

Thomas S. Kuhn

La teoría del cuerpo negro  
y la discontinuidad  
cuántica, 1894–1912



La primera década del siglo XX fue el período de gestación de una idea revolucionaria que transformó radicalmente la física: la energía no se da en la naturaleza de una forma continua, sino que existe como una especie de unidad mínima de transacción, el cuanto de energía, que impone un sello de discontinuidad a todos los procesos físicos. Si hasta entonces había regido el lema aristotélico de «la naturaleza no da saltos», a partir de ese momento cabría afirmar que «la naturaleza no da más que saltos». Rompiendo con una larga tradición historiográfica, Thomas S. Kuhn defiende en *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica* la tesis de que este concepto revolucionario no nació de la obra de Max Planck, sino de la de otros físicos —Ehrenfest, Einstein y Lorenz— que trataron de explicar el éxito de la nueva teoría planckiana del cuerpo negro. En la primera parte de la obra el autor describe la génesis de esta teoría, esencialmente clásica, y dedica especial atención a la deuda contraída con la teoría estadística de la irreversibilidad de Boltzmann, muy poco estudiada hasta ahora. En la segunda sección examina cómo surgió el concepto de discontinuidad cuántica en la obra de Ehrenfest, Einstein y Lorentz, mientras que los dos capítulos finales se ocupan del estado de la teoría cuántica en 1911 y 1912, época en que la discontinuidad había quedado incorporada definitivamente a la física.

## Índice de contenido

Cubierta

La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica

PREFACIO

Parte Una LA TEORÍA PLANCKIANA DEL CUERPO NEGRO, 1894-1906: LA FASE CLÁSICA

Capítulo 1 LA RUTA DE PLANCK AL PROBLEMA DEL CUERPO NEGRO

El problema del cuerpo negro

Planck y la termodinámica

Planck y la teoría cinética de los gases

Planck sobre el continuo y el electromagnetismo

Capítulo 2 LA HERENCIA ESTADÍSTICA DE PLANCK: BOLTZMANN SOBRE LA IRREVERSIBILIDAD

El teorema de H de Boltzmann

La primera interpretación del teorema de H

La paradoja de Loschmidt y la definición combinatoria de la entropía

La confluencia de «molecular» y «molar»

El desorden molecular

Epílogo: el desorden molecular y la definición combinatoria después de 1896

Capítulo 3 PLANCK Y EL TEOREMA DE H ELECTROMAGNÉTICO, 1897-1899

La radiación de cavidad sin estadística

La entrada de la estadística y de la radiación natural

La «ecuación fundamental» de Planck

## Entropía e irreversibilidad en el campo

### Capítulo 4 LA LEY DE DISTRIBUCIÓN DE PLANCK Y SUS DERIVACIONES, 1900-1901

El teorema de unicidad de Planck y la nueva ley de distribución

El recurso a la combinatoria

Derivación de la ley de distribución

El nuevo status de las constantes de radiación

### Capítulo 5 LOS FUNDAMENTOS DE LA TEORÍA DE LA RADIACIÓN DE PLANCK, 1901-1906

La continuidad de la teoría de Planck, 1894-1906

La radiación natural y los estados equiprobables

Los elementos de energía y la discontinuidad de la energía

El cuanto de acción y su presunta fuente

Los primeros lectores de Planck, 1900-1906[45]

## Parte Dos EL SURGIMIENTO DE LA DISCONTINUIDAD CUÁNTICA, 1905-1912

### Capítulo 6 EL DESMANTELAMIENTO DE LA TEORÍA DEL CUERPO NEGRO DE PLANCK: EHRENFEST, RAYLEIGH Y JEANS

El origen de la ley de Rayleigh-Jeans, 1900-1905

La teoría de Ehrenfest de las cuasi-entropías

La impotencia de los resonadores

La teoría de las complejiones y la ley de Rayleigh-Jeans

### Capítulo 7 UNA NUEVA RUTA A LA TEORÍA DEL CUERPO NEGRO: EINSTEIN, 1902-1909

Einstein y la termodinámica estadística, 1902-1903

Los fenómenos de fluctuación y la teoría del cuerpo negro, 1904-1905

Einstein acerca de Planck, 1906-1909

## Capítulo 8 CONVERSOS A LA DISCONTINUIDAD, 1906-1910

La conferencia de Lorentz en Roma y sus secuelas  
Planck sobre la discontinuidad, 1908-1910  
La consolidación de la opinión de los expertos: Wien  
y Jeans

## Capítulo 9 LA TEORÍA DEL CUERPO NEGRO Y EL ESTADO DEL CUANTO, 1911-1912

El declive de la teoría del cuerpo negro  
El surgimiento de los calores específicos  
Los cuantos y la estructura de la radiación  
El cuanto y la estructura atómica  
El estado del cuanto

## Parte Tres EPILOGO

## Capítulo 10 LA NUEVA TEORÍA DE LA RADIACIÓN DE PLANCK

La «segunda teoría» de Planck  
Revisión de las Lecciones  
Algunos usos de la segunda teoría  
El destino de la segunda teoría

## BIBLIOGRAFÍA

Fuentes secundarias  
Fuentes primarias publicadas  
Fuentes manuscritas

## NOTAS

Abreviaturas y formato

*Para Sarah, Liza y Nat,  
mis maestras en la discontinuidad*

## PREFACIO

Este libro es el resultado de un proyecto que yo no tenía intención de emprender. El relato de su génesis quizá sugiera, pues, su propósito y dé a la vez algunas claves acerca de la naturaleza de la investigación histórica. Un cambio en las circunstancias personales me permitió iniciar, a principios de 1972, un estudio detenido de la historia de la teoría cuántica, tema del que me había ocupado durante mucho tiempo, pero del cual poseía un conocimiento en su mayor parte superficial. En aquellos momentos resolví dar por sentado el primer estadio evolutivo de los conceptos cuánticos, toda vez que había sido muy estudiado por eruditos harto competentes<sup>[1]</sup>. En lugar de comenzar por el principio, como ocurre en el presente libro, mi plan era preparar una monografía sobre el desarrollo de las condiciones cuánticas, tema capital en la evolución de la así llamada vieja teoría cuántica y que podía proporcionar una panorámica estratégica del despliegue de la teoría en su conjunto. El surgimiento de la mecánica de matrices, de la mecánica ondulatoria y del spin electrónico en 1925 y 1926 no podía uno comprenderlo, pensaba yo, sin el telón de fondo que proporcionaba esa panorámica.

En líneas generales conocía la estructura de los procesos que deseaba explorar y sabía también con qué episodios cumbre finalizaría mi historia: los inventos, durante 1922 y 1923, del modelo vectorial del átomo de Landé y del modelo de Bohr de la tabla periódica. Sin embargo, me faltaba un detalle imprescindible para iniciar una investigación centrada. No sabía cuándo habían empezado los físi-

cos a buscar por primera vez las condiciones cuánticas, cuándo se preguntaron por vez primera cuál era la naturaleza de las restricciones impuestas por el cuanto sobre el movimiento de sistemas más generales que el oscilador armónico unidimensional de Planck. El problema, me constaba, había sido muy estudiado en la primera Conferencia Solvay a finales de 1911, pero ignoraba cuándo o cómo había surgido en origen, y, por tanto, no podía decir en qué momento debía comenzar la historia que me proponía relatar. Ni las actas impresas de la Conferencia, ni la abundante bibliografía secundaria sobre la primera década de la evolución de los conceptos cuánticos proporcionaban ninguna pista.

Tras muchas semanas de buscar infructuosamente la solución, decidí ensayar un enfoque menos directo: abríme paso cronológicamente a través de los escritos pertinentes de Planck, que se hallaban fácilmente accesibles en la compilación de sus obras científicas. Planck quizá no fuese, claro estaba, el primero en concebir la necesidad de unas condiciones cuánticas generalizadas, pero su primera mención de esa necesidad localizaría el problema en el tiempo y, muy probablemente, a través del contexto y las citas concomitantes, también en el espacio. Como siempre ocurre al principio de cualquier gran proyecto de investigación, el tiempo disponible parecía sobrado, por lo cual no inicié mis pesquisas con la lectura de los famosos escritos cuánticos de Planck de 1900 y 1901 —que había leído ya muchas veces y creía entender—, sino con sus anteriores trabajos sobre la teoría del cuerpo negro, cuyo primer producto había sido publicado en 1895.

Aquel programa de lectura me reportó un resultado extraordinario. Habiendo asimilado la teoría clásica del cuerpo negro de Planck, no podía leer ya sus primeros escritos cuánticos como yo y otros los habíamos leído normalmente hasta entonces<sup>[2]</sup>. Ahora veía que no eran un comienzo desde cero ni un intento de proporcionar una teoría completamente nueva. No, lo que trataban era de llenar una laguna



detectada anteriormente en la derivación de la antigua teoría de Planck, y en absoluto exigían descartar esta última. En particular, los argumentos que se contenían en los primeros escritos cuánticos de Planck no parecían imponer — tal y como yo los leía ahora— ninguna restricción sobre la energía de los resonadores hipotéticos que su autor introdujera para equilibrar la distribución de energía en el campo de radiación del cuerpo negro. Los resonadores planckianos, saqué en conclusión, absorbían y emitían continuamente, a una tasa que venía gobernada precisamente por las ecuaciones de Maxwell. Su teoría seguía siendo clásica.

Poco después descubrí que ese mismo punto de vista clásico también estaba expuesto, pero mucho más claramente, en la primera edición de las famosas *Lecciones sobre la teoría de la radiación térmica* de Planck, dictadas en el invierno de 1905-06 y publicadas a finales de la primavera siguiente. A mediados de 1906 no era posible encontrar todavía en la obra de Planck ni restricciones sobre la energía clásicamente permisible ni discontinuidades en los procesos de emisión o absorción. Pero éstas son precisamente las principales novedades conceptuales que se ha dado en asociar con el cuanto, e invariablemente se las ha atribuido a Planck y localizado, dentro de su obra, hacia finales de 1900. Fue después de estudiar el tratamiento extenso de la teoría de Planck en sus *Lecciones* de 1906 cuando supe que ahora estaba leyendo correctamente sus primeros escritos cuánticos y que éstos no postulaban ni implicaban la discontinuidad cuántica.

En ese momento, a principios del verano de 1972, suspendí temporalmente el intento de localizar el comienzo de la búsqueda de las condiciones cuánticas y en su lugar comencé a trabajar en un artículo que incorporara mi nueva lectura de Planck. Poco a poco, y contra mi voluntad, el artículo se convirtió en un libro, en parte porque pensaba que entender las primeras teorías planckianas del cuerpo negro exigía cierta familiarización con aspectos hasta en-

tonces inexplorados del tratamiento estadístico de Boltzmann de la irreversibilidad, y en parte porque me di cuenta de que si la discontinuidad no había venido de Planck, como antes se pensaba, era obligado explicar cómo había entrado en la física. Tras numerosas revisiones resultó este libro.

El manuscrito, en su forma final, está dividido en tres partes, la última un breve epílogo. La Parte Uno es la historia que en origen intenté narrar en un artículo, sólo que mucho más extensa, sobre todo al principio, con el fin de proporcionar el material de fondo que conviene a un libro. El capítulo 1 comienza con un esquema del problema del cuerpo negro, describe el desarrollo de la investigación de Planck antes de abordar ese problema y explora cómo su anterior interés por los fundamentos de la termodinámica motivó y conformó su enfoque de la radiación térmica. Finaliza el capítulo con un esbozo de la primera etapa de la investigación de Planck sobre el cuerpo negro, que culminó en 1896 con la presentación de ecuaciones diferenciales para un resonador con amortiguamiento por radiación.

El capítulo 2 es una digresión, larga pero esencial, acerca de la evolución del tratamiento estadístico de Boltzmann de la irreversibilidad, que demostró ser de importancia crítica para el rumbo que siguió la investigación de Planck desde principios de 1898. El capítulo 3, que describe la evolución de la teoría del cuerpo negro de Planck desde 1896 hasta 1899, presenta la primera de dos etapas distintas en su asimilación del enfoque estadístico de Boltzmann. La segunda emerge en el capítulo 4, que contempla la dirección que tomó la investigación de Planck en 1900 y 1901, años en los que inventó su famosa ley de distribución del cuerpo negro y luego proporcionó las dos primeras derivaciones de aquélla. El capítulo 5, en el que termina la Parte Uno, estudia cómo Planck y sus primeros lectores entendieron su teoría revisada durante los años entre 1900 y 1906.

Los cuatro capítulos siguientes, que componen la Parte Dos, estudian el surgimiento y asimilación del concepto de una física discontinua. Los capítulos 6 y 7 versan principalmente sobre la labor de Ehrenfest y Einstein, los dos físicos que primero advirtieron que la ley del cuerpo negro de Planck era imposible derivarla sin restringir la energía del resonador a múltiplos enteros de  $h\nu$ , o sin algún otro paso no clásico equivalente. Sus demostraciones, publicadas ambas en 1906, tuvieron escaso impacto visible, pero la siguiente, presentada por Lorentz en 1908, es la presunta causa de un rápido cambio de actitud —al menos entre los físicos germanos— hacia el cuanto. El capítulo 8 se ocupa de las circunstancias que llevaron a Lorentz a abrazar la versión discontinua de la teoría del cuerpo negro de Planck y describe cómo otros reconocidos expertos en el tema de la radiación —señalemos a Wien, Planck mismo, y probablemente James Jeans— siguieron el ejemplo de Lorentz en 1909 y 1910. A finales de este último año, la mayoría de los teóricos que habían estudiado en profundidad el problema del cuerpo negro estaban convencidos de que éste exigía introducir la discontinuidad.

Una vez establecida esa convicción, el problema del cuerpo negro perdió su lugar central en la evolución de los conceptos cuánticos, porque no daba ninguna pista acerca del origen y naturaleza de la discontinuidad. Para seguir progresando había que investigar otras áreas propuestas para la aplicación del cuanto; hasta principios de 1911 se propusieron muchas, pero sólo una que comenzara a tomarse en serio. La situación queda descrita en el capítulo 9, que esboza la evolución de otras aplicaciones cuánticas propuestas, a lo largo de una panorámica del estado del cuanto en 1911 y 1912. Sugiere, entre otras cosas, que en 1911 la línea de vanguardia de la investigación cuántica pasó muy repentinamente del problema del cuerpo negro al tema, antes ignorado, de los calores específicos a bajas temperaturas. Subproducto de esa transferencia fue que lo

cuántico ganó un auditorio mucho mayor, amén de fama internacional. Otra de las consecuencias contesta la pregunta que dio lugar a mi reluctant estudio de la bibliografía sobre el cuerpo negro. El problema del calor específico, porque desplazó el foco de la discontinuidad de los resonadores de Planck a los átomos y moléculas con masa, es la fuente primaria de la búsqueda de condiciones cuánticas. La cuestión de cómo aplicar el cuanto a problemas mecánicos multidimensionales no se planteó públicamente hasta 1911, pero entonces lo fue repetidamente y en muy diversas formas.

Con esta panorámica del estado del cuanto concluye la Parte Dos, y el breve epílogo que constituye la Parte Tres cierra el volumen. El tema de esta última parte es la así llamada segunda teoría de la radiación del cuerpo negro, elaborada por Planck en 1911-12 y formulada definitivamente en la segunda edición de sus *Lecciones*, que difiere decisivamente de la primera. La segunda teoría, interpretada normalmente como regresión a la teoría clásica y signo del conservadurismo del autor, resulta ser la primera en la que Planck halló lugar para una discontinuidad de cualquier especie. Teniendo en cuenta que localizaba la discontinuidad en lo que más tarde llamó «la estructura física del espacio físico», era también un fragmento muy serio de física: influyó en una serie de coetáneos, entre ellos Niels Bohr, y durante un tiempo fue firme candidato en el campo cada vez más amplio de la competencia entre formulaciones no clásicas de la interacción entre radiación y materia. La segunda teoría, por remitir a los temas de la Parte Uno e iluminar el estado del cuanto a principios de la segunda década de este siglo, constituye buen colofón para este libro. El problema del cuerpo negro no haría avanzar ya, durante algunos años, a la teoría física.

Aunque es cierto que mi dedicación plena al problema del cuerpo negro no comenzó hasta la primavera de 1972, la evolución de la teoría cuántica venía interesándome des-

de diez años antes. Ese interés nació de mi asociación, en los años 1961-64, con Sources for History of Quantum Physics, un proyecto de archivo que, a través de entrevistas con los protagonistas y copias de los manuscritos originales, pretendía conservar testimonios en los que más tarde basar futuros estudios de la evolución del tema<sup>[3]</sup>. El objetivo primario de esa empresa eran los físicos aún vivos, de manera que muy pocos de los testimonios que se lograron preservar atañen directamente a los años sobre los que versa este libro. No obstante, el proyecto pretendía también localizar manuscritos pertinentes, conservados ya en depósito en las bibliotecas europeas. Prácticamente todos los manuscritos reseñados más adelante fueron localizados en el transcurso de esa investigación bibliotecaria; en su ausencia, muchos de ellos me serían sin duda desconocidos.

Una labor no menos importante, aunque mucho menos tangible, me proporcionó gran parte de la visión de conjunto de la evolución de la teoría cuántica que fijó las líneas de interés y guió la selección de materiales para este libro. Es cierto que un historiador no puede proceder retrógradamente y arrancar del proyecto final de la evolución a investigar; pero difícilmente podría poner manos a la obra sin un esquema preliminar del terreno. En mi caso me cupo la gran suerte de que era un proyecto cooperativo, al cual hicieron importantes contribuciones mis dos principales ayudantes, John L. Heilbron y Paul L. Forman, así como algunos de los físicos con los que el proyecto nos puso en contacto. Las notas recogen las deudas que aún puedo detallar, pero ni de lejos reflejan la magnitud de las mismas.

Deudas más recientes se han ido acumulando en la larga andadura de la preparación del libro. Hans Kangro y Martin Klein proporcionaron los borradores previos de los que mi labor arranca y diverge: precisamente porque divergimos en puntos claves de la interpretación, les estoy especialmente agradecido por su generosidad al escuchar y criticar mis opiniones en una fase temprana de su gestación.

Más tarde, cuando el manuscrito tomó ya cuerpo, me hicieron importantes sugerencias —sobre la totalidad o sobre partes de él— una serie de colegas de la historia de la ciencia. John Heilbron, Russell McCormach, Noel Swerdlow, John Stachel y Spencer Weart se manifestaron acerca de una u otra versión del manuscrito. Jed Buchwald, Stephen Brush, Paul Forman y Daniel Siegel criticaron los borradores de uno o más capítulos. Por su guía al atravesar o circunvalar problemas de física teórica a veces abstrusos estoy en deuda con John Bahcall, Freeman Dyson, Edward Frieman y John Hopfield. Por último, tres de mis alumnos o antiguos alumnos —Robert Bernstein, Bruce Wheaton y Norton Wise— estudiaron con atención el manuscrito, en la labor de comprobar notas, citas, traducciones y citas bibliográficas. Sus contribuciones críticas sobrepasaron con mucho la importante rutina que se les asignó, y Robert Bernstein tomó sobre sus hombros la responsabilidad del índice. Todas estas personas me ayudaron a clarificar el texto y evitar errores por comisión u omisión. No obstante, la obligada cláusula de descargo procede en este caso mucho más de lo que es usual: de los problemas que subsistan en el texto, el único responsable soy yo.

Quienquiera que se dedique a un trabajo de esta especie se convierte en una pesadilla para los bibliotecarios. Ante todo debo reconocer la paciencia y buen humor con que soportaron mis depredaciones el personal de la Biblioteca de Matemáticas y Ciencia Natural del Institute for Advanced Study y el de la Biblioteca de Matemáticas-Física de la Universidad de Princeton. Buena parte del material manuscrito de donde bebí mi relato está depositado en microfilme en la biblioteca de la American Philosophical Society, y agradezco a Murphy Smith y su equipo el haberme proporcionado copias fácilmente manejables. Otra ayuda esencial en el teína de los manuscritos fue la del doctor Tilo Brandis y su equipo, de la Staatsbibliothek Preussischer Kulturbesitz, la del doctor A. Opitz, del Deutsches Museum, y la de E.

van Laar, del Algemeen Rijksarchief en La Haya. Por su permiso para reproducir materiales que los conservadores de estas colecciones me proporcionaron, vaya mi agradecimiento a: Frau Gerda Föppl, por parte de los herederos de Wien; Professor T. H. Von Laue; Dr. Otto Nathan, por el legado de Einstein; Frau Dr. Nelly Planck; y Frau Pia de Hevesey. El doctor van Laar, del Algemeen Rijksarchief, y Mrs. M. Fournier, del Museum Boorhaave, también me otorgaron su autorización en representación de sus instituciones respectivas.

Deuda especial guardo para con Helen Dukas, quien tanto ha hecho por reunir y conservar el archivo Einstein en el Institute for Advanced Study. No sólo me fue guía generosa en la rica colección que preside, sino que, expuesta por proximidad a mis repetidas importunaciones, fue ayuda constante en cuestiones de ortografía e idioma alemanes. Ayuda de la misma índole la recibí de cuando en cuando de mis colegas Albert Hirschman y Michael Mahoney, así como de visitantes alemanes al Institute for Advanced Study. Y en un momento de gran necesidad, Víctor Lange descifró algunas frases clave escritas en taquigrafía de Gabelsberg y dispersas por los cuadernos de investigación de Ehrenfest que comentamos en el capítulo 6.

El trabajo para este volumen fue iniciado durante un permiso de un semestre de la Universidad de Princeton, financiado en parte por la universidad y en parte por la National Science Foundation, con la Beca S-1265<sup>[4]</sup>. La eficacia de mi labor se ha beneficiado también mucho, entonces y desde entonces, de mi vínculo con el Institute for Advanced Study, primero como visitante y más recientemente como miembro de dedicación parcial. Dentro de esta última modalidad, mi labor estuvo financiada en parte, durante dos años, por el National Endowment for the Humanities, con la Beca H-5426, y durante otros tres por la National Science Foundation, con las Becas GS 42905x y SOC 74-13309. Con todas estas instituciones, y con el paciente per-