

ASPECTOS DE LA CRISIS CUANTICA EN LA FISICA BRITANICA

Charles Galton Darwin (1887-1962)

JOSE M. SANCHEZ RON

Departamento de Física Teórica. Universidad Autónoma de Madrid

RESUMEN

Se discuten en este trabajo algunas de las críticas de Charles Galton Darwin a la supuesta inevitabilidad de la discontinuidad cuántica introducida por Max Planck en 1900. Nuestro estudio se basa en el análisis de un manuscrito que Darwin escribió en 1919, titulado The Basis of Physics. Se argumenta que, dada la formación y conexiones de Darwin, sus ideas y la información de que disponía —tal y como se reflejan en "The Basis of Physics"— nos ayudan a comprender cómo reaccionó la comunidad británica frente a la crisis cuántica.

ABSTRACT

In this work we study some of Charles Galton Darwin's criticisms of the assumed unavoidability of the quantum discontinuity introduced by Max Planck in 1900. Our study is based on the analysis of a manuscript that Darwin wrote in 1919, entitled The Basis of Physics. It is argued that because of Darwin's education and relationships, his ideas and the information at his disposal —as reflected in "The Basis of Physics"— help us to understand how the British community of physicists reacted against the quantum crisis.

1. Charles Galton Darwin

Charles Galton Darwin (1887-1962), nieto del gran Charles Darwin, autor del "Origen de las especies", fue un físico británico importante. Educado en el Trinity College de Cambridge, perteneció a una generación de científicos que se educaron según la filosofía del "Mathematical Tripos" (de hecho, Darwin participó —siendo cuarto *wrangler*— en el último examen que se celebró antes de que se aboliera este sistema edu-

cativo en 1909). Dos anécdotas pueden dar idea del tipo de preparación que se obtenía con el "Mathematical Tripos"²: La primera se refiere a que en cierta ocasión Darwin señaló que antes de abandonar Cambridge, en 1910, nunca había oído hablar de la relatividad especial ni de la teoría cuántica; más llamativas aún son las declaraciones de G. P. Thomson, quien en 1963³, recordaba su sorpresa cuando, poco después de que Darwin hubiese obtenido su título académico, éste le dijo que creía que la "vena contracta" de hidrodinámica era un prometedor campo de investigación⁴.

El mismo Thomson señalaba en su obituario de Darwin⁵, que los trabajos de éste siempre llevaron la marca de las enseñanzas que había recibido en Cambridge; marca o estilo que, hasta cierto punto, se puede decir que caracterizaba en aquella época a una gran parte de la física británica, lo cual no es de extrañar si se tiene en cuenta que en Cambridge se educaban la mayoría de los físicos y matemáticos británicos.

Después de abandonar Cambridge, Darwin se unió, en 1910, al grupo de Rutherford en Manchester, en donde permanecería hasta 1914, cuando entró en el ejército para colaborar con su país en la primera guerra mundial. En Manchester, Darwin trabajó —entre otros temas— en la teoría de la absorción y difusión de los rayos α . Fue el suyo un tratamiento totalmente clásico, naturalmente. De esta época también son sus trabajos (sólo y en colaboración con H. G. Moseley) sobre la teoría de la difracción de los rayos α , que sería uno de sus mayores logros como científico. Fue también en Manchester donde Darwin conoció a Niels Bohr, quien llegó al laboratorio de Rutherford en 1912, iniciándose de esta manera una relación duradera.

En 1919, una vez acabada la primera guerra mundial, Darwin fue elegido "Fellow" y "Lecturer" en el Christ's College de Cambridge, del que años más tarde —como veremos— sería nombrado "Master". Fue entonces cuando colaboró en temas de estadística con otro típico e importante producto de Cambridge, R. H. Fowler, que en aquella época actuaba como una especie de asesor matemático de Rutherford, quien ya residía en Cambridge como "Profesor" y director del Cavendish Laboratory. Es interesante, y relevante para nuestra discusión posterior, señalar que uno de los trabajos de Fowler en esos años fue una reformulación⁶ de la demostración de H. Poincaré de la necesidad de la reformulación de los *quanta*, demostración sobre la que tendremos bastante que decir más adelante.

Los trabajos conjuntos de Fowler y Darwin tuvieron como centro los fundamentos de la estadística atómica clásica (es decir, no Bose-

Einstein ni Fermi-Dirac, aunque sí suponiendo que la energía se encuentra distribuida en cuantos) y la relación de ésta con la termodinámica.

En 1924 Darwin fue elegido "Tait Professor of Natural Philosophy" en la Universidad de Edimburgo. Catedráticos colegas suyos en Edimburgo fueron E. T. Whittaker y C. G. Barkla.

Cuando Darwin llegó a Edimburgo la teoría cuántica de la estructura atómica de Bohr y Sommerfeld dominaba por encima de cualquier otra alternativa. Siempre —hasta cierto punto— a caballo entre la "vieja" física clásica y la balbuciente nueva física precuántica, uno de los temas de investigación de Darwin en su época escocesa fue el intentar explicar el efecto Zeeman con un modelo mecánico bastante generalizado. En esto su éxito fue parcial.

Uno de los méritos de Darwin que a su vez da a su figura un interés suplementario en cuanto que demuestra que no era tan rígido como para permanecer anclado en el pasado, siendo por consiguiente, un magnífico exponente de eslabón entre el "antes" (precuántico) y el "después" (cuántico), fue el que aceptase muy rápidamente la nueva teoría cuántica, desarrollada en 1925-26 por Heisenberg y Schrodinger. En 1927 y, aparentemente, de nuevo en 1928, Darwin pasó algunas semanas en el Instituto de Física de Bohr en Copenhague. En aquel auténtico hervidero de la nueva física, en donde se estaba fraguando lo que hoy se conoce como "interpretación de Copenhague"⁷ de la mecánica cuántica, Darwin se convirtió en un ardiente adepto de la nueva teoría, produciendo asimismo una serie de trabajos de gran interés. Mencionaré únicamente su teoría cuántica del electrón, que más tarde se comprobó era una aproximación a la teoría relativista que Dirac desarrollaría en 1928, y sus estudios sobre el momento magnético y la difracción de un electrón de Dirac.

En 1936 Darwin fue elegido "Master" del Chrit's College de Cambridge. Fue aquél el momento en que su labor como físico creativo comenzó a declinar irreversiblemente, para dejar paso al administrador, al director de proyectos científicos. En 1938 pasaba a ser —sucediendo a Lawrence Bragg— director del National Physical Laboratory inglés, cargo que abandonaría, con un respetable número de logros en su labor, a su jubilación en 1949.

2, Un manuscrito de C. G. Darwin: "The Basis of Physics" (Julio 1919)

Hemos visto en la sección anterior que, por su biografía, Darwin fue un científico bastante representativo de lo que se puede denominar "escuela inglesa"⁸. En este sentido se puede considerar que sus opinio-

nes y conocimientos son hasta cierto punto las opiniones y conocimientos de una parte sustancial de los físicos británicos de su época. En este trabajo presento y comento un manuscrito de Darwin que hasta ahora ha pasado prácticamente inadvertido en la literatura dedicada a la historia de la física moderna⁹. El manuscrito se titula *The Basis of Physics*, está fechado en julio de 1919 y una copia en microfilme se encuentra depositada en la biblioteca de la American Philosophical Library de Filadelfia, como parte del Archive for History of Quantum Physics¹⁰. *The Basis of Physics* es un exponente magnífico de cómo se veía la crisis en que se encontraba la física precuántica en círculos muy significativos de físicos británicos. Puntos débiles, posibilidades abiertas, trabajos conocidos, constituyen algunos de los aspectos que nos permiten conocer el ensayo de Darwin. No es *The Basis of Physics* el único manuscrito no publicado de Darwin que se conoce¹¹; durante un periodo de cerca de diez años efectuó varias propuestas para resolver los problemas que afectaban a la emisión, absorción y dispersión de la radiación, así como para solucionar las contradicciones inherentes a sus propiedades corpusculares y ondulatorias¹².

3. Comentarios a "The Basis of Physics"

La primera frase del manuscrito de Darwin nos muestra la opinión que éste tenía del estado en que se encontraba la física en 1919:

"He creído desde hace mucho que las bases fundamentales de la física se encuentran en un estado desesperado."

Para él,

"Los grandes y positivos éxitos de la teoría cuántica (no han hecho sino) acentuar... las contradicciones esenciales sobre las que reposa dicha teoría [cuántica]. Cada uno de sus triunfos no hace sino destacar estas contradicciones."

No hay duda de que estas frases de Darwin resumen de forma magnífica la situación real de la física en las dos primeras décadas del siglo XX. Se pueden encontrar multitud de ejemplos que corroboran la opinión de Darwin. Citaré dos. A pesar de que la discontinuidad introducida por Max Planck en 1900¹³ trajo consigo innumerables avances, ello fue el precio de no entender realmente el fundamento teórico de lo que se estaba haciendo. En el mismo sentido tenemos que cuando, en 1909, Einstein estudió las fluctuaciones en la energía de la radiación contenida en una cavidad¹⁴, encontró una expresión formada por dos sumandos, uno derivable (y entendible) de la teoría ondulatoria electromagnética, y otro que se podía obtener únicamente a partir de la teoría cinética cor-

puscular. Aparecía ya allí esa profunda incompatibilidad conceptual en los fundamentos de la teoría cuántica, que después de L. de Broglie (1924) denominamos “dualidad onda-corpúsculo”.

Ante esta profunda crisis la táctica de Darwin era “examinar críticamente las diversas pruebas que muestran las contradicciones, para alterar sus deducciones mediante las modificaciones más sencillas posibles en los axiomas sobre los que se basan”. En principio, Darwin estaba dispuesto a abandonar cualquier concepto, por muy básico que éste pareciese; así escribía:

“Puede ser que sea necesario efectuar cambios fundamentales en nuestras ideas de tiempo y espacio, o abandonar la conservación de la materia y la electricidad o incluso, como último recurso, dotar a los electrones con libre albedrío.”

A destacar la referencia que hace Darwin al “libre albedrío” que presagia —de una manera bastante retórica, sin duda— la “acausalidad” cuántica. En realidad, el que Darwin tomase como posibilidad —aunque remota— la del libre albedrío no hace, en mi opinión, sino confirmar la tendencia a especulaciones un tanto metafísicas entre los físicos británicos durante la época victoriana y alrededores^{15 16}.

Es interesante destacar que la sugerencia en favor del libre albedrío de Darwin no encontró eco favorable en Niels Bohr, para el que¹⁷ Darwin redactó su manuscrito. Así, en el borrador (incompleto y no enviado) de una carta¹⁸ fechada en julio de 1919, que Bohr pensaba escribir a Darwin, aquél se refería a la sugerencia de libre albedrío de Darwin como una expresión de

“La a menudo expresada sentencia de que los electrones no pueden conocer el estado final de la transición y adaptan su frecuencia a ésta con anterioridad”.

Como colofón a la primera sección de su manuscrito, Darwin adelantaba lo que él consideraba el principal resultado de su análisis:

“Como se verá más adelante, todas las pruebas de las contradicciones reposan en la exacta conservación de la energía, y por consiguiente argumento, que se deberían agotar completamente todas las posibilidades que se deducen de negar éste [principio de conservación] antes de hacer otras modificaciones.”

En la segunda sección —la más extensa del manuscrito— de *The Basis of Physics* Darwin entraba de lleno en un análisis crítico de las “demostraciones” [existentes] de la necesidad de una teoría cuántica”.

En este sentido distinguía dos tipos de pruebas: la del método de “camino libre” (Planck) y la de “coordenadas generalizadas” (Poincaré, Jeans). Con respecto al método seguido por Planck en 1900¹⁹ para llegar a una “teoría” cuántica, Darwin consideraba que

“el método es muy poderoso para la deducción, pero inútil para la inducción”.

No entendía muy bien —como también les ocurría a sus colegas europeos— el método que había utilizado Planck, en donde consideraciones electromagnéticas y estadísticas *à la* Boltzmann se mezclaban de forma bastante oscura. Estos sentimientos de Darwin se reflejan en las siguientes frases:

“La modificación de Planck (con un cuidado no muy crítico respecto a sus fundamentos).”

“No existe ninguna indicación... de que un cambio pequeño en los fundamentos no produzca un resultado final completamente nuevo.”

Era el segundo método, el de las “coordenadas generalizadas”, al que Darwin prestaba más atención, por considerarlo mucho más sólidamente establecido desde el punto de vista teórico. La mayor parte de los comentarios de Darwin sobre este método se refieren a un artículo que Henri Poincaré escribió en 1912, titulado “Sur la théorie des quanta”²⁰. Este trabajo tuvo una amplia aceptación y difusión en la comunidad científica. Así, un autor se refería a él como la “a menudo citada memoria de Poincaré”²¹. De hecho, el interés de Darwin por este artículo fue tanto que él mismo lo tradujo al inglés²².

Poincaré, que había tomado contacto por primera²³ vez con la teoría cuántica durante el primer congreso Solvay, celebrado en Bruselas entre el 30 de octubre y el 3 de noviembre de 1911, se planteó como problema el averiguar si la hipótesis de la *discontinuidad* cuántica introducida por Planck era *inevitable*. En esto, la conclusión a la que llegó fue todavía más allá: demostró que cualquiera que fuese la ley de distribución para la radiación, en tanto que la radiación total fuese finita, la densidad de probabilidad debía de exhibir discontinuidades análogas a las de la hipótesis cuántica.

Para llegar a este resultado Poincaré utilizaba, entre otras cosas —y cito ésta en particular porque en su *The Basis of Physics* Darwin la criticaba—, un mecanismo por el que intercambiaban energía los “resonadores” (esencialmente, osciladores cargados) de todas las frecuencias del cuerpo negro. Poincaré —siguiendo una sugerencia que había hecho

H. A. Lorentz en el congreso Solvay de 1911²⁴— pensaba que dicho intercambio de energía era imprescindible para que se pudiese alcanzar un estado de equilibrio termodinámico. Según él, un resonador de Planck ganaba o perdía energía únicamente en cuantos proporcionales a la frecuencia del resonador. Ahora bien, como en general dichas frecuencias son inconmensurables, el método que Planck había seguido descartaba cualquier influencia directa de un resonador en otro. Pero sin interacción no se puede alcanzar ningún estado de equilibrio. Para solventar el problema Poincaré propuso dos métodos de interacción entre resonadores, uno basado en el efecto Doppler y otro en las colisiones de los resonadores con átomos ordinarios de energías continuamente variables. En relación con estas colisiones, que Poincaré consideraba instantáneas, Darwin opinaba que

“no parecía legítimo demostrar la imposibilidad de cualquier sistema de ecuaciones dinámicas que no contuviese discontinuidades, utilizando para ello un sistema que experimentase colisiones instantáneas”.

Asimismo, afirmaba que

“puede que en la naturaleza no existan cosas como fuerzas instantáneas de este tipo, y esto puede destruir esta parte de la demostración”.

Otra de las críticas de Darwin a Poincaré hace referencia al principio de conservación de la energía, uno de los pilares sobre los que se levantaba el contenido del artículo de Poincaré y sobre cuya exacta validez tenía serias dudas, como tendremos ocasión de comprobar, especialmente al comentar la sección 5 de *The Basis of Physics*. De hecho era en su crítica al principio de conservación de la energía en donde Darwin tenía mayores esperanzas de que fallasen las demostraciones de Jeans y de Poincaré sobre la inevitabilidad de la discontinuidad cuántica. Así, en la conclusión que cierra la sección 2 del manuscrito que comentamos, se lee:

“Por consiguiente, concluyo que las demostraciones de Jeans y de Poincaré dependen esencialmente de la conservación de la energía. Ambas son susceptibles de alguna crítica en otros puntos, pero como creo que el balance de la evidencia física señala hacia la conservación inexacta de la energía, éstos no me parecen de interés.”

Como acabamos de ver, Darwin también utilizaba la dependencia en la exacta conservación de la energía para criticar las contribuciones

de Jeans, quien se había planteado el mismo problema que Poincaré²⁵, como se puede ver sin más que leer el siguiente párrafo de su artículo titulado "On Non-Newtonian Mechanical Systems, and Planck's Theory of Radiation"²⁶, publicado en 1910:

"La cuestión que se discute en este artículo... se puede resumir de la forma siguiente: ¿Se puede construir un sistema de leyes físicas que se expresan en función de movimientos continuos (o de leyes matemáticas que se expresan mediante ecuaciones diferenciales), de manera que un sistema de materia y éter tienda a un estado final en el que se cumpla la ley de Planck? Encontraremos que la respuesta es negativa."

Es interesante señalar que, junto a sus comentarios relativos al uso del principio de conservación de la energía, Darwin criticaba el que el método de jeans dependía de los "infinitos grados de libertad" del éter! Pero no se piense que la crítica de Darwin provenía de que considerase un anacronismo seguir refiriéndose al "éter"²⁷, sino de una oscura cuestión relativa al tipo de infinito involucrado. Este apego al concepto de éter, todavía en 1919, cuando la teoría de la relatividad especial, que convirtió a este concepto clásico en algo obsoleto, ya tenía catorce años de antigüedad, es una de las características más acusadas de la física británica durante finales del siglo XIX y las primeras décadas del siglo XX²⁸.

Antes de pasar a comentar otras secciones de *The Basis of Physics* quiero señalar que Darwin no fue el primero en criticar el trabajo de Poincaré, ni siquiera se le puede dar prioridad en cuestionar el principio de conservación de la energía. La misma amplia difusión de que fue objeto el artículo de Poincaré hizo que las críticas fueran frecuentes. Así, M. Brillouin, que también asistió al congreso Solvay de 1911, pensaba²⁹ que había que considerar la posibilidad de que no fuesen correctas ciertas hipótesis que Poincaré había introducido con respecto a los resonadores de Planck, antes de aceptar sus conclusiones. Asimismo A. Eucken, el físico-químico que editó la traducción alemana de los trabajos del congreso Solvay, pensaba³⁰ que sería posible obtener una teoría cuántica sin discontinuidades si se rechazaba la suposición implícita de Poincaré de que la energía y el momento se conservan.

Las secciones tercera y cuarta de *The Basis of Physics* se refieren básicamente a la antinomia existente entre la teoría cuántica y la teoría ondulatoria de la luz. La posición de Darwin en este sentido no ofrece demasiadas dudas; presentaba argumentos que sugerían que

"había que efectuar modificaciones en Planck antes que en

Maxwell; una conclusión —añadía Darwin— que yo considero muy satisfactoria”.

En 1919, por consiguiente, dominaba en él claramente el físico clásico, por encima del protocuántico.

Una sugerencia muy atractiva que hacía Darwin al comienzo de la sección 4 es la siguiente:

“La discontinuidad cuántica, que pretende resolver nuestras dificultades, sólo puede ser una descripción *estadística*”³¹.

Esta sugerencia, junto al hecho de que Darwin identificara como

“el problema clave... el del movimiento de un electrón libre en un campo de radiación, (ya que la) aplicación directa de los *quanta* da resultados físicamente absurdos”

parece indicar una fuerte influencia en Darwin del artículo que Einstein escribió en 1917 sobre la teoría cuántica de la radiación³², cuya referencia aparece anotada en el margen del manuscrito. Para apreciar esta influencia basta con leer uno de los párrafos finales del artículo de Einstein, en donde éste escribía:

“Estas propiedades de los procesos elementales... hacen que parezca inevitable la formulación de una auténtica teoría cuántica de la radiación. La debilidad de la teoría reside, por una parte, en el hecho de que no nos acerca a conseguir la conexión con la teoría ondulatoria; por otra parte, que deja la duración y dirección de los procesos elementales a la ‘suerte’.”

A pesar de la postura crítica de Darwin frente al *quantum*, no podía dejar de reconocer que la teoría espectral (el modelo atómico de 1913) de Bohr —que Darwin conocía muy bien desde sus tiempos de Manchester— no hacía sino reforzar la posición de la discontinuidad cuántica. Ante este hecho los argumentos de Darwin eran los siguientes:

“Me parece que lo más probable es que las órbitas de Bohr existan realmente (no meramente como descripciones estadísticas de alguna cosa), mientras que el proceso de radiación es completamente diferente de cualquier otro imaginado en la teoría cuántica.”

Este último párrafo, así como otros que aparecen en diversos lugares del manuscrito de Darwin, tienen una gran analogía, en cuanto al planteamiento y al estilo de las soluciones propuestas, con algunos trabajos de Bohr; con dos en particular: “On the Application of the Quantum Theory to Atomic Structure. Part I: The Fundamental Postulates of the

Quantum Théory”³³, y con el famoso artículo de Bohr, H. A. Kramers y J. C. Slater, “The Quantum Theory of Radiation”³⁴, en el que se suponía que la energía no se conserva en forma exacta y en el que se desarrollaba un mecanismo, similar al clásico de la teoría ondulatoria, para la interacción entre átomos y un campo de radiación virtual. No es éste el lugar de analizar el trabajo de Bohr, Kramers y Slater³⁵; sin embargo es inevitable preguntarse hasta qué punto las opiniones de Darwin, tal y como aparecen expuestas en el manuscrito que ahora comentamos, influyeron en Bohr. En este sentido hay que señalar —como ya dije antes— que inmediatamente después de terminar *The Basis of Physics*, Darwin se lo envió a Bohr. Tanto el documento como la carta que Darwin envió a Bohr³⁶ encontraron, no cabe duda, un más que comprensivo recibimiento por parte de éste. La contestación que Bohr comenzó a redactar, pero que —muy característicamente— no llegó a enviar³⁷, sugiere que no sólo comprendía muy bien las preocupaciones y la filosofía general de Darwin, sino que además él también había pensado en direcciones similares. Es muy probable que el manuscrito de Darwin y otros factores (como, por ejemplo, las ideas —independientes— de Slater³⁸), fuesen los más importantes que situaron a Bohr en el “disparadero” del que surgirían los trabajos antes mencionados.

La sección 5 de *The Basis of Physics* comienza con referencia a la denominada “segunda teoría” de Planck, que éste desarrolló a partir de 1911³⁹. El que Darwin prestase atención en 1919 a esta teoría no hace sino demostrar que la propuesta de Planck tuvo una difusión bastante amplia. Tomás Kuhn, por ejemplo, en *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica* (1894-1912)⁴⁰, señala que

“durante los cinco años que siguieron a su aparición, varias contribuciones a la teoría cuántica mucho más duraderas [que la de Planck] se basaron en ella”⁴¹.

Darwin, no obstante, consideraba que

“los modelos [desarrollados] por Planck en la segunda teoría eran muy artificiales”

volviendo una vez más a argumentar que

“la evidencia experimental señala hacia la inexacta conservación de la energía [con lo que colapsarían] los argumentos para la necesidad de los quanta”.

Naturalmente, Darwin no podía pasar por alto el que nuestra experiencia habitual parece confirmar que la energía se conserva. Sus argu-

mentos en este sentido eran que la energía sólo se conserva aproximadamente y que, en realidad

“los experimentos dinámicos y eléctricos ordinarios sólo establecen [tal conservación] estadísticamente”.

Al leer esto no se puede sino recordar uno de los párrafos que escribió Einstein en su famoso “Sobre un punto de vista heurístico acerca de la creación y la transformación de la luz”⁴² cuando trataba de defender su teoría corpuscular de la luz (radiación) frente a la aparentemente bien establecida experimentalmente teoría ondulatoria. Escribía Einstein en aquella ocasión:

“La teoría ondulatoria de la luz... ha funcionado bien en la representación de fenómenos puramente ópticos, y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que las observaciones ópticas se refieren a medias temporales más que a valores instantáneos.”

Esta sección, y con ella prácticamente el manuscrito (hay todavía una brevísima sección 6 en la que se sugieren —repiten en realidad— algunas posibles vías de ataque a la discontinuidad cuántica), termina con la consideración de algunas consecuencias que entrañaría el abandonar la exacta conservación de la energía. Mencionaré sólo una: la sugerencia de que tal abandono podría ser de utilidad para resolver las muchas dificultades con que se encontraba la física cósmica ante la cuestión de la edad del sistema solar. Es probablemente al mencionar este punto en *The Basis of Physics* cuando se aprecia más claramente la tradición científica británica en la que se encontraba inmerso Darwin, ya que fue en Gran Bretaña donde la cuestión de la edad de la Tierra (y, por consiguiente, del sistema solar) fue más ampliamente discutida⁴³. John Murray, John Playfair, William Hopkins, Lord Kelvin y Artur Eddington figuran entre algunos de los científicos británicos que hicieron contribuciones a este campo⁴⁴.

Parte de este trabajo fue realizado durante mi estancia, en 1978-79, como *visiting professor* en el Department of Physics, Temple University, Philadelphia.

NOTAS

1. Para más información biográfica que la que yo doy aquí, consúltese G. P. Thomson, *Charles Galton Darwin*. Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society 9, 69-85 (1963), y R. B. Lindsay, *Charles Galton Darwin*. Dictionary of Scientific Biography.

2. Un magnífico estudio del sistema educativo del *Mathematical Tripos* se encuentra en H. W. Becher, *William Whewell and Cambridge mathematics*. Hist. Stud. in the Phys. Sci. 11: 1; 1-48 (1980).

3. Op. cit., nota 1.

4. No se puede decir que esta pesimista visión del papel desempeñado por el "Mathematical Tripos" sea la aceptada generalmente. Así, por ejemplo, en 1906 William Thomson, ya entonces Lord Kelvin, expresaba su opinión de que "The unique strength of Cambridge, as a place of experimental research, and as a leader in the advancement of Science generally, has depended greatly on the mathematical foundations given to a large portion of all the undergraduates by the Mathematical Tripos". (Kelvin a George Darwin —padre, por cierto, de C. G. Darwin—, 12 noviembre 1906, citada en S. P. Thomson, *The Life of William Thomson. Baron Kelvin of Largs*, 1133, vol. 2 (Londres, 1910).

5. Op. cit., nota 1.

6. R. H. Fowler, "A simple Extension of Fourier's Integral Theorem and some Physical Applications, in particular to the Theory of Quanta". Proc. Roy. soc. A 99; 462-471.

7. La literatura en torno a la "interpretación de Copenhague" es enorme. Un buen estudio se encuentra, por ejemplo, en el capítulo 7 del libro de Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (McGraw-Hill, New York, 1966).

8. Dos famosas caracterizaciones de la "escuela inglesa" se encuentran en J. T. Merz, *A History of European Thought in the Nineteenth Century*, capítulo III, "The Scientific Spirit in England", vol. 1, pp. 226-301 (Peter Smith Pub. 1976; originalmente publicado en 1904) y P. Duhem, *The Aim and Structure of Physical Theory*, capítulo IV, "Abstract Theories and Mechanical Models" pp. 55-104 (Atheneum, New York, 1974; originalmente publicado en 1906).

9. Hay dos excepciones en las que el manuscrito de Darwin es mencionado —sin apenas analizarlo— brevemente. Son éstas: M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, pp. 171-172, op. cit.; nota 7, y P. Forman, "The Reception of an Acausal Quantum Mechanics in Germany and Britain", en *The Reception of Unconventional Science*, S. H. Mauskopf, ed. (AAAS, 1978) pp. 11-50. Véanse especialmente las pp. 31 y 45.

10. Para una descripción de este archivo, véanse T. S. Kuhn, J. L. Heilbron, P. L. Forman, L. Allen, *Sources for History of Quantum Physics. An Inventory and Report* (American Philosophical Society, Philadelphia, 1967).

11. En los archivos de Filadelfia existen otros dos manuscritos de temas relacionados. Son éstos: *The Theory of Radiation*, 55 págs., agosto de 1912 (mecnografiado), y *Programatic notes on current difficulties with wave equations and statistics*, 3 págs., 19 noviembre 1928.

12. Las propuestas de Darwin iban dirigidas habitualmente en la dirección de alterar las ecuaciones clásicas de la mecánica y abandonar el principio de conservación de energía en los procesos atómicos.

13. M. Planck, "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum", Verh. D. Phys. Ges. 2; 237-245 (1900).

14. A. Einstein, "Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung" Phys. Z. 10; 817-826 (1909).

15. Véanse, en este sentido, las autobiografías de J. J. Thomson, *Recollections and Reflections* (London 1936), y de O. Lodge, *My Philosophy* (Ernest Benn, London, 1933).

16. Bastantes años más tarde Darwin volvía al tema del libre albedrío (en *The Uncertainty Principle*, Science 73, 653-660 (1931), esta vez en relación con el, por entonces ya formulado, "principio de incertidumbre". En esa ocasión la postura de Darwin fue, sin embargo, en favor del determinismo clásico. El artículo de Darwin tuvo una secuela con contestaciones de A. H. Compton (*The Uncertainty Principle and Free Will*, Science 74; 172 (1931) y H. Margenau *The Uncertainty Principle and Free Will*, Science 74; 596 (1931).
17. Véase Forman, op. cit., nota 9.
18. Copia en los *Archives for History of Quantum Physics*, APL, Filadelfia.
19. Cf. nota 13.
20. "Journal de Physique théorique et appliquée". Ser. 5, 2; 5-34 (1912). Para un análisis del origen y contenido de este trabajo véase R. McCormmach *Henri Poincaré and The Quantum Theory*, Isis 58; 37-55 (1967).
21. J. de Bissoudy, *Sur la loi du rayonnement noir et la théorie des quanta*. Comptes rendus 156; 765 (1913).
22. J. De Boissoudy, *Sur la loi du rayonnement noir et la théorie des quanta*. Comptes rendus 156; 765 (1913).
23. Véase R. McCormmach, op. cit., nota 20.
24. "Discours d'ouverture de M. Lorentz", en *La théorie du rayonnement et les quanta*, p. Langevin y M. de Broglie eds., p. 8 (Gauthier. París, 1912).
25. Hay que hacer notar que en realidad fue el trabajo de Jeans el que precedió al de Poincaré.
26. J. H. Jeans, Phil. Mag. 20; 943-954 (1910).
27. Se podría pensar que el éter de Jeans y de Darwin no es sino el campo electromagnético, pero el que continuasen empleando la expresión "éter" sugiere que tal identidad no puede ser completa.
28. Véanse, en este sentido, S. Goldberg, "In Defense of Ether: The British Response to Einstein's Special Theory of Relativity, 1905-1911", Hist. Stud. in the Phys. Sci. 2; 89-125 (1970), J. M. Sánchez Ron, *Relatividad especial, relatividad general (1905-1923): Orígenes desarrollo y recepción por la comunidad científica* (I. C. E., Universidad Autónoma de Barcelona, 1981), capítulo 4, y J. M. Sánchez Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad* (Alianza Universidad, Madrid, en prensa), capítulo 5.
29. M. Brillouin, *Sur la théorie du rayonnement noir*, Comptes rendus 156; 124-126 y 301-304 (1913).
30. A. Eucken, *Die Theorie der Strahlung und der Quanten. Mit einem Anhang über die Entwicklung der Quanten-theorie vom Herbst 1911 bis zum Sommer 1913* (W. Knapp, Halle 1914).
31. Énfasis añadido.
32. A. Einstein, *Quantentheorie der Strahlung*, Physikalische Zeitschrift 18; 121-128 (1917).
33. N. Bohr, Proc. Cambr. Phil. soc. (Supplement 1924); originalmente publicado en alemán en Z. Phys. 13, 117 (1923).
34. N. Bohr, H. A. Kramers y J. C. Slater. Phil. Mag. 47; 785-802 (1924).
35. Para ello véase M. J. Kelin, *The First Phase of the Bohr-Einstein Dialogue*, Hist. Stud. in the Phys. Sci. 2; 1-39 (1970). También son interesantes los comentarios de B. L. van der Waerden en su introducción histórica al volumen *Source of Quantum Mechanics* (Dover, New York, 1968), en donde también se encuentra reproducido el artículo de Bohr, Kramers y Slater.
36. La carta —una copia de la cual se encuentra en los "Archives for the History of Quantum Physics" de Filadelfia— está fechada el 20 de julio de 1919, y entre otras cosas se lee en ella que Frederick Lindemann le había dicho a Darwin que Einstein también había "intentado sin conservación de energía", aunque lo que encontró "no era mejor que con".
37. Ya hice referencia antes a esta carta inconclusa. Tres años más tarde, el 14 de febrero de 1922, Bohr contestaría, aunque brevemente, a Darwin.

38. Véase Van der Maerden, op. cit., nota 35, pp. 11-12, o las transcripciones de las entrevistas con Slater como parte del proyecto *Sources for the History of Quantum Physics*. Filadelfia (op. cit., nota 10).
39. M. Planck, *Eine neue Strahlungshypothese*, Verh. d. D. Phys. Ges. 13; 135-148 (1911).
40. Alianza. Madrid, 1980.
41. La cita está tomada de la pág. 244 de la edición inglesa (Clarendon Press. Oxford, 1978).
42. A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden hewuristischen Gesichtspunkt" Ann. Phys. 17; 132-148 (1905).
43. Véase A. Holmes, *The Age of the Earth* (Nelson, Londres 1937); J. D. Buchfield, *Lord Kelvin and the Age of the Earth* (Science History Publications, New York 1975); S. G. Brush, *The Kind of Motion we call Heat*, vol. 2 (North-Holland. Amsterdam, 1976), y S. G. Brush, *The Temperature of History* (Burt Franklin. New York, 1978).
44. La discusión de las ideas evolucionistas del también británico (y abuelo de Charles Galton Darwin) Charles Darwin, no fue ajena a que este tema fuera tan popular en Gran Bretaña.

APENDICE

Charles Galton Darwin: "The Basis of Physics" (Julio 1919)

1. I have long felt that the fundamental basis of physics is in a desperate state. The great positive successes of the quantum theory have accentuated all along, not merely its value, but also the essential contradictions on which it rests. Each of its triumphs in turn seems to emphasize these contradictions.

In the absence of any direct positive guide as to the reform need, it has seemed to me that the right process is to examine critically the various proofs which bring out the contradictions, in order to upset their deductions by the simplest possible modifications in the axioms on which they rest. In this way it may be possible to knock away the proofs of classical physics one by one and find, after a particular one has been removed, that our difficulties have become reconciled. It may be that it will prove necessary to make fundamental changes in our ideas of time and space, or to abandon the conservation of matter and electricity or even in the last resort to endow electrons with free will, but any such hypotheses open such a wide field of speculation, that it would seem hopeless, short of a very lucky guess, to make any progress by means of them (a).

As will be seen below the proofs of the contradictions all rest on the exact conservation of energy, and I therefore claim that the possibilities to be deduced from denying this should be thoroughly exhausted before further modifications are made (b).

2. The proofs of the necessity for a quantum theory are deduced in two different types of ways, corresponding more or less to the two methods of treating the kinetic theory of gases. The first corresponds to the method of free paths, the second to that of generalized coordinates. By the first method the work of Planck, Lorentz, etc., definitely proves the Rayleigh radiation formula to be a consequence of Maxwell's system, and Planck's modification (with a not too critical regard to its basis) leads to the quantum theory. The method is very powerful for deduction, but useless for induction. There is no indication from it, that a small change in the fundamentals will not produce a completely new final result.

With the second method the arguments are far more cogent. Poincaré (J. de Ph. Dec. 1912 (c) show that any system of forces not showing discontinuities cannot give the observed radiation formula, and that it is precisely the Planck type of discontinuity alone that can give it. Though it does not appear to play the most important role, the conservation of energy is used in his argument which would probably fail without it (d). But I believe his argument to be also invalid on other grounds, of which he himself provides a hint. Its essential point is the interaction of oscillators by means of collisions. He is deducing the impossibility of any system of dynamical equations involving no discontinuities, and it seems illegitimate to prove this by a system undergoing these instantaneous collisions. Indeed it is not surprising to find that the radiation formula deduced from such a system should necessarily involve finite energy in the infinite frequencies. Unfortunately Poincaré is not very explicit with regard to his reasons for being able to neglect the nature of the unknown forces of interaction, but it appears to be because they last such a short time that they have no effect in the time averages. Now in nature there may be no such things as instantaneous forces of this kind, and this may destroy this part of his proof. It is true that it may be argued in its favour, that in a system with rare collisions even although each last a finite time, still the total times of collision will not be an appreciable fraction of the whole time averaged, still such an argument is not absolutely cogent, as it raises the very difficult question which may be called the "uniform convergence of physical approximations", that is, it is not evident that the limit when these times are made to diminish without limit to zero is the same as the result when they are taken at absolute zero throughout.

I therefore conclude that Poincaré's work depends essentially on the exact conservation of energy, and also that its validity is doubtful on other grounds. In this way, it seems to me allowable to disregard his inductive results, which constitute by far the most important part of his paper. I have not read Poincaré's later work yet, which may possibly set right or justify some of the points I criticize (e).

The other chief exponent of the method of generalized coordinates is Jeans (Phil. Mag. especially Dec. 1910 (f) which I am criticizing from memory). His argument first develops the principle of equipartition for all dynamical systems. This certainly depends on the exact conservation of energy. It also involves the conception of the infinite number of degrees of freedom of the aether. I am inclined to think this part correct, but it can be criticized in the following way. The forces developed at any point of the aether are dependent on the motions at various previous instances of a finite number of electrons. At a given time these motions can be completely described in terms of their positions, velocities and an infinite series of differentials of those velocities at that time. So we may argue that though the number of degrees of freedom appears in either case to be infinite, it is not the same order of infinity. I believe in the calculus of infinities one infinity is called C (continuum) and the other \aleph_0 (aleph) and that $C = 2^{\aleph}$. It seems to me that this aspect of the problem should be carefully regarded before full credence is given to Jeans' result (g).

I therefore conclude that both Jeans' and Poincaré's proofs depend essentially on the conservation of energy. Both are open to some criticism on other points, but as I believe the balance of physical evidence to point towards inexact conservation of energy, it does not seem to me to be worth.

3. It may I think be taken as proved, that the quantum theory in anything like its present form is directly contradictory to the general wave theory of light. This is emphatically so for such phenomena as reflection and refraction, but is equally true for the simpler phenomena of diffraction in vacuo, if, as I believe, every source produces its correct diffraction pattern, however faint the light may be, and however widely extended the wave front. It should be possible to develop some sort of inductive proof (for unspecified inte-

raction of aether and matter) that such facts must of necessity involve equations of the type

$$\Delta^2 V = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

or alternatively one might discover some alternative system. For example the analogy of sound waves suggests that a granular structure of the aether would limit its applicability, but such a suggestion is defeated by the fact that X rays require the grains to be less than 10^9 cms, whereas the difficulties of ordinary neat radiation require them at least of the order 10^5 cms.

I think that work of this kind looks not too impossible, and if it can be done, it would force us to look for our modification in Planck rather than in Maxwell; a consequence I should regard as very satisfactory.

4. The Planckian discontinuity, which is intended to resolve our difficulties can only be a statistical description of some other of an entirely different kind. As soon as we attempt to give it precision we encounter the stumbling block, frequency. This is rigorously defined by means and only by means of a Fourier integral. Now such a definition implies that the vibration continues for all time with unchanging amplitude and phase, and this is absolutely contradictory to the fluctuation of energy which is an essential part of the radiation argument.

The Planckian discontinuity must therefore be replaced by another of quite a different type, and this must be imagined to occur at a definite instant of time, as otherwise we have to suppose that an electron knows what is going to happen to it in the future. Now no function of instantaneous position and motion and forces at an electron can be constructed to give the h relation directly. The key problem in this connection is the motion of a single free electron in a radiation field. Direct application of quanta gives physically absurd results and I believe has not so far been made to fit with the second law of thermodynamics (h).

In spite of these obvious criticisms the position of the quantum has been strengthened by Bohr's spectrum theory. It seems far most probable that the Bohr orbits really do exist (not merely as statistical descriptions of something else), while the process of radiation is completely different from any imagined in the quantum theory. The non existence of a continuous series of orbits should be a very valuable guide in formulating the new laws, when the field has been sufficiently narrowed to make a conjecture possible.

5. The models devised in Planck's second theory (*i*) are very artificial. One has to conceive of every electron containing a complicated system of clockwork which can be wound up by the incoming radiation, and a governor capable of setting free the energy at a certain point, while the machinery is uncertain in its action according to a very definite law of probability. A similar model holds for the photoelectric effect. It is impossible to believe that if the science of the present time had not been saturated with the idea of conservation of energy, these complications would have been avoided by saying that there is no *exact* conservation in such cases. This seems to me so obviously the straightforward interpretation of such experiments that its possibilities should be exhausted completely, before other hypothesis are made. Thus experimental evidence points to inexact conservation of energy, while the arguments for the necessity of quanta collapse unless the conservation is exact, so I maintain that the most promising outlook for a reconciliation of our difficulties is to suppose that energy is not exactly conserved.

Now no one can doubt that energy is approximately conserved, but ordinary dynamical and electrical experiment only establish it statistically, and so really only put it on the

same footing as the second law of thermodynamics (*j*). The only possible exception to this statement is the experiments on the large deflections of α particles. Even here some statistical effects enter and anyhow this field of experiment is too limited for general argument.

Let us therefore consider some of the consequences of supposing energy to be conserved only statistically.

A) All dynamics can be reduced to the principle of least action. So it will be necessary to show that the system adopted leads to a statistical Hamiltonian principle. It seems possible that 'least action' might work out as 'greatest probability'. This would constitute a fundamental simplification of dynamics. A revision of thermodynamics would become necessary, in particular there will be some analogue to temperature in the first law (*k*). It should not be impossible to obtain information in some such way.

B) Nothing has so far been said about discontinuities. On the negative side, there is no rigorous indication of their necessity, but the Bohr irbuts suggest that they would be helpful on the positive side. They might simplify the form in which h will be introduced into the equations. In view of the greater simplicity of the mathematics, it is probably best to attempt systems without discontinuities first.

C) It is possible that the statistical conservation of energy is only true of the experiments we ordinarily make and there may be a more general class of occurrences in which the energy changes systematically. Such a hypothesis would clear up many difficulties in cosmical physics such as the age of the solar system. This should not be lost to sight, but it appears to be highly speculative and it is probably better at the start to assume the more restricted hypothesis of universal statistical conservation of energy.

D) The difficulties in our hypothesis are considerable. It seems that the fundamental difficulty with ordinary dynamics is not the exact conservation of energy, but the continuity of the aether in its consequent infinite degrees of freedom. Regarded physically this is true, but still the conservation does play an essential part in the argument, and so the onus of proving that the former point is the important one lies on anyone who wishes to discredit our hypothesis.

E) Dynamics will be very curious; for instane action and reaction become unequal. This will destroy the conservation of momentum which may have effects in relativity theory. On the other hand the special relations of quantum theory with rotatory motion might ultimately be found to clear up the philosophical difficulties of relativity with regard to such motions.

6. Possible lines of attack.

A) Rigorous proof that diffraction involves wavetheory.

B) Attempt to produce the principle of least action from the statistical conservation of energy, and working out of thermodynamics under these conditions.

C) The guessing of a simple system of two oscillators which interact without conservation of energy. The energy is to be conserved on the average and its partition is to be inequal (*l*).

NOTAS

a) Al llegar a este punto, Darwin intercalaba en una nota escrita en el margen, las siguientes palabras: "The disadv. [disadvantage] Of such a method is v.st. as it must of nec. negl. [necessity neglect] a great deal of +ve [positive] Bohr wk. [work]. But Bouly [?] deals with orbits succ. [successfully?] & [and] does not use rad- [radiation] part".

b) Aquí Darwin añadía un resumen de las secciones que seguían. Sin embargo, en el manuscrito estas líneas aparecen tachadas. No obstante, las palabras se entienden claramente y como pueden contribuir a facilitar la comprensión del manuscrito de Darwin, las incluyo a continuación: "In 2 I discuss the classical proofs of the necessity of a quantum theory. In 3 I discuss whether the modification should proceed as a superstructure of Maxwellian or of Planckian dynamics. 4 treats of the difficulties in modifying the ordinary quantum hypothesis to a more fundamental form. 5 deals with the consequences of denying the conservation of energy, as far as they can be seen at present. In 6 I give a few points in which it seems to me possible that some progress might be made".

c) El artículo de Poincaré a que se refiere Darwin es sin duda "Sur la Théorie des quanta", *Journal de Physique théorique et appliquée* Ser. 5, 2; 5-34 (1912).

d) Al margen Darwin intercalaba la siguiente nota: "Oct. 1919. Query. When Poincaré talks of discontinuities does he mean it, or does he *only* mean a breakdown of an unexplained kind".

e) Anotada en el margen se encuentra la siguiente frase: "Nothing new in it. Oct. 1919".

f) Darwin se debe referir, probablemente, a J. H. Jeans, "On Non-Newtonian Mechanical Systems, and Planck's Theory of Radiation", *Phil. Mag.* 20; 943-954 (1910).

g) En el margen aparece escrita una frase que no puedo insertar en el texto con algún sentido: "while cleaning up these other points, at present".

h) Escrito en el margen aparece: "See Einstein, Oct. 1919, 1917! (The B_m paper)". La referencia a Octubre de 1919 es, como en otras partes del manuscrito, el mes en el que Darwin añadió esta nota. El artículo de Einstein (1917! The B_m paper) es sin duda el famoso "Quanten theorie der Strahlung", *Physikalische Zeitschrift* 18, 121-128 (1917).

i) El principal artículo de la denominada "segunda teoría" de Planck es "Eine neue Strahlungshypothese" *Verh. d. D. Phys. Ges.* 13; 135-148 (1911). Acerca de la "segunda teoría" de Planck ver T. S. Kuhn *La Teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912* (Alianza. Madrid, 1980).

j) Escrita en el margen aparece la siguiente anotación: "En [energy?] an [integral] of eqⁿ [equations] only".

k) Escrito en el margen aparece el siguiente párrafo: "We might suppose that energy = $1/2 m (4^2 + v^2 + w^2)$ was a consequence of Maxwell's law of distribution. Then energy would simply depend on the error function's form & not distrib_n function on energy form".

l) Como postdata aparece la siguiente frase (añadida en mayo de 1921): "It all seems a bit conservative. May 1921".