

SCIENTIÆ studia, São Paulo, v. 5, n. 4, p. 425-52, 2007



La hipótesis del cuanto de luz y la relatividad especial ¿Por qué Einstein no las relacionó en 1905?

Alejandro CASSINI & Marcelo LEONARDO LEVINAS



RESUMEN

Nuestro objetivo es determinar por qué Einstein no mencionó su artículo de marzo de 1905 sobre el *quantum* de luz, referido al carácter corpuscular de la luz, en el artículo en el que introduce la relatividad especial, escrito sólo tres meses después. Las razones principales que hemos encontrado son: las diferentes actitudes de Einstein frente a la existencia del espacio absoluto y del éter; su permanente compromiso con la primacía ontológica del campo electromagnético; las características no clásicas que debió atribuirle al cuanto de luz; su ambivalencia respecto de la electrodinámica de Maxwell como representación completa y definitiva de la realidad física a la vez que la sospecha de que una eventual dualidad onda/partícula no resultaría una dificultad insalvable; su poco comprometida e inestable actitud frente al atomismo; el carácter más conservador aunque menos intuitivo de la relatividad especial; la diferente interpretación del *status* epistemológico de las hipótesis y las marcadas diferencias en la presentación de las respectivas teorías.

PALABRAS-CLAVE • Contexto experimental. Presupuestos teóricos. Hipótesis auxiliares. Explicación mecánico-causal. Dualidad onda/partícula. Éter luminífero.

INTRODUCCIÓN

En 1905 Einstein parece haber sostenido simultáneamente dos teorías de la luz incompatibles entre sí. En el artículo en el que introdujo la noción de cuanto de luz (Einstein, 1905a), propuso una teoría semicorpuscular con cierto carácter cuántico, novedosa y muy diferente de las teorías clásicas de la emisión de corte newtoniano. En el artículo posterior en el que formuló la relatividad especial (Einstein, 1905b), adhirió sin reservas a la teoría ondulatoria clásica de Maxwell, señalando, además, que se la podía sostener sin presuponer la existencia del éter luminífero. El objetivo de este trabajo era elaborar una nueva mecánica que preservara la validez de las ecuaciones de Maxwell. En cambio, el objetivo del trabajo sobre el cuanto de luz era muy diferente: Einstein se

propuso explicar ciertos fenómenos relativos a la interacción entre la materia y la luz, fenómenos que eran conocidos experimentalmente pero que no tenían una explicación satisfactoria en el contexto de la electrodinámica clásica.

El punto de partida de Einstein en su artículo sobre el cuanto de luz implicaba un reconocimiento explícito de que la teoría ondulatoria de la luz, a pesar de su éxito indiscutible, tenía limitaciones explicativas para tratar los procesos de absorción y emisión de la luz y resultaba, por tanto, al menos incompleta. En el artículo donde se formula la relatividad especial, en cambio, no hay referencia alguna a este hecho. Einstein (1905a) menciona tres fenómenos luminosos que no se pueden explicar mediante la teoría de Maxwell: la fotoluminiscencia, el efecto fotoeléctrico y la ionización de gases por la luz ultravioleta. La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico llegó a ser tan famosa que su trabajo se llamó a veces “el artículo del efecto fotoeléctrico”. Esta denominación fue, ciertamente, inapropiada ya que, en realidad, el objetivo de Einstein era mucho más amplio: intentaba proporcionar un punto de vista acerca de la radiación que diera cuenta de todos los fenómenos de interacción entre la materia y la luz que la teoría de Maxwell dejaba sin explicar.

Los dos artículos de 1905 tratan problemas diferentes, pero, no obstante, tienen en común el hecho de que, en cada uno de ellos, la estructura y las propiedades de la luz desempeñan un papel fundamental. A pesar de ello, Einstein no hizo referencia alguna, en su artículo sobre la relatividad especial (1905b), a su teoría del cuanto de luz, formulada apenas tres meses antes (1905a). Aparentemente, en cada uno de estos trabajos Einstein mantiene una concepción diferente de la naturaleza de la luz. ¿Sostuvo simultáneamente dos concepciones de la luz en principio incompatibles? Sin duda, Einstein estaba preocupado fundamentalmente en enfatizar los aspectos más novedosos y revolucionarios de cada una de sus dos teorías de 1905. No obstante, el silencio de Einstein (1905b) sobre su teoría del cuanto de luz no deja de ser significativo.

Retrospectivamente, sabemos que la relatividad especial y la teoría cuántica de la luz sólo pudieron conciliarse en el contexto de una teoría cuántica de campos, la electrodinámica cuántica, que comenzó a formularse en la segunda mitad de la década de 1920, pero sólo alcanzó una formulación consistente hacia 1950. En 1905, no existía aún ninguna mecánica cuántica, por lo que Einstein formuló su teoría del cuanto de luz en el marco de la mecánica clásica del punto material, por lo menos respecto de las leyes de movimiento. La teoría del cuanto de luz, como quiera que se la interpretara, contradecía evidentemente a la electrodinámica de Maxwell, pero no a la cinemática y la dinámica de Newton. En la relatividad especial, sin embargo, Einstein presenta una mecánica alternativa a la newtoniana, por lo que, en un contexto relativista, la noción misma de cuanto de luz debía ser reconceptualizada.

Nuestro punto de partida es la siguiente pregunta: ¿Por qué Einstein en el artículo en el que formuló la relatividad especial no hizo referencia alguna al artículo, escrito sólo tres meses antes, donde introdujo el cuanto de luz? Esta es una cuestión significativa, pero aún muy poco explorada, y que, a su vez, permite plantear la pregunta más relevante: ¿Einstein no relacionó sus dos concepciones de la luz porque hubiera resultado contradictorio sostenerlas simultáneamente? Según nuestro punto de vista, existen diversas y complejas razones: el carácter particular del compromiso de Einstein con la electrodinámica de Maxwell, el diferente *status* epistemológico que les otorgó a sus dos concepciones de la luz, la ineludible y conflictiva dualidad onda/partícula de la luz, la imposibilidad de concebir a los cuantos de luz como corpúsculos clásicos y las restricciones que la relatividad especial, de hecho, les impondría a estas entidades.¹

I LA EFICACIA DE LAS HIPÓTESIS DE EINSTEIN SOBRE EL CUANTO DE LUZ

Desde fines del siglo XIX, el problema de explicar cómo se producen las interacciones entre la materia y la radiación constituía un ámbito de investigación de frontera que presentaba severas anomalías para la electrodinámica clásica elaborada por Maxwell y Lorentz. Basta recordar los problemas referidos a la radiación del cuerpo negro que motivaron la introducción del cuanto de acción de Planck (Planck, 1900). Al comienzo de su artículo (1905a), Einstein señalaba explícitamente que los fenómenos asociados con la radiación del cuerpo negro planteaban una dificultad para la teoría de Maxwell (cf. Einstein, 1905a, p. 133). Recordemos, además, que la teoría que Planck había propuesto para resolver este problema, tampoco le parecía satisfactoria.²

Entre los fenómenos que Einstein señaló como problemáticos para la electrodinámica clásica, sólo consideraremos el efecto fotoeléctrico (en adelante abreviado como *EF*). Este efecto se interpretaba en 1905, al igual que en nuestros días, como la emisión de electrones (que fueron denominados “fotoselectrones”) por parte de las sustancias sobre las que incidía luz de determinadas frecuencias. Sin embargo, el descubrimiento

¹ Para la elaboración de este trabajo, hemos utilizado el esquema histórico de Pais (2005 [1982]). Sobre el contexto histórico del origen de la física cuántica, hemos tenido en cuenta las obras de Jammer (1966), Kuhn (1978), Pais (1988 [1986]) y Ron (2001). Respecto de la dualidad onda/partícula nos apoyamos en las obras de Stuewer (1975) y Wheaton (1983). Sobre la obra del propio Einstein, tuvimos en cuenta las presentaciones generales de Klein (1967) y de Stachel (1989), el panorama histórico de Balibar (1992) y los artículos recientes de Cassidy (2005) y Stuewer (2006). Entre la bibliografía sobre este tema escrita en lengua española, merece destacarse el libro de Veguillas (1990). Nunca hemos hallado, sin embargo, un trabajo que tratara de responder de manera sistemática a las preguntas que acabamos de formular.

² Este es un punto que no trataremos aquí; véanse al respecto las obras de Kuhn (1978); Pais (2005 [1982]); Veguillas (1990).

accidental de dicho efecto por H. Hertz en 1887, fue anterior al descubrimiento del electrón por J. J. Thomson en 1897, por lo que originalmente sólo podía conceptualizarse como la producción de una corriente eléctrica.

Antes de 1905, principalmente debido a los experimentos de Lenard (1902), se habían establecido cuatro regularidades empíricas sobre el *EF*, de las cuales tres no tenían explicación teórica satisfactoria en el marco de una concepción ondulatoria de la luz.

La primera era que existía un *umbral* en la *frecuencia* de la luz que provocaba el *EF*. Para cada sustancia parecía haber una *frecuencia crítica* por debajo de la cual no se observaba la emisión de fotoelectrones, cualquiera fuese la intensidad de la luz incidente. Sin embargo, según la teoría electromagnética, la energía de una onda luminosa era proporcional a su *intensidad* (o sea, al módulo de la *amplitud* al cuadrado). La segunda era que la energía de los fotoelectrones aumentaba con la *frecuencia* de la luz incidente;³ esto nuevamente resultaba incompatible con la electrodinámica de Maxwell, donde la densidad de energía de una onda luminosa no tiene relación alguna con su frecuencia. La tercera era que el número de fotoelectrones resultaba proporcional a la *intensidad* de la luz incidente; este era el único hecho experimental que podría tener una explicación ondulatoria ya que, dado que una onda más intensa posee mayor energía, era razonable esperar que las ondas de mayor intensidad excitasen un número mayor de electrones. La cuarta era que no había ningún *tiempo de retardo* en la emisión de fotoelectrones, cualquiera fuera la intensidad de la luz incidente; sin embargo, para la teoría electromagnética debía existir un tiempo de retardo *inversamente* proporcional a la intensidad de la onda incidente.

En 1905, Einstein propuso una hipótesis audaz que resolvía simultáneamente todas las anomalías que hemos señalado. Consistía en suponer que la energía de la luz no estaba distribuida de manera continua, como en una onda luminosa, sino de manera discreta en cuantos localizados puntualmente. Conjeturó que cada cuanto de luz poseía una energía $E = hn$, de acuerdo con la fórmula de Planck para la energía cuantificada (Planck, 1900). También postuló que, en las interacciones entre la luz y la materia, la energía se intercambiaba en cantidades discretas consistentes en la absorción o emisión de un cuanto luminoso por parte de los átomos del material. El pasaje, donde Einstein presentó sus hipótesis generales acerca de la naturaleza de la luz, resulta tan claro y conciso que merece reproducirse, una vez más, en toda su extensión:

³ Lenard sólo había determinado esta relación sin especificar la manera en que frecuencia y energía estaban vinculadas (Lenard, 1902). Experimentalmente no se había establecido que la relación fuera lineal y la cuestión recién quedó saldada con los experimentos de Millikan más de una década después (Millikan, 1916a, 1916b). Hasta entonces se plantearon diferentes relaciones entre la frecuencia de la luz y la energía de los fotoelectrones (lineales como la de Einstein, cuadráticas, logarítmicas y otras).

De hecho, ahora me parece que las observaciones de la “radiación de cuerpo negro”, fotoluminiscencia, producción de rayos catódicos por luz ultravioleta y otros grupos de fenómenos concernientes a la emisión y transformación de la luz aparecen más comprensibles bajo el supuesto de que la energía de la luz está distribuida discontinuamente en el espacio. De acuerdo con el supuesto que contemplamos aquí, en la propagación de un rayo de luz que sale de un punto, la energía no está distribuida continuamente en un espacio que se vuelve más y más grande, sino que ésta consiste en un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio, los cuales se mueven sin dividirse, y sólo pueden ser absorbidos o generados como un todo (Einstein, 1905a, p. 133).

La argumentación que se presenta en el pasaje que acabamos de citar encaja perfectamente en el patrón general del razonamiento llamado *abducción* por Peirce, *retroducción* por Hanson e *inferencia a la mejor explicación* por Harman.⁴

Antes de aplicar la hipótesis del cuanto de luz, Einstein ofrece un extenso argumento para justificarla. Usualmente se lo ha interpretado como un argumento deductivo⁵ cuya conclusión es que:

(...) la radiación monocromática (de densidad suficientemente baja) se comporta, en lo que concierne a la dependencia de la entropía respecto del volumen, como un medio discontinuo consistente en cuantos de energía de magnitud $R\beta\nu/N$ (...) (Einstein, 1905a, p. 143).

⁴ La forma de esta clase de inferencia es la siguiente: se observan los fenómenos anómalos O ; si la hipótesis H fuera verdadera, O sería comprensible; luego, hay razones para pensar que H es verdadera. Las referencias esenciales son Peirce (1998 [1903]), Hanson (1958) y Harman (1965). El estudio más completo de esta clase de inferencia es el de Lipton (2004). La denominación “inferencia a la mejor explicación”, que utilizamos aquí, es la que se prefiere actualmente. Muchos filósofos de la ciencia emplean esta clase de inferencia de una manera realista, como si justificara la verdad de la conclusión y, por tanto, la realidad de las entidades inobservables postuladas por la hipótesis en cuestión. Einstein no la emplea de esa manera; sólo concluye que la hipótesis del cuanto de luz es una buena explicación de los fenómenos.

⁵ Aquí no nos ocuparemos de exponer o reconstruir el argumento de Einstein, que, por otra parte, emplea como premisas numerosas hipótesis y teorías pertenecientes al dominio de la física estadística, entre otras, la ley de Wien y la ley de Stefan-Boltzmann. Una exposición detallada del argumento de Einstein y de las teorías físicas presupuestas se encuentra en Pais (2005 [1982], Cap. 19). Dorling (1971) es un intento de reconstruir este argumento en términos de la llamada “deducción a partir de los fenómenos”. Esta expresión newtoniana, sin embargo, es engañosa, si se la toma literalmente. La hipótesis de Einstein no se deduce en modo alguno de los fenómenos, sino, en todo caso, como Dorling mismo reconoce, de la descripción de ciertos fenómenos junto con diversas hipótesis teóricas de la física estadística, que no son en absoluto fenómenos.

Einstein prosigue diciendo que si efectivamente la radiación se comporta de esta manera, entonces:

(...) es necesario investigar si las leyes de la emisión y la transformación de la luz también están construidas como si la luz consistiera en tales cuantos de energía (Einstein, 1905a, p. 14³⁻⁴).

Advirtamos dos características notables de estos pasajes. En primer lugar, Einstein no escribe la constante de Planck como h , sino como la relación entre otras constantes.⁶ Tampoco llama a esta expresión con el nombre “constante de Planck”, a pesar de que era la segunda vez en la historia que se la utilizaba en una ecuación. La reluctancia de Einstein puede explicarse por el hecho de que no se sentía satisfecho por la forma en que Planck había justificado *a posteriori* su célebre fórmula. Por lo demás, no sólo aceptó la hipótesis cuántica de Planck, esto es, la necesidad de cuantificar la energía para explicar las anomalías producidas por el fenómeno de la radiación del cuerpo negro, sino que la extendió a la constitución de la radiación electromagnética libre. En segundo lugar, Einstein no afirma la existencia efectiva de los cuantos de energía. Su conclusión lleva siempre la cláusula “como si”, esto es, la presenta como una afirmación *ex hypothesi*; en ello consiste, como veremos, el carácter “heurístico” de la formulación de toda su teoría.

El carácter revolucionario de su concepción cuántica de la luz consiste, sobre todo, en que concibe que la *radiación libre* no se propaga como una onda continua, sino como un agregado de cuantos discretos. Esto significa que la hipótesis cuántica no se aplica solamente a la interacción de la luz con la materia, sino también a la propagación de la luz en el vacío. Planck y la mayoría de los físicos en ese momento fueron más conservadores y prefirieron mantener la teoría de Maxwell para la radiación libre, trasladando el problema del carácter cuántico de la luz exclusivamente a los procesos de interacción con la materia.⁷ Einstein podría haber seguido este camino, que luego se reveló intran-sitable ya que dejaba sin explicar cómo la onda luminosa incidente podía “transformarse” en corpúsculos discretos, cuando la luz interactuaba con cuerpos materiales.

⁶ $R\beta/N$, donde R es la constante universal de los gases, N es “el número de moléculas reales en un equivalente gramo” (el número de Avogadro) y $\beta = h/k$ (donde k es la constante de Boltzmann).

⁷ En una carta a Einstein del 6 de julio de 1907, Planck escribió lo siguiente: “No busco el significado del *quantum* de acción en el vacío, sino más bien en sitios en que ocurra absorción y emisión, y supongo que lo que sucede en el vacío está descrito rigurosamente por las ecuaciones de Maxwell” (Pais, 2005 [1982], p. 384). Dos años más tarde, en su comentario a Einstein (1909b), Planck volvía a insistir sobre ese punto diciendo que “deberíamos intentar transferir todo el problema de la teoría cuántica al área de la *interacción* entre materia y energía radiante; así, los procesos en el vacío puro podrían explicarse temporariamente con ayuda de las ecuaciones de Maxwell” (Einstein, 1909b, p. 825).

En la explicación del *EF*, Einstein utilizó, de hecho, todo un conjunto de hipótesis que podemos formular de esta manera:

- H1*: La energía de un rayo luminoso no es continua sino que consiste en un número finito de cuantos de energía.
- H2*: La energía de cada cuanto es igual a la constante de Planck multiplicada por la frecuencia de la luz ($E = h\nu$).
- H3*: Cada cuanto luminoso es de naturaleza puntual y tiene una localización bien definida en el espacio.
- H4*: Cuando interactúan con la materia, los cuantos de luz se absorben o emiten como unidades completas e “indivisibles”, es decir, la materia absorbe o emite la totalidad de la energía del cuanto.
- H5*: Cada cuanto de luz interactúa con un único electrón y cada electrón con un único cuanto de luz.⁸
- H6*: Los cuantos de luz no interactúan entre sí cuando la luz se propaga en el vacío, o al menos, se hallan tan separados uno de otro que toda interacción entre ellos resulta despreciable.

En una reconstrucción hipotético-deductiva, todas estas hipótesis podrían considerarse como los postulados (no necesariamente independientes entre sí) de una teoría más o menos general acerca del cuanto de luz. Usualmente, mediante la expresión “la hipótesis del cuanto de luz” se ha hecho referencia a algunas de las primeras cuatro hipótesis que enunciamos en la lista anterior. Sin embargo, las dos últimas son claramente independientes de las restantes y, a la vez, resultan esenciales para dar cuenta de la interacción de los cuantos de luz con los electrones. Así pues, la llamada hipótesis del cuanto de luz de Einstein es, en realidad, una teoría que incorpora no sólo hipótesis relativas a la composición de la luz, sino también hipótesis acerca de la interacción de la luz con la materia.

La explicación de Einstein del *EF* es claramente una explicación causal. Su patrón explicativo se corresponde muy bien con el llamado modelo mecánico-causal de

⁸ Esta hipótesis es incorrecta en algunos casos. Actualmente sabemos que cuando la intensidad de la luz es muy alta, por ejemplo, en la luz láser, un electrón puede absorber dos fotones de energía $h\nu$, lo cual equivale a un fotón de energía $2h\nu$. En este caso, el *EF* se produce como si la luz incidente tuviera el doble de la frecuencia que realmente tiene, por lo que la ley de Einstein no se cumple. Se conocen asimismo procesos atómicos de absorción o emisión estimulada de tres o más fotones. Incluso es posible que los fotones absorbidos tengan diferentes frecuencias (véase Cohen-Tannoudji *et alia*, 1998, p. 98 y ss.). Además, un mismo fotón puede interactuar con varios electrones de un mismo átomo.

W. Salmon (cf. Salmon, 1984, 1998).⁹ Esta clase de explicación es posible porque la teoría del cuanto de luz es aún una teoría determinista. Los cuantos de luz de Einstein todavía retienen algunas propiedades características de los corpúsculos materiales de la mecánica clásica: poseen localización espacio-temporal bien definida y tienen trayectorias perfectamente determinadas. Por esa razón, pueden interactuar causalmente con partículas de otra especie, tales como los electrones. Tal interacción debería involucrar, como todas las interacciones clásicas, una transferencia de energía entre partículas. Aunque Einstein no lo afirma explícitamente, es plausible suponer que la energía se conserva en todas las interacciones entre los cuantos de luz y los electrones. Finalmente, la interacción causal ocurre en un tiempo y lugar bien determinados. Como tal, debe durar un tiempo característico que debe ser muy pequeño, aunque nunca puede ser nulo.

2 COSTOS Y BENEFICIOS DE LA EXPLICACIÓN DE EINSTEIN

Durante casi dos décadas, la hipótesis de Einstein acerca del cuanto de luz fue rechazada de manera casi unánime por la comunidad de los físicos. En efecto, algunos la consideraron como un retorno a una concepción corpuscular que creían superada. Muchos insistieron en la imposibilidad de explicar los fenómenos de interferencia, difracción y polarización de la luz, que tan naturalmente se explicaban en el contexto de la teoría ondulatoria. Einstein aceptó esta crítica y por eso en el Primer Congreso Solvay de 1911 afirmó: “Insisto en el carácter provisional de este concepto (*quanta* de luz), que no parece reconciliable con las consecuencias experimentales verificadas de la teoría ondulatoria” (Einstein *apud* Pais, 2005 [1982], p. 383). Desde nuestro punto de vista, sin embargo, había, además de esta incompatibilidad, problemas conceptuales muy profundos en la noción misma de cuanto de luz, que deberían considerarse desde una perspectiva histórica. Para ello, veamos la situación de la explicación del *EF* una década después de que Einstein la propusiera.

Antes de 1915, los resultados experimentales sólo habían confirmado, después de muchas dudas, el carácter lineal de la relación entre la energía y la frecuencia de los fotoelectrones. Entre 1915 y 1916, los experimentos de Millikan confirmaron con muy buena precisión la relación energía-frecuencia establecida en la ecuación de Einstein ($E = h\nu - P$), pese a que la intención declarada de Millikan era refutar dicha ecuación

⁹ Típicamente, la explicación mecánico-causal explica los fenómenos macroscópicos mediante una estructura microscópica que no es directamente perceptible.

(cf. Millikan, 1915, 1916a, 1916b).¹⁰ Con todo, después de publicados los resultados de Millikan, la comunidad de los físicos siguió rechazando mayoritariamente la hipótesis del cuanto de luz. La *primera razón* fue el hecho de que después de 1905 se formularon varias interpretaciones del *EF* que se proponían explicarlo sin emplear esa hipótesis. Lorentz, Thomson y Sommerfeld idearon distintas teorías del *EF* basadas en diferentes modelos de la estructura del átomo (cf. Stuewer, 1970a; Wheaton, 1983); sin embargo, todas ellas resultaron incompatibles con el modelo atómico de Bohr, por lo que fueron rápidamente abandonadas después de 1913. Ya en 1912, O. Richardson había logrado deducir la ecuación del *EF* de Einstein sin emplear la hipótesis del cuanto de luz, sino sólo hipótesis termodinámicas de carácter macroscópico. Richardson concluyó que la confirmación experimental de la ecuación de Einstein “no implicaría la aceptación de la teoría unitaria [o sea, de cuantos] de la luz” (Richardson, 1912, p. 574). En realidad, los resultados de Millikan confirmaron la teoría de Einstein, pero no constituyeron un experimento crucial respecto de teorías rivales, como la de Richardson, que también quedaron confirmadas. En ese momento, entonces, hubiera sido razonable suspender el juicio acerca de la confirmación de la hipótesis del cuanto de luz hasta que se encontraran nuevas evidencias.

La teoría de Einstein no incluía ninguna hipótesis específica acerca de la estructura de los átomos, pero suponía algunas ideas generales acerca de la naturaleza de la materia. Einstein asumió que la materia era de carácter discreto y estaba constituida por átomos, cuya estructura interna dejó sin determinar. La única idea acerca de la composición de los átomos que Einstein presupuso es que éstos contenían electrones ligados de manera más o menos débil. También supuso, de manera implícita, que los electrones eran la única clase de partículas que interactuaban con los cuantos de luz para producir el *EF*. Ninguna de estas hipótesis podía considerarse bien confirmadas hacia 1905. No obstante, a la postre, la falta de hipótesis específicas acerca de la estructura del átomo resultó favorable para la teoría de la luz de Einstein, ya que la hizo compatible con el modelo atómico de Bohr (1913) y con los descubrimientos posteriores acerca de la estructura del núcleo atómico.

La *segunda razón* de la resistencia a la hipótesis cuántica de Einstein resulta mucho más general y fundamental que la anterior. En última instancia, como veremos enseguida, era la resistencia más o menos generalizada a aceptar la futura e inevitable dualidad onda/partícula de la luz, ya implícita en el artículo de Planck de 1900 y ya mucho más evidente en el artículo de Einstein de 1905.

¹⁰ De hecho, hacia el final de su artículo, Millikan (1916b) presentaba el esbozo de una teoría del *EF* alternativa a la de Einstein.

La hipótesis del cuanto de luz, aunque resistida, tenía evidentes éxitos explicativos, que deben evaluarse comparativamente con los de otras teorías rivales. Ya hemos señalado que después de 1912 la hipótesis de Einstein no era la única explicación disponible de este efecto; al menos la teoría de Richardson era en ese momento una explicación rival viable. Sin embargo, la mera deducción de la ecuación de Einstein para el *EF* por parte de Richardson no proporcionaba todavía una explicación causal de cómo se producía dicho efecto en el nivel microscópico. Ahora bien, desde un punto de vista epistemológico, la teoría de Einstein tenía dos claras ventajas sobre la de Richardson. En primer lugar, constituía una explicación más profunda porque apelaba a procesos causales que ocurrían en el nivel microscópico. En segundo lugar, aportaba una explicación más general y tenía mayor poder unificador: no sólo explicaba el *EF*, sino también otros fenómenos luminosos. En este sentido, ofrecía, mediante un mismo tipo de patrón explicativo (cf. Kitcher, 1989), una explicación coherente de diversos procesos de interacción entre la luz y la materia, procesos que, hasta ese momento, se consideraban susceptibles de explicaciones de diferente naturaleza. Por esta razón, la hipótesis del cuanto de luz podía considerarse confirmada no sólo por los datos experimentales acerca del *EF*, como los de Lenard (1902), sino también por *todos* los hechos conocidos que conseguía explicar, como la fotoluminiscencia y la radiación del cuerpo negro.

3 CORPÚSCULOS NEWTONIANOS *versus* CUANTOS DE LUZ

En un modelo corpuscular de tipo newtoniano, la energía de cada corpúsculo luminoso debería depender de su masa y/o de su velocidad. Por esto, en principio, es posible que existan corpúsculos que posean diferentes masas y se muevan con diferentes velocidades. Cuando la luz se propaga, las partículas luminosas se mueven libremente en un espacio casi vacío, sin colisionar con los corpúsculos de materia. Los corpúsculos de luz interactúan con los medios densos mediante fuerzas a distancia, a modo de la gravitación, de tal manera que deben aumentar su velocidad cuando ingresan a un medio de mayor densidad, por ejemplo, al pasar del aire al agua. El índice de refracción de los rayos luminosos de diferentes colores puede depender, entonces, de la masa y/o de la velocidad de los corpúsculos, aunque el propio Newton no fue capaz de determinarlo. No hay nada en este modelo de la naturaleza de la luz que permita, en principio, relacionar las propiedades de los corpúsculos luminosos con propiedades típicamente ondulatorias tales como la frecuencia o la amplitud de la onda.

En la concepción ondulatoria, en cambio, la energía de la luz depende de la amplitud de la onda luminosa, mientras que el color depende de su frecuencia. En el esquema conceptual ondulatorio, por su parte, no hay lugar para atribuir a la luz propie-

dades características de los corpúsculos tales como localización espacial y temporal, masa e impenetrabilidad. Las ondas se extienden sobre volúmenes de espacio cada vez mayores a medida que se propagan en el tiempo, pueden superponerse y ocupar el mismo volumen y, finalmente, no tienen masa. Al pasar a un medio más denso la velocidad de la onda disminuye, aunque su frecuencia permanece inalterada.

Cuando Einstein introduce la noción de cuanto de luz y caracteriza a la energía de éstos en función de su frecuencia, realiza una *atípica* combinación de propiedades corpusculares y ondulatorias. Estrictamente hablando, los cuantos de luz no son ni partículas ni ondas clásicas. Tienen localización espacio-temporal precisa y por tanto, trayectorias espaciales, como las partículas materiales newtonianas. Presumiblemente deberían tener también masa y momento. Einstein no les atribuyó momento en el artículo de 1905, lo que recién hizo en 1916 (cf. Pais, 2005 [1982], Cap. 21; Veguillas, 1990). Por otra parte, la relatividad especial, concebida sólo tres meses después, habría de imponer, de hecho, restricciones ineludibles a la velocidad y a la masa de los cuantos de luz. Por ejemplo, desde un punto de vista relativista, *todos* los cuantos deberían moverse en el vacío con una velocidad invariante c y tener una masa inercial (en reposo) nula. Es evidente, entonces, que estos no podían ser corpúsculos newtonianos, dotados necesariamente de masa.

Por otra parte, recordemos que los cuantos de luz poseen una propiedad típicamente ondulatoria como es su frecuencia, que no tiene sentido atribuir a una partícula. Más aún, la frecuencia es en (1905a) la propiedad esencial de los cuantos de luz, porque de ella dependen tanto su energía como el color que se le asocia a la luz. Este es un aspecto heterodoxo desde el punto de vista de la teoría ondulatoria, ya que en ésta sólo el color de la luz, pero no su energía, depende de la frecuencia de la onda luminosa. ¿Por qué las energías cinéticas de los cuantos de luz de diferentes colores no dependían de diferencias en sus velocidades,¹¹ cuando en un modelo corpuscular de la luz eso era precisamente lo que cabría esperar? Creemos que en este punto Einstein conservó un compromiso fuertemente maxwelliano. Aceptó de la teoría ondulatoria que todos los colores, esto es luz de diferentes frecuencias, se movían en el vacío con la misma velocidad; por esa razón, las diferentes energías cinéticas de los cuantos de luz sólo podían depender de las diferencias en sus respectivas frecuencias. El hecho de que la energía cinética del cuanto de luz no dependa de su velocidad y sí de su color, sólo resulta comprensible, al menos en un contexto clásico, si dicha velocidad es la misma para todos los colores. No se sigue de esto que esa velocidad no dependa del sistema de referencia y sea invariante como Einstein aceptará en (1905b).

¹¹ Matemáticamente, de la diferencia de los cuadrados de los módulos de las velocidades.

En el artículo (1905a), Einstein sostiene explícitamente que en su propio análisis de la radiación del cuerpo negro “no es posible hablar de un determinado reparto de energía entre éter y materia” (p. 136). En esta expresión, que no es en absoluto clara, aparece la única referencia al éter en todo el artículo, lo que de hecho implica la aceptación de su existencia. Einstein parece presuponer en este punto que las entidades que interactúan deben ser de la misma naturaleza. Así como para los fenómenos de interferencia, admite la interacción entre ondas, para el *EF*, postula una interacción entre corpúsculos: el cuanto de luz y el electrón. Esto se traduce en una incompatibilidad de ciertas distribuciones de densidad de energía de la radiación electromagnética (asociadas al cuerpo negro) con la necesidad de que la energía total sea finita, lo que de hecho conduce a problemas matemáticos insalvables, como la catástrofe del ultravioleta, cuando se trata de integrar la densidad de energía (como función de la frecuencia) en un volumen dado para todas las frecuencias posibles. Esto no constituye, en principio, un problema para una teoría corpuscular que suponga la existencia de un número finito de partículas localizadas en una región espacio-temporal, ya que en tal caso la energía total en cualquier volumen siempre será finita.

Si la idea de Einstein era que la luz tuviese algunas características típicamente corpusculares, entonces, también podría haber supuesto que los cuantos de luz interactuaban con el éter cuando se propagaban. Si bien se admitía que los cuerpos materiales se movían por el éter sin resistencia, sin embargo, cada partícula lumínica, debido a su escasa energía individual, podría sufrir, en principio, una interacción no despreciable con el éter, traducible en una pérdida de energía. Si la energía de la luz dependía de la frecuencia, y no de la velocidad, esto debía manifestarse en un cambio en el color de la luz. Era razonable suponer que si las distancias recorridas por la luz eran cortas, debido a la sutileza del éter, la interacción sería despreciable y sus efectos serían inobservables en un laboratorio. Sin embargo, este efecto podría no ser despreciable a escala cosmológica, donde las distancias son muy grandes.¹²

En resumen, los cuantos de luz de Einstein poseen algunas propiedades características de las partículas materiales y algunas otras propiedades características de las ondas. No tienen, sin embargo, *todas* las propiedades que determinan la identidad de un corpúsculo material, como la masa y el momento. Como señalara Pais, en 1905 el cuanto de luz no era todavía una partícula, sino un “paquete” de energía *E* relacionada

¹² Así, años después, Einstein podría haber explicado el corrimiento al rojo descubierto por Hubble en 1929, no como producto de un efecto Doppler, sino como una especie de cansancio de la luz, en el sentido de una pérdida de energía proporcional a la distancia recorrida debida posiblemente a la interacción con un éter gravitatorio (¡reivindicado por Einstein en 1920!) y traducida en la disminución de la frecuencia. Esta pérdida de energía, en consecuencia, podría no afectar a la velocidad de la luz, la que podría permanecer constante e idéntica para todos los colores.

con la frecuencia n por la ya citada fórmula $E = h\nu$ (Pais, 1988 [1986], p. 245). En principio, se lo puede concebir como una región del campo electromagnético donde la energía tiene una densidad especialmente elevada. En este sentido, la teoría del cuanto de luz aún era compatible con una teoría de campos, pero, evidentemente, resultaba incompatible con la electrodinámica de Maxwell, donde la luz es una onda continua, cuya energía se distribuye en el espacio, y no tiene la composición granular que, en 1905, le atribuyó Einstein. Precisamente, en esa estructura granular del campo electromagnético, la dualidad onda/partícula hacía su primera aparición explícita, todavía de una manera oscura y no bien reconocida (cf. Wheaton, 1983).

La dualidad onda/partícula que aquí se presenta no tenía, obviamente, el mismo carácter que posee actualmente en la física cuántica. Los cuantos de luz no eran todavía entidades plenamente cuánticas, tal como las entendemos ahora. De las propiedades que hoy consideramos características de las entidades cuánticas, estos cuantos de luz sólo poseían dos. En primer lugar, su energía cuantificada, en el sentido de que la luz estaba compuesta de unidades mínimas asociadas a los efectos sobre los fotoelectrones que dependían de la frecuencia, pero *no* en el sentido de que existieran energías prohibidas y que la energía tomara valores discretos (como las habría en el átomo de hidrógeno para el electrón). En segundo lugar, una suerte de dualidad onda/partícula, en el sentido de que los cuantos de luz poseían localización espacio-temporal bien determinada y, además, presentaban características asociadas a la frecuencia y, por tanto, a la longitud de onda, lo cual suponía un objeto espacialmente extendido.

Se acepta generalmente que la existencia real de los cuantos de luz sólo comenzó a admitirse seriamente después del descubrimiento del efecto Compton en 1923 (cf. Compton, 1923; Stuewer, 1975, 2006).¹³ Este proceso, que consiste en la dispersión de la luz por electrones en reposo, tuvo una interpretación netamente corpuscular, basada en la conservación del momento y la energía de los cuantos de luz incidentes.¹⁴ Desde el punto de vista epistemológico, el *EF* y el efecto Compton son dos fenómenos que confirman la hipótesis de Einstein, no de manera aislada, sino en el contexto de un sistema de hipótesis más amplio, pero, como se sabe, no la verifican en absoluto. En principio, era posible que se propusiesen teorías alternativas que explicaran esos mismos fenómenos sin emplear la hipótesis del cuanto de luz.¹⁵

¹³ Curiosamente, Compton no citaba a Einstein en su trabajo.

¹⁴ En una carta a Besso del 24 de mayo de 1924, Einstein le decía que la significación de los resultados de Compton consiste en que demuestran “la realidad del impulso de los cuantos de luz” (Einstein & Besso, 1994, p. 218).

¹⁵ Eso es precisamente lo que ocurrió posteriormente con las llamadas teorías semiclásicas, donde la luz se considera como una onda electromagnética clásica, mientras que los electrones se tratan como entidades cuánticas (cf. Greenstein & Zajonc, 1997, p. 21-35). El hecho de que exista una explicación alternativa del *EF* no implica que la

La admisión de la hipótesis del cuanto de luz no significó el abandono de la teoría ondulatoria tradicional, sino el reconocimiento, todavía resistido, de la dualidad onda/partícula para la luz. Así lo entendió el propio Einstein cuando, en un artículo periodístico publicado el 20 de abril de 1924, reaccionó ante el descubrimiento de Compton con las siguientes palabras:

(...) la radiación se comporta como si consistiese en proyectiles discretos de energía no solamente con respecto a la transferencia de energía, sino también con respecto a la acción de choque. Ahora hay por tanto dos teorías de la luz, las dos indispensables (...) y sin conexión lógica alguna (Einstein *apud* Pais, 2005 [1982], p. 414).

Einstein no encontraba una conexión lógica entre las dos teorías seguramente porque no le parecía posible reducir una a la otra ni unificarlas en una teoría más general. En efecto, debía ser difícil concebir la interacción entre ondas y corpúsculos, caracterizados por propiedades diferentes e incompatibles entre sí. Si en el “efecto” fotoeléctrico, lo observado, esto es, la corriente eléctrica, era un fenómeno de características corpusculares, entonces la “causa” fotoeléctrica debía ser concebida en esos términos, esto es, como producida por alguna especie de corpúsculo, aunque éste no fuese, como ya vimos, completamente clásico.

4 EL CUANTO DE LUZ Y LA RELATIVIDAD ESPECIAL

El resultado paradójico de la hipótesis einsteniana del cuanto de luz consistió en introducir la “atomicidad” en la naturaleza de la luz en abierta oposición a la electrodinámica clásica, para la cual la luz representaba un ejemplo paradigmático de entidad continua. Los dos trabajos de Einstein de 1905 parecen adoptar concepciones incompatibles sobre la naturaleza de la luz. Einstein no las relaciona, sino que, por el contrario, escribe el artículo de la relatividad especial como si su teoría del cuanto de luz *no* existiera. Creemos que durante el proceso de elaboración de la relatividad especial, Einstein debió haberle dado importancia al hecho de que esta teoría imponía restric-

teoría de Einstein sea “defectuosa”, como afirman estos dos autores (Greenstein & Zajonc, 1997, p. 34). En principio, las teorías rivales deben evaluarse a la luz de toda la evidencia disponible (en nuestro ejemplo, no sólo respecto del *EF*, sino de todos los fenómenos que la hipótesis del cuanto de luz explica). En el caso de que las dos teorías resultaran igualmente bien confirmadas, sólo puede concluirse que ambas se encuentran momentáneamente subdeterminadas por la evidencia disponible.

ciones fundamentales a la naturaleza de los cuantos de luz. Estas restricciones forzaban a concebir el comportamiento de dichos cuantos de una manera completamente novedosa y extraña, tanto para la concepción corpuscular clásica de la luz, como para la ondulatoria.

Ahora bien, en principio, la hipótesis del cuanto de luz podría parecer compatible con la relatividad especial. John Stachel afirma al respecto que:

Al eliminar el concepto de éter y mostrar que un flujo de energía radiante transfiere masa inercial, la teoría de la relatividad demostraba que ya no hay necesidad de tratar la luz como una perturbación en un medio hipotético, sino que podía considerarse compuesta de estructuras independientes, a las que hay que asignar masa (Stachel, 2001, p. 155).

Esta afirmación tiene al menos dos dificultades importantes. La primera concierne a la existencia del éter. Einstein, según vimos, sostuvo la existencia del éter luminífero en el artículo sobre el cuanto de luz (Einstein, 1905a, p. 136), pero en el artículo sobre la relatividad especial (Einstein, 1905b, p. 892) la rechazó, o al menos la consideró prescindible. Lo paradójico de esta situación es que en la teoría de la luz expuesta en el primer artículo no se requiere la existencia de un éter para dar cuenta de la propagación de los cuantos de luz, mientras que en la teoría ondulatoria de Maxwell-Lorentz, que Einstein suscribe en el segundo artículo, el éter parece indispensable como sustrato de las ondas electromagnéticas. Por eso, debemos señalar la importancia de diferenciar la función del éter como medio para la propagación de la onda electromagnética en el vacío, de su función como referencial en reposo absoluto, al cual se refieren todos los movimientos reales; probablemente, es sólo esta última función la que Einstein (1905b) consideró prescindible. Allí afirma literalmente que:

La introducción de un éter luminífero aparecerá como superflua puesto que (...) ni se introducirá un 'espacio absolutamente en reposo' con propiedades especiales, ni se asignará un vector velocidad a un punto del espacio vacío en el cual tienen lugar los procesos electromagnéticos (Einstein, 1905b, p. 892).

Claramente, lo que resulta superfluo es suponer la existencia del espacio absoluto, esto es, del éter en tanto referencial en reposo absoluto. Pero esa no fue la razón por la cual la hipótesis del éter luminífero había sido postulada originalmente. El éter se introdujo como sustrato de las ondas electromagnéticas, que se concebían como estados del éter mismo. Einstein no se pronuncia respecto de si las ondas electromagnéticas requieren dicho sustento material; no obstante, si se suscribe la teoría de Maxwell,

como Einstein (1905b) parece hacerlo, es plausible suponer, que debería retenerse la existencia del éter, como, según vimos, lo hiciera explícitamente en el texto anterior (1905a), sólo que ahora sin asignarle las características del espacio absoluto. El argumento de Einstein, según el cual la relatividad especial no necesita postular un referencial en reposo absoluto, resulta insuficiente para justificar la eliminación del éter en tanto sustrato de las ondas electromagnéticas cuando se propagan en el espacio vacío. En cambio, en el contexto de la teoría del cuanto de luz, esta función del éter resulta evidentemente superflua.

En las exposiciones de la relatividad especial inmediatamente posteriores a 1905, por ejemplo, Einstein (1907, 1909b) señaló que la introducción del éter luminífero era innecesaria porque las ondas electromagnéticas podían concebirse como entidades autosubsistentes, tal como las partículas materiales, y no como estados del éter. Esto es verdadero respecto de los cuantos de luz, pero no necesariamente de las ondas maxwellianas. La relatividad especial no implica necesariamente la autosubsistencia de las ondas electromagnéticas. Esta hipótesis debe concebirse, más bien, como una conjetura de Einstein y no como una consecuencia de sus dos postulados.¹⁶

La segunda dificultad de la afirmación de Stachel es que en la teoría de la relatividad especial ninguna entidad dotada de masa en reposo no nula puede moverse a la velocidad de la luz. Por consiguiente, si la luz está compuesta por cuantos de naturaleza puntual, éstos, a diferencia de cualquier partícula clásica, deben tener masa nula. Este problema merece un examen más detallado.

Según vimos, Einstein (1905a) no les asignó a los cuantos de luz ni masa ni momento.¹⁷ Sin embargo, tampoco sostuvo que no los tuviera. Simplemente no mencionó

¹⁶ En 1920, Einstein revisó su concepción del éter a la luz de la relatividad general. Admitió que la relatividad especial no era incompatible con la existencia del éter y además afirmó explícitamente que la relatividad general requería la existencia del éter gravitatorio. Incluso llegó a afirmar que: “según la teoría general de la relatividad, es impensable la existencia de un espacio sin éter; porque en un espacio así (...) nos encontraríamos con que *nunca se produciría la propagación de la luz...*” (Einstein, 2005a [1920], p. 145; subrayado nuestro). “Está claro que en la teoría de la relatividad no hay sitio para la idea de un *éter inmóvil*. (...) Por este motivo opinaba en 1905 que no se podía ya de ningún modo hablar de la existencia del éter en la física. Sin embargo, esta decisión era demasiado radical (...). Más bien es cierto que, ahora como antes sigue estando permitido suponer la existencia de un medio que llene el espacio para poder examinar los campos electromagnéticos (...) considerando el estado en que se encuentre dicho medio. Pero no está permitido atribuir a este medio en cada punto un estado de movimiento. Este éter no debe considerarse como algo formado por partes cuya identidad se podría controlar a lo largo del tiempo” (Einstein, 2005b [1920], p. 166).

¹⁷ Sólo en 1916, Einstein escribe explícitamente la fórmula para el momento de los cuantos de luz ($p=hn/c$). Señala, entonces, que, cuando una molécula excitada emite energía bajo la forma de radiación, ésta no se propaga como una onda esférica, sino que está completamente dirigida (Einstein, 1916, p. 61). En una carta a Besso del 6 de septiembre de 1916, dice que, según su opinión, se sigue de este hecho que “queda establecida la existencia de los cuantos de luz” (Einstein & Besso, 1994, p. 132). Casi dos años después, en una carta del 29 de julio de 1918, afirma que “no dudo de la *realidad* de los cuantos en la radiación, si bien continuó siendo el único que tiene esta convicción” (Einstein & Besso, 1994, p. 166).

el asunto, posiblemente debido a que para explicar el *EF* no necesitaba de estas propiedades. No obstante, parecía en principio necesario suponer que si los cuantos de luz se comportaban como corpúsculos, debían estar dotados tanto de masa como de momento. En efecto, una partícula sin masa ni momento era inconcebible en el marco de la física clásica, aunque también es cierto que era sorprendente atribuirle una frecuencia.

Ahora bien, las propiedades de una partícula son diferentes en el marco de la relatividad especial. En dicha teoría la velocidad de la luz en el vacío tiene, a la vez, el carácter de *velocidad límite* para todo cuerpo masivo y de *velocidad invariante* respecto de todo referencial inercial. Estas dos características imponen dos restricciones fundamentales a la naturaleza de los cuantos de luz. La primera es que ellos deben tener masa en reposo nula, lo que no impide, sin embargo, asignarles momento lineal. La segunda restricción es que los cuantos de luz no pueden desacelerarse ya que deben moverse siempre con velocidad c . Este hecho tiene consecuencias notables respecto de la interacción entre la luz y la materia. Así en el *EF*, los cuantos de luz deberían ser absorbidos instantáneamente para que no haya aceleración, lo que supondría una “desaparición inmediata” del cuanto de luz y la transferencia de toda su energía cinética al electrón. En general, los cuantos de luz no pueden cambiar ni la dirección ni el sentido del movimiento que tienen desde el instante en que fueron emitidos por una fuente luminosa. En sentido estricto, los cuantos individuales tampoco pueden “reflejarse” ni “refractarse”.¹⁸ Aquí encontramos otra razón que hubiese dificultado concebir partículas de luz en el contexto de la relatividad especial.

5 ¿DOS CLASES DIFERENTES DE TEORÍAS?

En el título mismo de su artículo, Einstein (1905a) presenta su hipótesis del cuanto de luz como un “punto de vista heurístico”. Este es un rasgo característico que parece diferenciar a la formulación de la teoría de la relatividad especial de la del cuanto de luz. Desde nuestro punto de vista, la cuestión puede esclarecerse mediante dos preguntas fundamentales. Ante todo ¿es la hipótesis del cuanto de luz una teoría en el mismo sentido en que lo es la relatividad especial? Y, si es así, ¿en qué consiste el carácter heurístico de dicha teoría?

¹⁸ Obviamente, es un hecho que la luz se refleja y se refracta. Pero en el marco de una teoría corpuscular de la luz de carácter relativista, la reflexión y la refracción de la luz deberían concebirse como procesos de absorción de los fotones incidentes y de emisión de *nuevos* fotones. Si no fuera así, los cuantos de luz se verían desacelerados al reflejarse o refractarse. Adviértase, sin embargo, que en todas las interpretaciones dadas al famoso experimento de Michelson-Morley de 1887 se suponía que un rayo de luz, que mantenía su identidad, interfería *consigo mismo* luego de haberse desdoblado y haberse reflejado ¡invirtiendo de hecho su velocidad en un factor $2c$!

La concepción de Einstein de la estructura general de las teorías científicas es la idea deductivista clásica, que él expresa así: “las leyes básicas (axiomas) y las conclusiones conjuntamente forman lo que se llama una teoría” (Einstein, 2005 [1919], p. 663-4). En el lenguaje actual diríamos simplemente que una teoría es la clausura lógica de un conjunto de hipótesis fundamentales (los axiomas o postulados). Como ya hemos señalado, la teoría del cuanto de luz se puede formular mediante seis hipótesis básicas que Einstein presenta explícitamente en su trabajo de 1905, aunque no las introduce como postulados. Por consiguiente, la llamada hipótesis del cuanto de luz de Einstein fue presentada, de hecho, como el componente fundamental de una teoría de igual forma (1905b) como los dos postulados que constituyeron los principios de la relatividad especial.

Por eso, si comparamos las formulaciones de ambas teorías en 1905, encontramos, indudablemente, dos diferencias significativas. En primer lugar, la relatividad especial se presenta de manera axiomática, basada en los postulados de relatividad y de constancia de la velocidad de la luz, mientras que la teoría del cuanto de luz se introduce de manera no axiomática. En segundo lugar, la relatividad especial se encuentra prácticamente completa en su primera formulación, esto es, Einstein deduce casi todas sus consecuencias importantes (aquellas que la diferencia de la física de Newton), mientras que la teoría del cuanto de luz de 1905 es ciertamente muy incompleta. De hecho, Einstein fue el primero en reconocerlo y comenzó a completar su teoría ya en 1906, aunque no alcanzó una formulación satisfactoriamente completa hasta 1916. Las principales contribuciones de Einstein a la teoría cuántica de la luz posteriores a 1905 son Einstein, 1906, 1909a, 1909b, 1916). En consecuencia, la relatividad especial tiene en 1905 una formulación mucho más precisa y acabada que la incipiente teoría del cuanto de luz. Con todo, estas diferencias entre las dos teorías son sólo de grado. Einstein mismo reconoció más tarde que los dos postulados de la relatividad especial no eran suficientes para deducir las transformaciones de Lorentz (cf. Einstein, 2005b [1920], p. 146-7). Por otra parte la formulación original de la relatividad especial no está completa: falta nada menos que la ecuación $E = mc^2$, que Einstein dedujo en un artículo breve escrito en septiembre de 1905 (Einstein, 1905c). Finalmente, una teoría científica no necesita estar axiomatizada, ni mucho menos ser completa, para adquirir el *status* de teoría. Basta con que se especifique un conjunto de hipótesis características, cuyas consecuencias lógicas formarán la teoría en cuestión. Einstein, evidentemente, satisface esta condición en su artículo sobre el cuanto de luz.

En el curso de una exposición popular de la relatividad especial, Einstein hizo una distinción entre dos clases de teorías físicas, “teorías constructivas” y “teorías de principios” (Einstein, 1954 [1919], p. 228), que, retrospectivamente, resulta relevante para nuestra comparación entre las dos teorías de 1905. Las teorías constructivas – la mayor parte de las teorías físicas, según Einstein – son las que emplean el método

sinético, que consiste en comprender los fenómenos complejos a partir de sus elementos constituyentes más simples. Así, la teoría cinética de los gases intenta comprender los fenómenos térmicos reduciéndolos al movimiento molecular. El rasgo característico de las teorías constructivas es la postulación de entidades inobservables, que Einstein llama “constructos hipotéticos”, para dar cuenta de determinados procesos físicos observables. Es evidente que la teoría del cuanto de luz pertenece a esta categoría. Por su parte, las teorías de principios, como la termodinámica, no postulan la existencia de hipotéticas entidades inobservables, sino que adoptan como postulados determinadas regularidades empíricamente descubiertas, como, por ejemplo, la imposibilidad de un móvil perpetuo. La relatividad especial es, para Einstein, un ejemplo eminente de teoría de principios. Así pues, desde el punto de vista de Einstein, sus dos teorías de 1905 pertenecen a dos clases diferentes de teorías físicas.

¿Implica la naturaleza constructiva de la teoría del cuanto de luz su carácter heurístico? Parece evidente que no, ya que, de otro modo, la mayoría de las teorías físicas deberían tener tal carácter heurístico, algo que Einstein nunca sugiere. ¿En qué consiste, entonces, ese punto de vista heurístico que distingue a la teoría del cuanto de luz de la relatividad especial? Ante todo, no puede consistir en su carácter hipotético y provisorio, ya que toda teoría científica es un conjunto de hipótesis siempre provisionales, un hecho epistemológico básico que el propio Einstein (2005 [1919], p. 664) reconoce. Tampoco puede residir en su carácter exploratorio o tentativo, puesto que toda teoría nueva que se propone con el fin de explicar un dominio de fenómenos todavía poco conocidos (en este caso, las interacciones entre materia y radiación), resulta siempre más o menos exploratoria y tentativa. Finalmente, tampoco puede consistir en el hecho de que la teoría haya sido incompleta, porque, nuevamente, muchas teorías físicas lo han sido.

El punto de vista heurístico, en nuestra opinión, debe residir en el modo de interpretar la relación que la teoría tiene con el mundo físico. La teoría del cuanto de luz era meramente heurística porque, en principio, no debía interpretarse como una descripción realista de la estructura microscópica de la luz. Esto es, dicha teoría no afirmaba la existencia real de los cuantos de luz, sino que los postulaba como simples elementos explicativos útiles: las interacciones materia-luz se comprenden mejor si se concibe a la radiación electromagnética libre *como si* estuviera compuesta de cuantos discretos. El lenguaje con que se expresa el propio Einstein confirma este punto de vista. En efecto, Einstein no afirma que la luz consista realmente en cuantos de energía, sino que *se comporta como si* estuviera formada por tales cuantos (cf. Einstein, 1905a, p. 143; 1909a, p. 191). En contraste, la relatividad especial no declara que la luz se comporta como si su velocidad fuera invariante, sino que afirma que la velocidad de la luz es efectivamente invariante.

CONCLUSIONES

Enumeraremos ahora las conclusiones que consideramos más relevantes para responder a las cuestiones que formulamos en la introducción de nuestro trabajo:

(1) *La ambivalencia respecto de la electrodinámica de Maxwell*: en el curso de unos pocos meses, Einstein adoptó dos actitudes diferentes frente a la electrodinámica. Einstein (1905a) la consideró incapaz de explicar determinadas interacciones entre la radiación y la materia y no cuestionó la mecánica de Newton, presupuesta, por ejemplo, en la descripción del movimiento de los electrones. En cambio, Einstein (1905b) sostuvo la teoría de Maxwell y prefirió modificar los principios de la mecánica. Ambos artículos comienzan por presentar anomalías de la electrodinámica relativas a la electricidad, es decir, al movimiento de electrones. Pero mientras que en el segundo, Einstein trató de resolverlas sin sacrificar la teoría de Maxwell, en el primero adoptó una teoría abiertamente alternativa. En ambos casos, es evidente que Einstein disponía de otros cursos de acción posibles e incluso menos drásticos. En efecto, parecía más natural intentar dar cuenta de un fenómeno como el *EF* apelando a hipótesis acerca de la estructura microscópica de la materia. Dado que se sabía muy poco acerca de la composición del átomo, había allí un amplio espacio para introducir nuevas conjeturas que no implicaran cambios en la teoría electromagnética. Eso fue precisamente lo que hicieron después de 1905 Sommerfeld y otros, cuando propusieron explicaciones alternativas de este efecto (cf. Stuewer, 1970a; Wheaton, 1983). La misma estrategia había empleado Lorentz en la interpretación de los resultados del experimento de Michelson y Morley con el fin de preservar la existencia del éter y, con él, de toda la estructura de la teoría de Maxwell (cf. Cassini & Levinas, 2005).

(2) *Con y sin éter*: Einstein (1905a) conservó el éter a pesar de que propuso una teoría no ondulatoria de la luz, que, en principio, no lo requería; mientras que en el segundo texto se deshizo del éter y sin embargo mantuvo intacta la electrodinámica de Maxwell que sí lo requería. De manera quizás paradójica, el éter se encontraba presente donde no era necesario y era eliminado donde parecía ser indispensable (aunque en el segundo texto, sólo respecto de su función como eventual referencial absoluto). Advertamos que la relatividad especial dejaba sin solucionar el problema de la propagación de la luz en el vacío. Por otra parte, la eliminación del éter se logró al costo de introducir otro absoluto que no tiene explicación: la velocidad de propagación de la luz que ahora resultaba invariante en oposición a cualquier otra velocidad (y en abierta oposición a la propia definición de velocidad en la física clásica). ¿Es acaso este nuevo absoluto ontológicamente menos costoso que el propio éter que elimina? Cabe entonces preguntarse si este absoluto no es una nueva especie de éter, ahora desprovisto de propiedades mecánicas.

(3) *Ni ondas ni partículas*: Einstein debió intuir que la hipótesis del cuanto luminoso daba origen a una teoría de la luz que no era ondulatoria pero tampoco estrictamente corpuscular.¹⁹ Después de formular la relatividad especial, seguramente se percató de las restricciones que esta teoría imponía sobre la naturaleza del cuanto de luz: debía ser una entidad puntual y discreta, localizada en el espacio y en el tiempo, pero, a diferencia de una partícula newtoniana, no podía poseer masa, debía moverse siempre con velocidad c y, por tanto, debía interactuar con la materia de manera instantánea para no desacelerarse. Ninguna de estas propiedades era característica de un corpúsculo clásico: un punto dotado de masa que podía moverse con cualquier velocidad.

Por otra parte, los cuantos luminosos estaban dotados de una frecuencia, que era una propiedad esencial de la cual dependía su energía y que definía, entre otras cosas, el color de la luz visible. Esto es algo que no puede atribuirse a una partícula clásica (en la que el color debería estar correlacionado con una propiedad de otra clase, como la masa o la velocidad). Igualmente, la energía (y también el momento) es una propiedad característica de las partículas masivas que no puede aplicarse a las ondas, para las cuales sólo están determinadas las *densidades* de energía y de momento en un volumen dado. La frecuencia, sin embargo, es determinante de la energía de los cuantos luminosos, mientras que, en la teoría ondulatoria, no tiene relación alguna con la densidad de energía de las ondas que sólo depende de su amplitud. Resulta evidente, entonces, que si bien la teoría del cuanto de luz de Einstein no representaba un retorno a alguna teoría de la emisión de tipo newtoniana, como a menudo se afirma, era, sin embargo, incompatible con la concepción de la luz adoptada en la relatividad especial.²⁰

(4) *La primacía ontológica del campo*: los historiadores de la ciencia siempre se han preguntado por qué Einstein consideró revolucionario al artículo donde introducía el cuanto de luz (Einstein, 1905a) y no a aquel donde formulaba una mecánica que desplazaba a la de Newton (Einstein, 1905b). Desde nuestro punto de vista, una conjetura plausible es que Einstein consideraba a la teoría de Maxwell como un logro ejemplar que debía preservarse a cualquier costo. La relatividad especial contenía intactas las ecuaciones de Maxwell, mientras que la hipótesis del cuanto de luz era incompatible con la propia ontología del campo electromagnético. Esa parece ser la razón principal por la que Einstein propuso su hipótesis de manera puramente *heurística* y no como

¹⁹ Casi medio siglo después de 1905, en una obra todavía actual, David Bohm resumía la situación de la siguiente manera: “Un conjunto de experimentos sugiere que la luz es una *partícula* que puede estar localizada, y el otro sugiere, con igual énfasis, que es una *onda*. ¿Cuál enfoque conduce a la imagen correcta? La respuesta es: ninguno” (Bohm, 1989 [1951], p. 26).

²⁰ A pesar de ello, el propio Einstein se refirió en ocasiones a su teoría como si representara “el punto de vista newtoniano de la teoría de la emisión” (Einstein, 1909b, p. 824).

una afirmación de la existencia real del cuanto de luz. Al comienzo de su artículo sobre el cuanto de luz, Einstein elogió sin reservas a la teoría de Maxwell, diciendo que:

La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, se ha mostrado soberbia para describir fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría (Einstein, 1905a, p. 132).

El compromiso de Einstein con la noción de campo como concepto básico de la física perduró durante toda su vida. Por una parte, siempre consideró que la relatividad especial no era otra cosa que un desarrollo *sin rupturas* de la electrodinámica de Maxwell y Lorentz.²¹ Por otra parte, también pensó que el programa de Maxwell, esto es, según sus propias palabras, “la descripción de la realidad física en términos de campos que satisfacen ecuaciones diferenciales parciales sin singularidades” (Einstein, 1980 [1934], p. 162), debía extenderse a toda la física. El cuanto de luz, y el concepto de partícula en general, no resultaba compatible con esta ontología de campos puros.²²

Advertimos, entonces, por qué Einstein no le concedió un mismo *status* epistemológico a sus dos teorías. A la teoría de relatividad especial la presentó de una manera tal que la consideraba prácticamente completa y definitiva y, de hecho, más conservadora; una teoría que no era sino la versión mejorada de la electrodinámica de Maxwell y Lorentz, asentada, ahora, sobre un fundamento cinemático más sólido: la relatividad de todos los sistemas de referencia inerciales.²³ A la teoría del cuanto de luz, en cambio, la presentó casi como una ficción explicativa con un carácter marcadamente provisorio ya que suponía que debía ser superada por una teoría más unificadora que, en última instancia, no fuera incompatible con la teoría de Maxwell sino que la completara, dando cuenta, ahora sí, de todas las interacciones materia-radiación. En este

²¹ “La teoría especial de la relatividad no es más que una fusión coherente de los resultados de la electrodinámica de Maxwell y Lorentz con los de la mecánica clásica” (Einstein, 2005b [1920], p. 146-7). Observaciones similares se encuentran en otros lugares (por ejemplo, Einstein, 1980 [1934], p. 129-32).

²² En los siguientes pasajes de un artículo tardío, Einstein resume con claridad esta concepción del campo unificado: “La combinación de la idea de un campo continuo con la de puntos materiales discontinuos en el espacio parece inconsistente. Una teoría de campos consistente requiere la continuidad de todos los elementos de la teoría, no sólo en el tiempo sino también en el espacio, y en todos los puntos del espacio. Así, la partícula material no tiene lugar como concepto fundamental en una teoría de campos. Por tanto, incluso aparte del hecho de que la gravitación no está incluida, la electrodinámica de Maxwell no puede considerarse una teoría completa. (...) Dado que la teoría general de la relatividad implica la representación de la realidad física mediante un campo *continuo*, el concepto de partículas o puntos materiales no puede desempeñar un papel fundamental, ni tampoco el concepto de movimiento. La partícula sólo puede aparecer como una región limitada en el espacio en la cual la intensidad del campo o la densidad de energía son particularmente altas.” (Einstein, 1954, respectivamente, p. 345 y 348).

²³ Recordemos que tanto la mecánica como el electromagnetismo admitían la existencia de un referencial privilegiado, ya sea el espacio absoluto o el éter.

sentido, el segundo artículo (Einstein, 1905b) era más realista que el primero artículo (Einstein, 1905a). En última instancia, la teoría del cuanto de luz era revolucionaria porque subvertía la electrodinámica de Maxwell que, para Einstein, no sólo era la teoría mejor establecida de la física, sino el modelo mismo de toda teoría física futura.

La relatividad especial, a la postre, también resultó una teoría provisoria debido a su carácter idealizado. En efecto, a causa de la presencia de materia y radiación, que implica la aparición de campos gravitatorios, la existencia de referenciales inerciales globales resulta físicamente imposible. Después de 1916, la teoría de la relatividad especial quedó integrada, como “caso límite”, en la relatividad general que expresaba la distribución y dinámica del campo gravitatorio, correlacionada con la evolución y la estructura métrica del espacio-tiempo. Esta teoría ofrecía, por fin, una nueva dinámica formulada en términos de campos, como lo había sido la de Maxwell. Ahora también el espacio-tiempo poseía las características de los campos. Einstein mismo lo reconocería en 1920 cuando señaló la necesidad de admitir la existencia de un éter gravitatorio, entendido ahora como el espacio-tiempo mismo “dotado de cualidades físicas” (Einstein, 2005a [1920], p. 145). Mientras tanto, el cuanto de luz permaneció como una entidad independiente de cualquier campo (recién se integró como entidad en la teoría cuántica de campos). Einstein, por su parte, nunca abandonó totalmente su punto de vista heurístico respecto de la teoría cuántica de la luz.²⁴ Siempre retuvo la esperanza de reformular dicha teoría en términos de campos clásicos (esto es, no cuantificados), de modo tal que se obtuviera una teoría unificada de la luz que fuera compatible con la de Maxwell y que la integrara en una teoría más general de carácter no estadístico.

(5) *Por qué una sola velocidad de la luz:* otra diferencia notable entre los dos artículos de 1905 es el papel que desempeña la velocidad de la luz. En efecto, mientras que en la formulación original de la relatividad especial la constancia de la velocidad de la luz resulta un postulado fundamental, en la teoría del cuanto de luz, la velocidad de los cuantos no interviene en la explicación del *EF*. Claramente el concepto de velocidad en una teoría corpuscular es diferente del de una ondulatoria, donde ésta se relaciona con la velocidad de grupo de las ondas. En esta última teoría, la velocidad de la luz en cada medio es considerada independiente de la frecuencia. Para la “partícula” cuanto de luz, en cambio, la velocidad debería poseer una connotación diferente. Lo notable es que la energía cinética de una partícula debería ser, en principio, proporcional al módulo de la velocidad al cuadrado, mientras que la de un cuanto de luz debía ser proporcional a la frecuencia. Einstein, de hecho, le atribuyó la misma velocidad a todos los cuantos libres, cualquiera fuera su “frecuencia” y, por consiguiente, su energía.

²⁴ Incluso después de haber sostenido que no dudaba en absoluto de la realidad de los cuantos de luz, Einstein no abandonó el lenguaje ficcionalista. Se refirió siempre a la estructura cuántica de la luz diciendo que ésta se comporta como si estuviera constituida por cuantos independientes (Einstein, 1924).

(6) *La sutil estrategia de Einstein*: en el artículo sobre el cuanto de luz (1905a), la forma de conciliar la noción de cuanto con las diferentes frecuencias de luz que de hecho se controlaban consistió en apostar a que la variación de la energía cinética “newtoniana” de los electrones (que se reconocía que era $\frac{1}{2}m\Delta(v^2)$) podía asociarse con la variación de frecuencia de la luz, variable típicamente ondulatoria que, no obstante, *no* participaba de la expresión de la energía de una onda. En contraste con la frecuencia, lo que *no* se observaba ni se podía observar era una eventual diferencia entre las masas y/o las velocidades de los supuestos cuantos. Si bien el *EF* no era un fenómeno relativista en lo que respecta al movimiento de los fotoelectrones, sin embargo, una vez formulada la relatividad especial, el hecho de que a la luz no se le pudiese asociar una masa y sí una velocidad c invariante y para todas las frecuencias, podría haber actuado como puente entre los dos artículos. También es notable, como señala M. Paty (cf. Paty, 2000, 2005) que, en el segundo artículo, Einstein (1905b) indicara que la energía y la frecuencia cumplían con las transformaciones de Lorentz, pudiendo haber invocado el primero artículo, donde eso se cumplía trivialmente y de manera “simultánea”, ya que $E/\nu = h = cte = E'/\nu'$. El que Einstein no hubiese expuesto estas cosas, muestra su estrategia de formular sus ideas de manera provocativa, original y sencilla, así como el verdadero carácter heurístico que le había otorgado a la interpretación del carácter cuántico de la luz.

(7) *La riesgosa dualidad*: desde el comienzo, Einstein pareció haber tenido una conciencia muy clara de la dualidad onda/partícula que su teoría del cuanto luminoso sugería. Las inevitables paradojas a las que ésta conducía parecen ya, por sí mismas, proporcionar una razón suficiente como para que no la mencionara en su artículo sobre la relatividad especial. No obstante, aunque advirtió en la dualidad de la luz un auténtico problema, no lo consideró un obstáculo insalvable. Pensó que se trataba de una situación provisoria debida a la incompletitud de la teoría de Maxwell, la cual no podía explicar los aspectos corpusculares de la materia. Tuvo la misma actitud cuando la mecánica cuántica extendió esta dualidad a todas las partículas materiales. Si bien nunca aceptó la dualidad onda/partícula como un rasgo permanente de nuestra descripción de la realidad, tampoco fue esa la única razón por la que rechazó la teoría cuántica. El indeterminismo y el carácter estadístico, aparentemente irreductible, de las leyes fundamentales de esta teoría le parecieron mucho más radicalmente inadmisibles.²⁵

²⁵ En su autobiografía, cuando presenta sus razones contra la completitud de la mecánica cuántica, Einstein caracteriza los rasgos esenciales de los fenómenos cuánticos de la siguiente manera: “(...) variaciones aparentemente discontinuas y temporalmente no determinadas del estado de un sistema, cualidades simultáneamente corpusculares y ondulatorias de las formaciones energéticas elementales” (Einstein, 1949, p. 86). Aquí aparecen claramente formulados los dos aspectos de la concepción cuántica de la realidad física, que Einstein nunca pudo aceptar como definitivos.

En última instancia, si la teoría de Maxwell – para Einstein la mayor creación de la física – era incompleta, ¿por qué no habría de serlo la novedosa y todavía oscura mecánica cuántica?

(8) *La búsqueda de una síntesis futura*: Sólo en 1909, Einstein relacionó por primera vez la relatividad especial y su teoría del cuanto de luz (Einstein, 1909b). Según palabras de Pauli, este trabajo es “uno de los hitos que señalan el desarrollo de la física teórica” (Pauli, 1949, p. 154). Allí, Einstein extrajo algunas de las conclusiones que la relatividad especial implicaba respecto de la naturaleza de los cuantos. La más notable, quizás, es la siguiente: si bien los cuantos de luz no poseen masa en reposo, en virtud de la relación relativista entre masa y energía, todo cuerpo que emite o absorbe luz debe perder o ganar masa, respectivamente (Einstein, 1909b, p. 386). En este artículo, afirma explícitamente que las propiedades corpusculares y ondulatorias del cuanto de luz no deben considerarse como mutuamente incompatibles. Sin embargo, todavía no está en condiciones de explicar cómo podrían hacerse compatibles y considera que esta es una tarea pendiente para la física del futuro: una teoría unificada y completa de la luz debería ser “una suerte de fusión de las teorías ondulatoria y de la emisión” (Einstein, 1909b, p. 817).

Como se advierte, en 1905, las teorías del cuanto de luz y de la relatividad especial no podían compatibilizarse de una manera que no fuese traumática. Por esta razón, resulta comprensible que Einstein no haya hecho ninguna referencia a su teoría alternativa de la luz en el contexto de la relatividad especial. Aun cuando es posible que ya en ese momento Einstein no haya considerado a ambas concepciones de la luz incompatibles, seguramente previó que, dadas las dificultades conceptuales involucradas, una eventual reconciliación no sería fácil de alcanzar. ☞

AGRADECIMIENTOS. Queremos agradecer a Michel Paty por sus comentarios a una versión anterior de este trabajo.

Alejandro CASSINI

Universidad de Buenos Aires-CONICET, Argentina.

alepafrac@yahoo.com.ar

Marcelo LEONARDO LEVINAS

Universidad de Buenos Aires-CONICET,

Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), Argentina.

leo@levinas.com.ar

ABSTRACT

We attempt to determine why Einstein did not mention his article on light-quanta hypothesis, written in March 1905, in his formulation of Special Relativity, devised just three months later. The main reasons we have found are the following: Einstein's different attitudes towards the existence of ether and absolute space; his permanent commitment to the ontological primacy of the electromagnetic field; the non-classical properties he ought to attribute to light-quanta; his hesitant stance about Maxwell electrodynamics as a complete and definitive representation of physical reality and at the same time, his suspicion that a possible wave/particle duality would not lead to an unsolvable difficulty; his unstable and uncompromised attitude with respect to atomism; the more conservative, though less intuitive, character of Special Relativity; the different interpretation of the epistemological status of both theories and the marked differences in their formulation.

KEYWORDS • Experimental context. Theoretical assumptions. Auxiliary hypotheses. Causal-mechanical explanation. Wave-particle duality. Luminiferous ether.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALIBAR, F. *Einstein 1905: de l'éther aux quanta*. Paris: Presses Universitaires de France, 1992.
- BOHM, D. *Quantum theory*. New York: Dover, 1989 [1951].
- BOHR, N. On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine*, 26, p. 1-25, 1913.
- CASSIDY, D. C. Einstein and the quantum hypothesis. *Annalen der Physik*, 14, p. 15-22, 2005.
- CASSINI, A. & LEVINAS, L. La reinterpretación radical del experimento de Michelson y Morley por la relatividad especial. *Scientiae Studia*, 3, 4, p. 547-81, 2005.
- COHEN-TANNOUJJI, C.; DUPONT-ROC, J. & GRINBERG, G. *Atom-photon interactions: basic processes and applications*. New York: J. Wiley & Sons, 1998.
- COMPTON, A. H. A Quantum theory of the scattering of X rays by light elements. *Physical Review*, 21, p. 483-502, 1923.
- DORLING, J. Einstein's introduction of photons: argument by analogy or deduction from the phenomena? *The British Journal for the Philosophy of Science*, 22, p. 1-8, 1971.
- EINSTEIN, A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17, p. 132-48, 1905a.
- _____. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17, p. 891-921, 1905b.
- _____. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 18, p. 639-41, 1905c.
- _____. Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption. *Annalen der Physik*, 20, p. 199-206, 1906.
- _____. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4, p. 411-62, 1907.
- _____. Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems. *Physikalische Zeitschrift*, 10, p. 185-93, 1909a.
- _____. Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 10, p. 817-26, 1909b.
- _____. Zur Quantentheorie der Strahlung. *Mitteilungen der Physikalische Gesellschaft Zürich*, 16, p. 47-62, 1916.
- _____. Komptonsche Experiment. *Berliner Tageblatt*. 20 de abril de 1924.
- _____. Autobiographisches. In: SCHILPP, P. A. (Ed). *Albert Einstein: philosopher-scientist*. La Salle: Open Court, 1949. p. 1-95.

- EINSTEIN, A. What is the theory of relativity? In: _____. *Ideas and opinions*. New York: Crown, 1954 [1919]. p. 227-32.
- _____. On the generalized theory of gravitation. In: _____. *Ideas and opinions*. New York: Crown, 1954. p. 341-56.
- _____. *Mein Weltbild*. Frankfurt: Ullstein, 1980 [1934].
- _____. Maxwell Einfluss auf die Entwicklung der Auffassung des physikalisch-realen. In: _____. *Mein Weltbild*. Frankfurt: Ullstein, 1980 [1934]. p. 159-62.
- _____. Indução e dedução na física. *Scientiae Studia*, 3, 4, p. 663-4, 2005 [1919].
- _____. *Obra esencial*. Barcelona: Crítica, 2005.
- _____. El éter y la teoría de la relatividad. In: _____. *Obra esencial*. Barcelona: Crítica, 2005a [1920]. p. 135-45.
- _____. Ideas y métodos fundamentales de la teoría de la relatividad, presentados según su evolución. In: _____. *Obra esencial*. Barcelona: Crítica, 2005b [1920]. p. 146-90.
- EINSTEIN, A. & BESSO, M. *Correspondencia con Michele Besso (1903-1955)*. Barcelona: Tusquets, 1994.
- GREENSTEIN, G. & ZAJONC, A. *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics*. Sudbury, Mass.: Jones and Bartlett Publishers, 1997.
- HANSON, N. R. *Patterns of discovery*. Cambridge: Cambridge University Press, 1958.
- HARMAN, G. The inference to the best explanation. *Philosophical Review*, 74, p. 88-95, 1965.
- JAMMER, M. *The conceptual development of quantum mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1966.
- KITCHER, P. Explanatory unification and the causal structure of the world. In: KITCHER, P. & SALMON, W. (Ed.). *Scientific explanation*. Minnesota: University of Minnesota Press, 1989. p. 410-505.
- KITCHER, P. & SALMON, W. (Ed.). *Scientific explanation*. Minnesota: University of Minnesota Press, 1989.
- KLEIN, M. J. Thermodynamics in Einstein's thought. *Science*, 157, p. 509-16, 1967.
- KUHN, T. S. *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*. Chicago: University of Chicago Press, 1978.
- LENARD, P. Über die lichtelektrische Wirking. *Annalen der Physik*, 8, p. 149-98, 1902.
- LIPTON, P. *Inference to the best explanation*. London: Routledge, 2004.
- MILLIKAN, R. A. New tests of Einstein's photo-electric equation. *Physical Review*, 6, p. 55, 1915.
- _____. Einstein's photoelectric equation and contact electromotive force. *Physical Review*, 7, p. 18-32, 1916a.
- _____. A direct photoelectric determination of Planck's 'h'. *Physical Review*, 7, p. 355-88, 1916b.
- MONNOYEUR, F. (Ed.). *La matière des physiciens et des chimistes*. Paris: Hachette, 2000.
- PAIS, A. *Inward bound: of matter and forces in the physical world*. New York: Oxford University Press, 1988 [1986].
- _____. "Subtle is the Lord..." *the science and the life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 2005 [1982].
- PATY, M. Einstein et la pensée de la matière. In: MONNOYEUR, F. (Ed.). *La matière des physiciens et des chimistes*. Paris: Hachette, 2000. p. 213-52.
- _____. O estilo científico de Einstein na exploração do domínio quântico (uma visão da relação entre a teoria e seu objeto). *Scientiae Studia*, 3, 4, p. 597-619, 2005.
- PAULI, W. Einstein's contribution to quantum theory. In: SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*. La Salle: Open Court, 1949. p. 149-60.
- PEIRCE, C. S. Pragmatism as the logic of abduction. In: _____. *The essential Peirce: selected philosophical writings*. Bloomington: Indiana University Press, 1998 [1903]. v. 2: 1893-1913. p. 226-41.
- PLANCK, M. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung in Normalspektrum. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 2, p. 237-43, 1900.
- RICHARDSON, O. W. The theory of photoelectric action. *Philosophical Magazine*, 24, p. 570-4, 1912.
- RON, J. S. *Historia de la física cuántica*. Barcelona: Crítica, 2001. v. 1: el periodo fundacional, 1860-1926.

- SALMON, W. *Scientific explanation and the causal structure of the world*. Princeton: Princeton University Press, 1984.
- _____. *Causality and explanation*. New York: Oxford University Press, 1998.
- SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*. La Salle: Open Court, 1949.
- STACHEL, J. Einstein's early work on the quantum hypothesis. In: STACHEL, J. & RAMAN, V. V. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press, 1989. v. 2: The Swiss years: writings 1900-1909. p. 134-48.
- _____. *Einstein 1905: un año milagroso*. Barcelona: Crítica, 2001.
- STACHEL, J. & RAMAN, V. V. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press, 1989. v. 2: The Swiss years: writings 1900-1909.
- STUEWER, R. H. (Ed.). *Historical and Philosophical Perspectives of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1970. (Minnesota Studies in the Philosophy of Science, 5).
- _____. Non-einsteinian interpretations of the photoelectric effect. In: _____. (Ed.). *Historical and Philosophical Perspectives of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1970. p. 246-63. (Minnesota Studies in the Philosophy of Science, 5).
- _____. *The Compton effect: turning point in physics*. New York: Science History Publications, 1975.
- _____. Einstein's revolutionary light-quantum hypothesis. *Acta Physica Polonica B*, 37, p. 543-58, 2006.
- VEGUILLAS, N. L. *Einstein, profeta y hereje*. Barcelona: Tusquets, 1990.
- WHEATON, B. R. *The tiger and the shark: empirical roots of wave-particle dualism*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

