representaciones posibles viene etiquetada por dos parámetros. Uno de ellos tiene interpretación directa como masa al cuadrado, posiblemente nula, el

otro como *spin* (o *helicidad* en el caso de partículas de masa cero). El concepto físico de partícula elemental está asociado directamente con estas representaciones cuyas etiquetas definen sus propiedades esenciales. El fotón es una excitación de masa nula y helicidad 1 del campo electromagnético y se corresponde con una de estas representaciones irreducibles. Vemos así que lo que en los trabajos iniciales de Einstein aparecía como una hipótesis necesaria para comprender las propiedades estadísticas o termodinámicas de la radiación es, en realidad, consecuencia de la relatividad especial y de la simetría espacio-temporal asociada.

Figura 14. Ejemplo de diagrama de Feynman en electrodinámica cuántica que describe la amplitud de un proceso cuántico. Las líneas continuas con flechas representan partículas cargadas (electrones y positrones en este caso). Las líneas quebradas representan fotones virtuales

La primera teoría cuántica de campos para la que se consiguió una formulación que permitía calcular de forma precisa los resultados asociados con experimentos realizables en el laboratorio fue la electrodinámica cuántica: la teoría cuántica de la interacción entre la luz y la materia —ver la excelente exposición semipopular (Feynman, 2004)—. Desde el punto de vista clásico este modelo incluye dos ingredientes: el campo electromagnético y el campo del electrón. Las excitaciones fundamentales de ambos campos son, precisamente, los fotones y los electrones. El tratamiento perturbativo de esta teoría permite calcular observables básicos, en particular la llamada matriz *S* que contiene el resul-

tado de todos los experimentos de colisión en los que intervengan fotones, electrones y positrones. Para ello se utiliza un poderoso e intuitivo método de cálculo que se apoya en la diagramática introducida por Feynman para representar las amplitudes elementales de procesos cuánticos (ver figura 14). En este lenguaje la interacción entre partículas cargadas (electrones y positrones en este caso) admite una interpretación muy atractiva: es debida al intercambio de partículas *virtuales* (fotones, electrones y positrones). Se realiza así de manera concreta el deseo de Einstein de sustituir la acción de los campos por un intercambio de partículas. En este sentido, y como consecuencia de la necesidad de incorporar la relatividad especial en la formulación

de la teoría cuántica de campos, la luz juega un último papel: el de agente responsable de la transmisión de la interacción electromagnética.

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer a Sergio Barbero, Juan Margalef Bentabol y Eduardo J. S. Villaseñor tanto los comentarios recibidos durante las numerosas discusiones que hemos mantenido sobre relatividad como su minuciosa revisión de las sucesivas versiones de este manuscrito. Este trabajo ha sido realizado con la ayuda de los proyectos del MINECO FIS2012-34379 y el Consolider-Ingenio 2010, CPAN (CSD2007-00042).

BIBLIOGRAFÍA

- Arons, A. B. y Peppard, M. B. (1965). Einstein's Proposal of the Photon Concept—a Translation of the Annalen der Physik Paper of 1905. *American Journal of Physics*, 33, pp. 367–374.
- Bondi, H. (1965). *Relativity and Common Sense, a New Approach to Einstein*. Londres: Heinemann Educational Books Ltd.
- Bradley, J. (1727), A Letter from the Reverend Mr. James Bradley Savilian Professor of Astronomy at Oxford, and F. R. S. to Dr. Edmond Halley Astronom. Reg. &c. Giving an Account of a New Discovered Motion of the Fix'd Stars. *Philosophical Transactions*, 1727–1728, 35, pp. 637–661.
- de Sitter, W. (1913a). An Astronomical Proof for the Constancy of the Speed of Light. Traducción de Fritzius, R. [en línea]. [Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2014]. Disponible en: <http://www.datasync.com/~rsf1/desit-1e.htm>
- de Sitter, W. (1913b). Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. *Physikalische Zeitschrift*, 14, pp. 429–429.
- Dyson, F. W., Eddington, A. S. y Davidson, C. A. (1920). Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 220, pp. 291–333.
- Einstein A. (1905a). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik* (ser. 4), 17, pp. 891–921.
- Einstein A. (1905b). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik* (ser. 4), 17, pp. 132–148.
- Einstein, A. (1909). Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 10, 22, pp. 817–826.
- Einstein, A. (1936). Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field. *Science*, 84, pp 506–507.
- Einstein, A. (1951). Autobiographical notes. En: Schilpp, P. A. (ed.). *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (2nd edition). Nueva York: Tudor Publishing, pp. 2–95.
- Einstein, A. (2001). Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento. En: Stachel, J. (ed.). *Einstein 1905: un año milagroso*. Barcelona: Editorial Crítica, pp. 111–143.
- Feynman, R. P. (2004). *Electrodinámica cuántica: la extraña teoría de la luz y la materia*. Madrid: Alianza Editorial.
- FitzGerald, G. F. (1889). The Ether and the Earth's Atmosphere. *Science*, 13, 328, p–390.
- Fizeau, H. (1851). Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse à laquelle la lumière se propage dans leur intérieur. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences de l'Institut de France* 33, pp. 349–355.
- Fresnel, A. (1818). Lettre d'Augustin Fresnel à François Arago sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique. *Annales de Chimie et Physique*, 9, pp. 57–66.
- Geroch, R. (1986) *La relatividad general de la A a la B*. Madrid: Alianza Editorial.
- Ghez, A., Yelda S., Meyer L., Lu J., Hornstein, S. y Tanner, A. (2014). *Stellar Orbits in the Central Parsec* [en línea]. [Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2014]. Disponible en: <http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/animations.html>
- Hooke R. (1665). *The Project Gutenberg eBook, Micrographia, by Robert Hooke* [en línea]. [Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2014]. Disponible en: <http://www.gutenberg.org/files/15491/15491-h/15491-h.htm>
- Huygens C. (1690). *The Project Gutenberg eBook, Treatise on Light, by Christiaan Huygens, Translated by Silvanus P. Thompson* [en línea]. [Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2014]. Disponible en: <http://www.gutenberg.org/files/14725/14725-h/14725-h.htm>
- Janssen, M. y Stachel, J. (2004). *The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies* [en línea]. [Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2014]. Disponible en: <http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/Preprints/P265.PDF>
- Lorentz, H. A. (1892a). La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants. *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 25, pp. 363–552.
- Lorentz, H. A. (1892b). De relatieve beweging van de aarde en den aether. *Verhandelingen der Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam*, 1, pp. 74–79.

Lorentz, H. A. (1892c). *The Relative Motion of the Earth and the Aether* [en línea]. [Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2014]. Disponible en: http://en.wikisource.org/wiki/Translation:The_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Aether

Michelson, A. A. (1881). The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *American Journal of Science*, 22, pp. 120–129.

Michelson, A. A. y Morley, E., (1887). On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *American Journal of Science*, 34, pp. 333–345.

Minkowski, H. (1909). Raum und Zeit. *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*, pp. 75–88.

Minkowski, H. (1952). Space and Time. En Lorentz, H. A., Einstein, A., Minkowski, H. y Weyl, H. (eds.) *The Principle of Relativity*. Nueva York: Dover Publications Inc., pp. 73–96.

The Nobel Foundation, *The Nobel Prize in Physics 1921* [en línea]. [Fecha de consulta: 27 de noviembre de 2014]. Dispo-

nible en: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/index.html

Norton J. D. (2013). Chasing the Light: Einstein's Most Famous Thought Experiment. En: Frappier M., Meynell L., Brown J. R. (eds.). *Thought Experiments in Philosophy, Science, and the Arts*. Nueva York: Routledge, pp. 123–140.

Penrose, R. (1959). The Apparent Shape of a Relativistically Moving Sphere. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 55, 1, pp. 137–139.

Penrose, R. (2006). *El camino a la realidad: una guía completa de las leyes del universo*. Madrid: Debate.

Sánchez Ron, J. M. (1985). *El origen y desarrollo de la relatividad* (2ª ed.). Madrid: Alianza Editorial.

Schaffner, K. F. (1972). *Nineteenth Century Aether Theories*. Oxford: Pergamon Press.

Stokes, G. G. (2009). *Mathematical and Physical Papers* (vol. 2). Cambridge: Cambridge University Press.

Swenson, L. S. Jr. (2012). *The Ethereal Aether: A History of the Michelson-Morley-Miller*

Aether-Drift Experiments, 1880–1930. Austin: University of Texas Press.

Terrell, J. (1959). Invisibility of the Lorentz Contraction. *Physical Review*, 116, 4, pp. 1041–1045.

Walsh, D., Carswell, R. F. y Weymann, R. J. (1979). 0957 + 561 A, B - Twin quasistellar objects or gravitational lens? *Nature*, 279, pp. 381–384.

Weinberg, S. *The quantum theory of fields* (vol. I: Foundations). Nueva York: Cambridge University Press.

Young, T. (1804). Experiments and Calculations relative to physical Optics. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 94 (1), pp. 1–14.

17ª Conferencia General de Pesos y Medidas. (1983). Resolución 1, *Comptes Rendus*, 97.

PROCEDENCIA DE LAS FIGURAS

Figura 1: *Einstein at age 14*. Dominio público. Tomada de <http://faculty.randolph-college.edu/tmichalik/einstein.htm>

Figura 2: *A diagram of Jupiter (B) eclipsing its moon Io (DC) as viewed from different points in earth's orbit around the sun*. Procedente de: *Demonstration touchant le mouvement de la lumière trouvée par M. Römer de l'Académie Royale des Sciences*, (1676). Tomada de http://en.wikipedia.org/wiki/Ole_R%C3%B8mer

Figura 3: Simulación realizada por el autor.

Figura 4: Aberración estelar con un telescopio hueco. Realizada por el autor.

Figura 5: Aberración estelar con un telescopio lleno de agua. Realizada por el autor.

Figura 6: *Setup of the Fizeau Experiment* (1851). Autor: Éleuthère Mascart. Dominio público. Tomada de http://en.wikipedia.org/wiki/Fizeau_experiment

Figura 7: *Fig. 3 from "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether"*. Dominio público. Tomada de http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley_experiment

Figura 8: Procedimiento operacional para comprobar la simultaneidad de dos sucesos con respecto a un observador inercial. Realizada por el autor.

Figura 9: Procedimiento operacional para medir la longitud de una regla. Realizada por el autor.

Figura 10: *Negative of the 1919 solar eclipse taken from the report of Sir Arthur Eddington on the expedition to verify Einstein's prediction of the bending of light around the sun*. Dominio público. Tomada de http://en.wikipedia.org/wiki/Tests_of_general_relativity

Figura 11: *A Horseshoe Einstein Ring from Hubble*. NASA/ESA. Dominio público.

Tomada de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_Horseshoe_Einstein_Ring_from_Hubble.JPG

Figura 12: *Hubble Frontier Field Abell 2744*. NASA/ESA. Dominio público. Tomada de <http://www.nasa.gov/content/hubble-frontier-field-abell-2744/#.VH3IKtKG98F>

Figura 13: *Lying down on the VLT platform*. Imagen utilizada bajo las condiciones de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International license. Autor: G. Hüdepohl/ESO. Tomada de http://www.eso.org/public/images/gerd-huedepohl_4/

Figura 14: Diagrama de Feynman. Realizada por el autor.