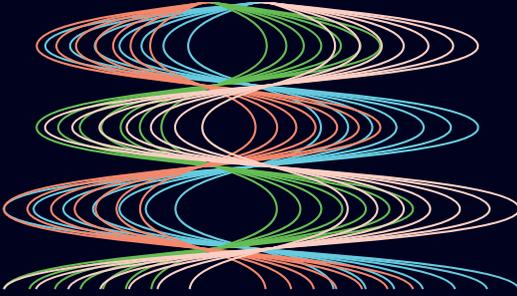




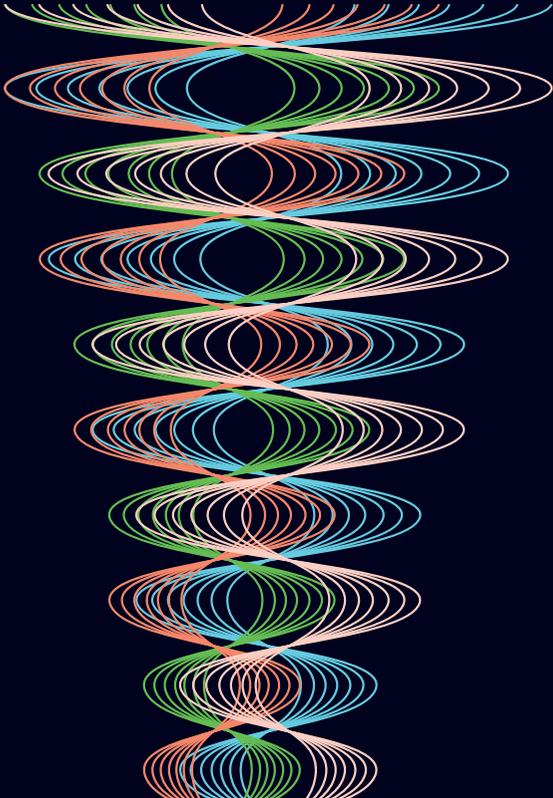
JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON



HISTORIA  
*de la* FÍSICA CUÁNTICA

Volumen I

*El período fundacional: origen y desarrollo  
de la cuantización de Planck (1860-1924)*



CRÍTICA

# HISTORIA DE LA FÍSICA CUÁNTICA

## VOLUMEN I

El período fundacional: origen y desarrollo  
de la cuantización de Planck (1860-1924)

José Manuel Sánchez Ron

**CRÍTICA**  
BARCELONA

Primera edición: marzo de 2025

*Historia de la física cuántica. Volumen I*  
*El período fundacional: origen y desarrollo de la cuantización de Planck (1860-1924)*  
José Manuel Sánchez Ron

La lectura abre horizontes, iguala oportunidades y construye una sociedad mejor. La propiedad intelectual es clave en la creación de contenidos culturales porque sostiene el ecosistema de quienes escriben y de nuestras librerías. Al comprar este libro estarás contribuyendo a mantener dicho ecosistema vivo y en crecimiento.

En Grupo Planeta agradecemos que nos ayudes a apoyar así la autonomía creativa de autoras y autores para que puedan continuar desempeñando su labor. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web [www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com) o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Queda expresamente prohibida la utilización o reproducción de este libro o de cualquiera de sus partes con el propósito de entrenar o alimentar sistemas o tecnologías de inteligencia artificial.

© José Manuel Sánchez Ron, 2001, 2025

© Editorial Planeta, S. A., 2025  
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)  
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

[editorial@ed-critica.es](mailto:editorial@ed-critica.es)  
[www.ed-critica.es](http://www.ed-critica.es)

ISBN: 978-84-9199-725-2  
Depósito legal: B. 3.597-2025  
Impresión y encuadernación: Gómez Aparicio  
*Printed in Spain* - Impreso en España



## Prehistoria de los cuantos: Kirchhoff, espectros y radiaciones

Aunque el inicio de la física cuántica se sitúa habitualmente en 1900, sus orígenes se remontan mucho más atrás, al siglo XIX. De hecho, los tres primeros capítulos de este libro (estrictamente, los cuatro primeros, ya que 1900 fue el último año del siglo XIX) tienen como escenario aquella centuria. En este primer capítulo me ocuparé básicamente de dos dominios, que, como veremos, resultaron cruciales para el desarrollo de la física cuántica: 1) las líneas espectrales (espectros) que se observaban en las radiaciones emitidas por los diferentes elementos; 2) los esfuerzos teóricos por explicar las propiedades de tales radiaciones y algunos problemas que afectaban a la descripción teórica de ciertos aspectos de la materia. Comencemos por el primero, por el de los espectros, el de la espectroscopia.

### ESPECTROS

Fue Isaac Newton (1642-1727) quien descubrió en el siglo XVII que al pasar a través de un prisma de vidrio la luz se descompone en colores diferentes (los colores del arco iris), produciendo lo que se denomina un espectro. Recíprocamente, comprobó que al componer esos colores se recuperaba la luz «normal».

Estimulado por los cursos de óptica de Isaac Barrow (1630-1677) en Cambridge y la teoría de la luz de Descartes (1596-1650), hacia 1664 Newton comenzó a interesarse por los fenómenos ópticos. No

fue, sin embargo, hasta 1666 (año que pasó en la finca familiar de Woolsthorpe debido a una epidemia que obligó a cerrar la Universidad de Cambridge en agosto de 1665) cuando intensificó sus esfuerzos, recurriendo a un instrumento simple pero en sus manos extremadamente precioso: un prisma de vidrio. He aquí cómo se refirió al inicio de sus experimentos en el artículo que publicó en el número del 19 de febrero de 1671/72 de las *Philosophical Transactions* de la Royal Society (Newton 1671/72: 3075-3076): «A comienzos del año 1666 (momento en el que me apliqué a pulir cristales ópticos de formas distintas a la esférica) me proporcioné un prisma triangular de cristal, para ocuparme con él del celebrado Fenómeno de los Colores. Habiendo oscurecido mi habitación, hice un pequeño agujero en una contraventana, para dejar pasar sólo una cantidad conveniente de luz del Sol, y coloqué mi prisma en su entrada, de manera que pudiese ser refractado en la pared opuesta. Al principio, ver los vivos e intensos colores así producidos constituyó una muy entretenida distracción, pero después de un rato intentando considerarlos más cuidadosamente, me sorprendió verlos en forma *oblonga*, cuando, según las leyes aceptadas de la Refracción, esperaba que hubiese sido *circular*».

Semejante anomalía le indujo a recurrir a un segundo prisma, con el que llegó a la conclusión de que los colores (observados desde hacía ya siglos) que aparecían al pasar la luz blanca inicial por los prismas no eran «cualidades de luz, derivadas de refracciones o reflexiones de cuerpos naturales (como se cree generalmente), sino propiedades originales o innatas». La luz visible se convertía, en consecuencia, en la combinación de diferentes colores elementales, como muestra con particular claridad el arco iris.

Durante el siglo que siguió a las observaciones de Newton, pocos avances importantes se realizaron en este campo. Uno de ellos tuvo lugar en 1752, cuando Thomas Melvill (f. 1753) se aprovechó de que al calentar los cuerpos sólidos (y los líquidos también), éstos emiten, cuando alcanzan una temperatura suficientemente alta, radiaciones. Melvill hizo pasar por un prisma la luz que emitía una llama producida por sodio y observó un espectro continuo, surcado por una serie de líneas brillantes. Que sepamos, fue la primera observación de un *espectro de emisión*.

Exactamente cincuenta años después de las observaciones de Melvill, esto es, en 1802, William Hyde Wollaston (1766-1828) advirtió

que en el espectro de la luz procedente del Sol aparecían unas pocas líneas oscuras, que Newton no había detectado y que él tomó como los bordes de los colores naturales (Wollaston 1802). Algunos años después (1814-1815), Joseph von Fraunhofer (1787-1826) examinó con mucho más detalle el espectro de la luz del Sol, descubriendo cerca de seiscientas de tales rayas oscuras, que a partir de entonces se conocieron como «líneas de Fraunhofer». Pero no se limitó a descubrir nuevas rayas, sino que también se propuso establecer el lugar del espectro en que se encontraban situadas, determinando la posición de trescientas veinticuatro.

Es interesante señalar que Fraunhofer era un óptico profesional, entre cuyas ocupaciones figuraba la de construir lentes; de hecho, fabricó las mejores lentes acromáticas y prismas que había visto jamás la comunidad óptica. Por este motivo tenía más facilidad que la mayoría de los científicos de su época para utilizar prismas que no «deformasen» demasiado la luz. Su interés por el espectro solar provenía asimismo de su profesión: necesitaba localizar en el espectro un punto de referencia que le permitiera medir con precisión los índices de refracción (grado de desviación de la luz al pasar por un cierto medio) de los distintos materiales con los que construía las lentes de sus instrumentos ópticos.

Gradualmente se fue descubriendo que era posible producir «artificialmente» líneas oscuras en los espectros haciendo pasar la luz a través de diversas sustancias, confirmándose por otra parte el tipo de observación de Melvill: los espectros producidos por algunas llamas estaban atravesados por líneas brillantes.

Naturalmente, se efectuaron varios intentos de explicar y relacionar tales observaciones, pero pasó algún tiempo hasta producirse un avance sustancial. Éste llegó pasado el ecuador del siglo, gracias a las investigaciones de un físico de la Universidad de Heidelberg, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), que encontró un magnífico apoyo en el químico Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899).

## GUSTAV KIRCHHOFF Y LA ESPECTROSCOPIA

Formado en la universidad de su ciudad natal, Königsberg, donde se vio influido especialmente por Franz Neumann (1798-1895), Kirchhoff se trasladó a Berlín después de doctorarse en 1847. En la ca-

pital prusiana comenzó su carrera docente, al lograr en 1848 el título de *Privatdozent* (habilitado para dictar cursos en la universidad, sin recibir un salario oficial, únicamente el procedente de las matrículas de los alumnos de sus cursos). En 1850 se incorporó como *extraordinarias* a la Universidad de Breslau. Allí conoció a Robert Bunsen, pero éste se trasladó a Heidelberg el año siguiente. En 1854, cuando Philipp von Jolly (1809-1884) dejó su cátedra de Física en Heidelberg, Bunsen propuso a Kirchhoff para sucederle, iniciativa que tuvo finalmente éxito. Mantendría este puesto hasta 1875, cuando aceptó una cátedra de Física teórica en la Universidad de Berlín, ciudad en la que falleció el 17 de octubre de 1887. En el capítulo 4 tendremos oportunidad de comprobar que uno de sus alumnos en Berlín fue un estudiante llamado Max Planck.

Tras haberse dedicado al estudio de la elasticidad y la electricidad, hacia 1858 Kirchhoff comenzó a interesarse por el análisis espectral. En esencia, el origen de su interés fue el siguiente: en Heidelberg, Bunsen estaba investigando la posibilidad de analizar sales según los colores que daban al arder, proceso en el que desempeñaba un papel importante un instrumento que Bunsen desarrolló en la década de 1850: el denominado «mechero de Bunsen», con el que el gas inyectado se quemaba con una llama que aunque caliente no era brillante. Y en este punto entra Kirchhoff en la historia, ya que en 1859 señaló a su colega que un método más preciso que el «colorímetro» para llevar a cabo semejante tarea de identificación era a través del espectro al que daban origen tales llamas coloreadas. Unieron sus fuerzas: Bunsen suministrando no sólo su mechero, que para el análisis espectroscópico era aún más útil, sino también sales de gran pureza, mientras que Kirchhoff aportaba el espectroscopio con el que observar las líneas. El poder e importancia del método para la química se mostró muy pronto, al descubrirse con él, como veremos más adelante, dos nuevos elementos químicos, el cesio y el rubidio.

Pero antes de entrar en esta cuestión, es preciso explicar unos detalles muy importantes de la aportación de Kirchhoff.

En el otoño de 1859, mientras llevaba a cabo unos trabajos preliminares para su colaboración con Bunsen, Kirchhoff realizó una sorprendente observación. Se sabía, gracias a trabajos llevados a cabo por León Foucault (1819-1868) en 1849, que las denominadas líneas D (oscuras), observadas en el espectro solar por Fraunhofer en 1814, coincidían con las líneas amarillas brillantes detectadas en

las llamas que contenían sodio. Este efecto se podía observar con cierta facilidad haciendo que la luz del Sol llegase a un espectroscopio tras atravesar una llama de sodio; si se debilitaba suficientemente la luz solar, las oscuras líneas de Fraunhofer eran sustituidas por las líneas brillantes provenientes de la llama. El hallazgo de Kirchhoff fue advertir que si la intensidad del espectro solar aumentaba por encima de un cierto límite, las líneas D se hacían todavía más oscuras al interponer una llama de sodio. Intuyó inmediatamente que se trataba de algo fundamental, aunque no sabía cómo explicar el fenómeno.

Un día después se le ocurrió una explicación, que pronto se vio confirmada por nuevos experimentos: una sustancia capaz de emitir una cierta línea espectral posee una gran capacidad de absorber la misma línea; por eso las líneas D, características del sodio, se hacían más oscuras cuando se interponía una llama también de sodio. Otra manifestación de semejante propiedad podía ser que la simple interposición de una llama de sodio de baja temperatura sería suficiente para producir artificialmente las líneas D en el espectro de una fuente de luz intensa que no las mostraba inicialmente, pero este hecho conducía a una conclusión fundamental: las líneas D (oscuras, insistió) que aparecían en el espectro solar tenían que ser debidas a que en la atmósfera del Sol existía sodio, que mediante un fenómeno de absorción originaba las mencionadas rayas espectrales.

Antes de que acabase el año Kirchhoff (1859 a) informó a la comunidad científica de sus ideas, en las que continuó trabajando durante algún tiempo. Un ejemplo en este sentido es la carta que dirigió el 6 de agosto de 1860 al químico Otto Linné Erdmann (1804-1869), y de la que el químico británico Henry Roscoe (1833-1915) publicó un extracto traducido al inglés en el *Philosophical Magazine* (Kirchhoff 1861 a; 1862, versión en castellano). Escribía en ella:

Desde que remití mi Memoria a la Academia de Ciencias de Berlín, no he dejado de proseguir mis investigaciones en el mismo sentido. Había enunciado yo la ley de que una llama absorbe los mismos rayos que emite; no insistiré sobre las pruebas teóricas que he dado en confirmación de esta ley, ni sobre los experimentos que hemos hecho Mr. Bunsen y yo para demostrar que las rayas brillantes del espectro de una llama pueden servir para caracterizar los metales introducidos en esta llama; mi intención es comunicaros los resultados de mis investigaciones respecto al análisis químico de la atmósfera solar.

El Sol tiene una atmósfera gaseosa, candente, y que envuelve un núcleo cuya temperatura es todavía mucho más elevada. Si pudiésemos observar el espectro de esta atmósfera, notaríamos en él las rayas brillantes características de los metales contenidos en este medio, y por ellas podríamos determinar la naturaleza de estos metales. Pero la luz más intensa emitida por el núcleo solar no permite que el espectro de esta atmósfera se produzca directamente: obra sobre él invirtiéndole, según lo que he expuesto anteriormente; es decir, que sus rayas brillantes parecen oscuras. No vemos el espectro de la atmósfera solar por sí mismo, sino su imagen negativa. Esta circunstancia permite determinar con igual exactitud la naturaleza de los metales contenidos en esta atmósfera, para lo cual basta tener un conocimiento profundo del espectro solar, y de los producidos por cada uno de los diferentes metales.

En este punto Kirchhoff se detenía en explicar el aparato que había hecho posible sus observaciones: un espectroscopio con cuatro prismas (como veremos más adelante, el espectroscopio utilizado en su colaboración con Bunsen fue inicialmente uno más rudimentario: tenía únicamente un prisma).<sup>1</sup> Me detengo en la descripción que hacía de él, entre otros motivos porque con demasiada frecuencia no se hace hincapié en la importancia que los instrumentos tienen en el desarrollo de la ciencia, con lo que la comprensión de ésta resulta gravemente deteriorada. Esto es particularmente cierto en el caso de la espectroscopia, lo que es tanto como decir en apartados básicos de la astrofísica y de la física cuántica. «En los talleres de instrumentos de óptica y de astronomía de Mr. Steinheil», señalaba Kirchhoff, «he tenido la dicha de encontrar un aparato que produce espectros de una intensidad y pureza, a las cuales seguramente no se había llegado todavía. Este aparato se compone de cuatro grandes prismas de flintglass [cristal de roca] y de dos anteojos muy perfectos, y permite ver en el espectro solar millares de rayas, en las cuales es fácil sin embargo orientarse en razón de las diferencias que presentan en su ancho y en su grado de oscuridad, y por los grupos variados que ofrecen». Y continuaba:

1. Expresado de forma muy sencilla, cuantos más prismas se tengan, en principio mayor será la separación entre las líneas del espectro (cada prisma produce una desviación), con lo cual es más fácil detectarlas.

Este aparato hace ver el espectro de una luz artificial con la misma intensidad que el espectro solar cuando es suficiente la potencia luminosa de la llama. La del gas común, en la cual se volatilizan las combinaciones metálicas, no basta generalmente, pero la chispa eléctrica da con la mayor limpieza el espectro del metal que constituye los electrodos. Un aparato grande de inducción de Ruhmkorff me produce chispas, que se suceden con bastante rapidez para que pueda observarse este espectro tan cómodamente como el espectro solar.

Una disposición muy sencilla permite comparar con una sola observación los espectros de los dos focos luminosos. Consiste en hacer penetrar por la mitad superior de la hendidura los rayos de uno de los dos focos luminosos, mientras que la mitad inferior deja paso libre a los rayos del otro. En este caso uno de los espectros viene a colocarse inmediatamente debajo del otro, del cual sólo le separa una sencilla línea apenas perceptible. Con facilidad y exactitud se puede estar seguro de si hay coincidencia de ciertas rayas de uno de los espectros con las del segundo.

De esta forma, se había «cerciorado de que todas las rayas brillantes peculiares del hierro corresponden a las rayas oscuras del espectro solar. He podido indicar hasta 72 rayas oscuras en el espectro solar, que corresponden a las rayas brillantes del espectro del hierro: estas rayas están enteramente situadas en el espacio que he reproducido, las cuales son debidas al hierro que existe en la atmósfera solar. Armstrong no ha observado en el espectro de la chispa eléctrica más que tres rayas brillantes del hierro, contenidas en los mismos límites. Mr. Masson apenas ha observado otras más; Mr. Van der Willigen, por su parte, dice que el hierro no hace aparecer con el espectro de la chispa eléctrica más que un corto número de rayas, y que éstas son muy débiles. Debo atribuir a la fuerza de mi aparato el gran número de rayas brillantes, cuya presencia he demostrado con una exactitud completa en el espectro del hierro».

El hierro, como es bien sabido, es un elemento que produce unas tres mil líneas espectrales, lo que da idea de lo compleja que es la tarea de estudiar su estructura espectral. Kirchhoff advirtió este hecho: «El hierro se distingue [...] por el gran número de rayas notables que presenta en el espectro solar». No se limitó, sin embargo, a él: «El magnesio es interesante por el hecho de que presenta en el espectro solar el grupo más aparente de las rayas de Fraunhofer, es decir, el

verde, que se compone de tres rayas fuertes. Otras rayas oscuras del espectro solar coinciden claramente, pero son mucho menos notables que las rayas brillantes del cromo y del níquel. Puede, pues, considerarse como demostrada la presencia de estos metales en la atmósfera del Sol. Además, parece que otros muchos metales faltan en ella completamente. Así, los espectros de la plata, del cobre, del zinc, del plomo, del aluminio, del cobalto, del antimonio presentan también rayas extraordinariamente brillantes, pero que no coinciden con ninguna de las rayas oscuras del espectro solar, al menos entre las que son visibles». Momento en que añadía: «Espero dar pronto detalles más minuciosos sobre este punto».

Las consecuencias de los argumentos y observaciones de Kirchhoff eran evidentes. Se hacía posible estudiar por primera vez la composición de los cuerpos celestes sin más que analizar la luz que recibimos de ellos. En otras palabras: nacía una nueva ciencia, la astrofísica, que permitía abordar cuestiones imposibles de resolver para la vieja, varias veces milenaria, astronomía. En sus memorias Roscoe (1906: 69), colaborador de Bunsen durante algún tiempo en Alemania, recordaba la impresión que le suscitó este avance: «Nunca olvidaré la impresión que me produjo mirar a través del magnífico espectroscopio de Kirchhoff, instalado en una de las habitaciones traseras del viejo edificio de la Hauptstrasse, que entonces hacía las funciones de Instituto de Física, y ver la coincidencia de las líneas brillantes en el espectro del hierro con las oscuras líneas de Fraunhofer en el espectro solar. La evidencia de que el hierro, tal y como lo conocemos en esta Tierra, está contenido en la atmósfera solar, aparece instantáneamente como concluyente. Y no han transcurrido aún cuarenta años desde que Comte, argumentando en su *Système* que los investigadores no deberían malgastar su tiempo intentando lo imposible, utilizase como un ejemplo de lo que quería decir por imposible que el conocimiento de la composición del Sol a una distancia de 91 millones de millas debía permanecer para siempre inalcanzable». «Ya no será necesario tocar un cuerpo para determinar su naturaleza química: bastará verlo», escribía el químico francés Jean-Baptiste-André Dumas (1800-1884; 1861: 484). Y, por supuesto, reconocía, como reconocían todos, que se estaba ante el principio: «Lo que el estado de los instrumentos actuales de óptica permite efectuar en el día de hoy respecto del Sol y las principales estrellas fijas, otros nuevos progresos permitirán que lo intente el hombre respecto de los astros más

distantes y luminosos, y reconocer así por medio de qué elementos ha formado Dios los mundos que pueblan el Universo». Treinta años más tarde, las esperanzas fundadas en el nuevo método se habían consolidado, como muestran las palabras que pronunció en su discurso como presidente de la *British Association for the Advancement of Science*, el astrónomo y espectroscopista William Huggins (1824-1910; 1891: 37), en la reunión anual celebrada en Cardiff: «La astronomía, la más antigua de las ciencias, ha más que renovado su juventud, en ningún momento del pasado ha estado tan encendida con ilimitadas aspiraciones y esperanzas. Nunca fueron sus templos tan numerosos, ni tan grande la masa de sus devotos».

El propio Kirchhoff continuó explorando este campo, como anunciaba en su carta a Erdmann. Sin embargo, no profundizaré en este ámbito de sus actividades, simplemente diré que una de sus publicaciones más acabadas en este campo apareció en dos entregas en 1861 y 1862 (Kirchhoff 1861/62).

#### KIRCHHOFF Y BUNSEN (1860)

Aunque me he referido a la colaboración de Kirchhoff y Bunsen, no me he detenido todavía en su contenido, centrado como estaba en seguir la línea argumental de las aportaciones espectroscópicas de Kirchhoff. Volvamos, pues, atrás, a esa colaboración, que se concretó en un extenso artículo conjunto, publicado en dos partes (Kirchhoff y Bunsen 1860, 1861).<sup>2</sup>

Que, al contrario de las memorias de Kirchhoff que he comentado en la sección precedente, basadas bien en interpretaciones teóricas o en observaciones experimentales solares, el trabajo de Bunsen y Kirchhoff estaba dedicado fundamentalmente a aspectos químicos (motivo por el cual la participación de Bunsen se hacía imprescindible) es algo que quedaba claro desde el principio: «Se sabe», escribían (Kirchhoff y Bunsen 1862: 205-207), «que muchas sustancias introducidas en una llama tienen la propiedad de producir en el espectro de ésta rayas brillantes particulares: en la existencia de estas

2. La citas que efectuaré a continuación de estos dos artículos están tomadas de una versión al castellano publicada en la revista de la Academia de Ciencias de Madrid: Kirchhoff y Bunsen (1862).

rayas puede fundarse un método de análisis cualitativo que ensancha considerablemente el dominio de las investigaciones químicas y que permite resolver problemas hasta ahora insuperables. Nos limitaremos en esta Memoria a aplicar este método a la investigación de los metales alcalinos y alcalino-térreos, haciendo resaltar su valor con una serie de ejemplos».

A continuación explicaban los instrumentos que habían empleado, sin los cuales, como ya he apuntado, nada habría sido posible. El primero era el mechero de Bunsen, el humilde, familiar, mechero de Bunsen, que —es uno de los puntos que pretendo transmitir en este capítulo— desempeñó de esta forma un papel importante en los orígenes de la física cuántica: «Las rayas del espectro son tanto más visibles, cuanto más elevada es la temperatura de la llama y menor su potencia luminosa. La lámpara de gas, que uno de nosotros ha descrito, produce una llama poco luminosa y de una temperatura muy elevada, y se presta perfectamente al examen de las rayas brillantes que dan ciertos cuerpos». El segundo, el espectroscopio, que era más primitivo que el de cuatro prismas empleado por Kirchhoff, con el que nos encontramos con anterioridad: «El aparato que hemos empleado para la observación del espectro se compone de una caja, ennegrecida por su interior, colocada sobre tres pies, y cuya base es un trapecio. Las dos paredes correspondientes a los lados oblicuos del trapecio forman un ángulo de  $58^\circ$ , y llevan dos anteojos pequeños: el ocular del primero está reemplazado por un disco de latón que tiene una hendidura vertical, la cual se coloca en el foco del objetivo. Delante de esta hendidura se pone la lámpara, de modo que el eje del anteojo pase por el borde de la llama. Un poco más abajo de este punto de encuentro se halla, pendiente de un sustentáculo, un hilo de platino muy fino y encorvado en forma de espiral, en el cual se pone el glóbulo del cloruro que se va a examinar, deshidratado previamente. Entre los objetivos de ambos anteojos hay un prisma de  $60^\circ$ , sostenido por un disco de latón movable sobre un eje vertical, el cual lleva en su parte inferior un espejo, y encima de él una varilla, que sirve para dar vuelta al prisma y al espejo. Delante de este último se halla colocado un anteojo, que sirve para leer las divisiones de una escala horizontal colocada a corta distancia. Dando vueltas al prisma pueden hacerse pasar todas las partes del espectro detrás del retículo vertical del segundo anteojo, y por consiguiente que coincidan todas las rayas del mismo con el retículo. A cada posición del espec-

tro corresponde una división de la escala; y si es poco luminoso, se aclara el hilo del antejo por medio de una lente que proyecta en él la luz de una lámpara por una abertura lateral practicada en el tubo ocular del segundo antejo».

En cuanto a elementos químicos, compararon los espectros obtenidos con diversos compuestos (como cloruros puros, yodatos, hidratos, carbonatos y sulfatos) cuando se introducían llamas de, entre otros elementos y compuestos, azufre, hidrógeno, sulfuro de carbono, óxido de carbono y la llama no luminosa del gas del alumbrado. «De nuestras largas y minuciosas investigaciones», manifestaban, «cuyos detalles creemos deber pasar en silencio, resulta que la naturaleza de la combinación en que existe el metal, la diversidad de los fenómenos químicos que se originan en cada llama y la diferencia enorme de temperatura producida por ellas *no ejercen ninguna influencia sobre la posición de las rayas del espectro correspondiente a cada metal*».

Tras estas explicaciones, llegaba el momento de señalar una de las grandes aplicaciones del método espectral, una de las principales, si no la principal, en lo que a la química se refiere: «También tiene importancia el análisis del espectro bajo otro punto de vista, en cuanto puede conducir al descubrimiento de elementos todavía desconocidos. Si en efecto existen cuerpos diseminados en la naturaleza en cantidades bastante pequeñas para ocultarse a nuestros métodos comunes de análisis, puede esperarse descubrirlos por la simple inspección del espectro. La experiencia nos ha dado ocasión de confirmar esta hipótesis, puesto que fundándonos en los resultados positivos obtenidos por la observación del espectro, creemos poder afirmar con exactitud que además del potasio, del sodio y el litio, existe un cuarto metal alcalino, cuyo espectro es tan característico y tan simple como el del litio. Nuestro aparato no indica para este metal más que dos rayas, una  $Cs\beta$  azul y débil, que corresponde casi a la del estroncio,  $Sr\delta$ , y otra  $Cs\alpha$ , también azul».

El escenario se encontraba preparado, como vemos, para que intentasen ser los primeros en explotar la posibilidad que acababan de enunciar; esto es, que estaban utilizando un método que «puede conducir al descubrimiento de elementos todavía desconocidos». Lo serían, efectivamente, como explicaban en su segunda memoria (Kirchhoff y Bunsen 1861; 1862, versión castellana). «Tenemos la convicción», explicaban (Kirchhoff y Bunsen 1862: 333-335), «de que este método, que ensancha de un modo tan extraordinario los límites del análisis

químico, podrá conducir a descubrir nuevos elementos desapercibidos hasta ahora por los químicos, bien por hallarse diseminados, bien por su analogía con las sustancias conocidas, bien por razón de lo imperfectos que son nuestros métodos de investigación, que no permiten encontrar entre ellos reacciones características. Desde el primer paso que hemos dado en esta senda, hemos visto realizarse lo que habíamos previsto; en efecto, bien pronto hemos reconocido, además del potasio, del sodio y del litio, la existencia de otros dos metales alcalinos, aunque las sales de estos nuevos elementos producen los mismos precipitados que las del potasio, y que sólo se encuentran en pequeñísima cantidad. En efecto, para obtener un peso de materia que suba sólo a algunos gramos, necesario para nuestros experimentos, hemos necesitado operar sobre 44.200 kilogramos de agua madre del agua mineral de Dürkheim, y sobre 150 kilogramos de lepidolita». Y explicaban el procedimiento que habían seguido:

Cuando en la llama del aparato para la observación del espectro se pone una gota de agua madre procedente del agua mineral de Dürkheim, se reconocen únicamente las rayas características del sodio, del potasio, del litio, del calcio y del estroncio. Si entonces, después de haber precipitado por los procedimientos conocidos la cal, la estronciana y la magnesia, se vuelve a tratar con alcohol el residuo, tratado previamente con ácido nítrico para fijar las bases, se obtiene, cuando se le ha privado en lo posible de la litina por medio del carbonato de amoníaco, un agua madre, que en aparato espectral da las rayas del sodio, del potasio, del litio; y además dos rayas azules notables, muy inmediatas la una a la otra, y una de las cuales coincide casi con la raya  $Sr\delta$ ; pero no habiendo cuerpo simple conocido que en esta parte del espectro dé dos rayas semejantes, se puede deducir, por consiguiente, la existencia segura de un cuerpo simple hasta ahora desconocido, y que corresponde al grupo de los metales alcalinos.

Proponemos dar al nuevo metal el nombre de *cesio* (símbolo Cs), de *caesius*, que entre los antiguos servía para designar el azul de la parte superior del firmamento, cuyo nombre nos parece se justifica por la facilidad con que puede comprobarse con el hermoso color azul de los vapores candescentes de este nuevo cuerpo simple, la presencia de algunas milésimas de miligramo de este elemento mezclado con la sosa, con la litina y con la estronciana.

A continuación describían el camino que los había conducido al descubrimiento del rubidio, Rb, «de *rubidus*, que entre los antiguos servía para designar el rojo más intenso», por el «magnífico color rojo intenso» de dos de las rayas del nuevo metal. Durante los años siguientes otros elementos serían identificados mediante el análisis espectral: el talio (William Crookes [1832-1919], 1861), el indio (Reich y Ritcher, 1863), el helio, detectado por Norman Lockyer (1836-1920) en 1869 en las protuberancias solares, descubrimiento que fue confirmado (1895) en el laboratorio por William Ramsay (1852-1916) y lord Rayleigh (1842-1919), el galio (Paul E. Lecoq de Boisbaudran [1838-1912], 1875), el escandio (Lars F. Nilson [1840-1899], 1879) y el germanio (Clemens A. Winkler [1838-1904], 1886).

Evidentemente, esto no sucede todos los días, ni todos los investigadores tienen oportunidades del estilo de las que se encontraron en 1859-1861 Kirchhoff y Bunsen: desarrollar un método de una potencia inusitada, que condujo a la creación de una nueva ciencia, fundamental, como es la astrofísica, y a encontrar dos nuevos elementos químicos. Sabemos algo de los sentimientos que la investigación en que estaban inmersos suscitaba en ellos, a través de una carta que Bunsen dirigió a Roscoe el 13 de noviembre de 1859 (Roscoe 1904; 1906: 81-82): «En este momento estoy ocupado con una investigación con Kirchhoff que no nos deja dormir. Kirchhoff ha realizado un descubrimiento totalmente inesperado, en tanto que ha encontrado la causa de las líneas oscuras en el espectro solar y puede producir estas líneas artificialmente intensificadas tanto en el espectro solar como en el espectro continuo de una llama, siendo su posición idéntica a la de las líneas de Fraunhofer. En consecuencia, se abre el camino a la determinación de la composición química del Sol y de las estrellas fijas con la misma certidumbre con que podemos detectar cloruro de estroncio, etc., con nuestros reactivos habituales. Mediante este método también se pueden detectar y separar elementos existentes en el Sol con el mismo grado de precisión que se hace con los que hay en la Tierra; por ejemplo: se puede demostrar la presencia de litio en 20 gramos de agua del mar. En la detección de muchos elementos es preferible este método a todos los procesos conocidos previamente. Una mezcla contiene Li, Ka, Na, Ba, Sr y Ca; todo lo que se necesita es llevar un miligramo de esta mezcla a nuestro aparato para, inmediatamente, con la ayuda de un microscopio, descubrir la presencia de todos estos cuerpos mediante una sola observación. Al-

gunas de estas reacciones tienen un grado de delicadeza maravilloso; así, por ejemplo, se puede detectar la 5/1000 parte de un miligramo de litio con la mayor facilidad. Yo mismo he observado la presencia de este cuerpo en casi todos los especímenes de potasio».

El reconocimiento, los honores no tardaron en llegar; eran obligados. Representativo de ese reconocimiento es lo que Jean-Baptiste-André Dumas (1861: 485) escribió (y no olvidemos que se trataba de un francés, y que con no pequeña frecuencia los galos no han sido excesivamente generosos en sus halagos a alemanes): «Los físicos franceses, que han tratado de estos excelentes estudios, pueden sentir no haber dado a la filosofía natural el impulso que ha recibido de la sabia Alemania: pero la ciencia es de todos los países; sus progresos pertenecen a la humanidad entera; y todo el mundo se felicitará en Francia al saber que S. M. el Emperador, cuyo pensamiento comprende todo lo que puede contribuir al adelanto de las ideas como también a la grandeza y a la felicidad del país, acaba de dar [27 de octubre de 1861], en testimonio del interés constante que manifiesta por las ciencias, la condecoración de oficial a Mr. Bunsen, y la Cruz de la Legión de Honor a Mr. Kirchhoff».

### KIRCHHOFF Y LA RADIACIÓN DE UN CUERPO NEGRO

Cualquier texto introductorio de mecánica cuántica, y por supuesto uno que pretenda reconstruir su historia, no deja de señalar el papel que la radiación de un cuerpo negro desempeñó en el descubrimiento realizado por Max Planck en 1900, que puso en marcha la cuantización de la física. Ahora bien, muy pocos de esos mismos textos se detienen en explicar cuándo y por qué surgió la noción de cuerpo negro. Como veremos en la presente sección, su origen está asociado al nombre de Kirchhoff y tiene que ver con los desarrollos que acabo de citar.<sup>3</sup>

El mismo año en que Kirchhoff (1859 a) publicó sus observaciones e ideas sobre las líneas D observadas en el espectro solar que

3. Soy consciente de que la discusión que sigue es un tanto prolija, pero he decidido incluirla con cierto detalle tanto por su extraordinario interés para la historia de la que me ocupo en este libro, como porque ha sido casi universalmente omitida en todas las exposiciones que conozco.

coincidían con las líneas amarillas brillantes emitidas por llamas que contenían sodio, apareció un segundo trabajo suyo en el que se ocupaba de aspectos teóricos que subyacían en el primero.<sup>4</sup> En particular, trataba en él de una propiedad específica de los cuerpos que emitían luz y calor («luz invisible», como llamaba a este último): «El cociente entre la capacidad de emisión y la capacidad de absorción, *e/a*, común a todos los cuerpos», escribía (Kirchhoff 1859 b: 786), «es una función que depende de la longitud de onda [de la radiación emitida o absorbida] y de la temperatura».

Un año después Kirchhoff (1860) publicó un segundo artículo en el que abordaba el mismo problema con mayor detalle, suministrando además una demostración analítica más rigurosa del enunciado anterior. Fue en este trabajo donde, al principio, introdujo la noción de cuerpo negro (estrictamente una ficción, un objeto inalcanzable). «Quiero llamar a semejante cuerpo», fueron sus palabras (Kirchhoff 1860: 277), «cuerpo negro perfecto, o de modo abreviado, negro» («Ich will solche *Körper vollkommen schwarze*, oder kürzer *schwarze neenen*»).

No fue, sin embargo, él quien inventó el concepto de cuerpo negro. En, por ejemplo, la Cuestión 6 de la *Óptica* de Isaac Newton (1704) podemos leer: «¿Acaso la luz no engendra el calor en los cuerpos negros con mayor facilidad que en los de otros colores, debido a que al incidir sobre ellos no se refleja hacia afuera, sino que penetrando en ellos, se refracta y refleja muchas veces en su interior hasta que se absorbe y pierde?». Sí fue Kirchhoff, no obstante, el primero que formuló tal concepto en el sentido técnico preciso que veremos en seguida, y quien lo insertó en un contexto teórico de cuya fecundidad dan testimonio, entre otras ramas de la ciencia, la propia teoría cuántica al igual que la astrofísica. Sin embargo, en lugar de este segundo artículo, a continuación utilizaré otro más breve: el resumen de una conferencia que pronunció en la Sociedad de Historia Natural de Heidelberg, que apareció en el *Philosophical Magazine* (en el número de abril de 1861; [Kirchhoff 1861 b]) gracias a los servicios de Roscoe, quien, como vemos, se convirtió en uno de los principales mensajeros de los resultados obtenidos por Kirchhoff (también, claro, de Bunsen).

4. Es preciso señalar que Kirchhoff no fue el único que se preocupó por estas cuestiones: el británico Balfour Stewart (1828-1887, 1858) también lo hizo.

«Hace unos pocos meses», comenzaba su exposición Kirchoff (1861 b: 241), «comuniqué a la Sociedad ciertas observaciones, que parecían de interés porque dan alguna información sobre la composición de la atmósfera solar y señalan el camino hacia más conocimientos sobre este tema. Estas observaciones conducen a la conclusión de que una llama cuyo espectro consiste de líneas brillantes es parcialmente opaca a rayos de luz del color de estas líneas, mientras que es perfectamente transparente a la luz restante. Esta afirmación explica las líneas oscuras de Fraunhofer en el espectro solar, y justifica la conclusión relativa a la composición de la atmósfera del Sol. El hecho de que una llama sea parcialmente opaca solamente a aquellos rayos que emite fue, como manifesté en su momento, una sorpresa para mí. Desde entonces he llegado, mediante consideraciones teóricas muy simples, a una proposición de la que se deduce inmediatamente la anterior conclusión».

Las «consideraciones teóricas» a las que aludía nos parecen, casi siglo y medio después, más que simples, triviales, pero no lo eran tanto en el contexto en el que Kirchoff se estaba moviendo (más bien, *creando*): «Un cuerpo caliente emite rayos de calor. Lo sentimos claramente cerca de una estufa caliente. La intensidad de los rayos de calor que un cuerpo caliente emite depende de la naturaleza y de la temperatura del cuerpo, pero es en general independiente de la naturaleza de los cuerpos sobre los que caen los rayos. *Sentimos* los rayos de calor solamente en el caso de los cuerpos muy calientes, pero todos los cuerpos los emiten, cualquiera que sea su temperatura, aunque su magnitud disminuye con la de esta. Un cuerpo pierde calor en proporción a lo que radia, y su temperatura debe disminuir salvo que esta pérdida sea compensada. Un cuerpo rodeado por sustancias que se encuentran a su misma temperatura no experimenta un cambio de temperatura. En este caso, la pérdida de calor producida por su propia radiación es compensada exactamente por los rayos que emiten los cuerpos que le rodean, una parte de los cuales absorbe el cuerpo. La cantidad de calor que este cuerpo absorbe en un tiempo dado debe ser igual a la que emite en el mismo intervalo. Esto es válido cualquiera que sea la naturaleza del cuerpo; cuantos más rayos emita un cuerpo, más rayos incidentes debe absorber. La intensidad de los rayos que emite un cuerpo ha sido denominada su *capacidad de radiación o emisión*; y el número que denota la fracción de los rayos incidentes que se absorben, la *capacidad de absorción*.

Cuanto mayor sea la capacidad de emisión de un cuerpo, mayor debe ser su capacidad de absorción». Y añadía en este punto: «Una consideración más estrecha demuestra que la relación entre las capacidades de emisión y de absorción para *una* temperatura es la misma para todos los cuerpos. Esta conclusión ha sido verificada en muchos casos especiales, tanto en los últimos diez años como en épocas anteriores».

Ahora bien, Kirchhoff se daba cuenta de que esta conclusión exigía que «todos los rayos de calor considerados sean de una y de la misma clase», que «no fuesen cualitativamente tan diferentes que una parte de ellos fuese absorbida por los cuerpos más que otra parte, ya que en este caso no podríamos hablar de la capacidad de absorción de un cuerpo, simplemente porque sería diferente para rayos diferentes». Y se sabía que, efectivamente, había diferentes tipos de rayos de calor: los rayos «oscuros y luminosos» (es decir, los de diferentes longitudes de onda), y los rayos polarizados de una u otra forma. Pero a la postre fue capaz de superar esta dificultad: «He encontrado», afirmaba (Kirchhoff 1861 b: 243), «que la proposición relativa al cociente entre el poder de emisión y el de absorción sigue siendo cierta, independientemente de lo diferentes que puedan ser los rayos que emiten los cuerpos, siempre que las nociones de capacidad de emisión y de absorción queden confinadas a *un tipo* de rayo».

Para llegar a este resultado, comenzó «considerando que es posible imaginar cuerpos que, aunque muy delgados, absorben todos los rayos que caen sobre ellos, o cuya capacidad de absorción es igual a 1. Denomino a tales cuerpos *perfectamente negros*, o simplemente *negros*». En primer lugar, investigó la radiación de tales cuerpos negros, llegando a la conclusión «de que la capacidad de emisión del cuerpo negro, considerada con respecto a una longitud de onda dada y a un plano de polarización dado, es independiente de su constitución».

Cuando suponía que el cuerpo no era negro, «sino de cualquier otro color», encontraba que la relación entre emisión y absorción permanece constante para todos los cuerpos; es decir que:

$$E/A = e \tag{1}$$

Una ecuación que, obviamente, se puede escribir como

$$E = A \cdot e \tag{2}$$

o

$$A = E/e \quad (3)$$

En un cuerpo negro  $A = 1$ , y por tanto  $E = e$ , así que según la ley de Kirchhoff que acabamos de enunciar, como el cociente  $E/A$  permanece constante para todos los cuerpos, dos cuerpos negros diferentes también tendrán la misma capacidad de emisión ( $E = E'$ ).

Con tal bagaje teórico, Kirchhoff (1861 b: 246) obtenía varias consecuencias importantes. Una, la segunda, le llevaba de vuelta al tema de partida: «El espectro de todos los cuerpos opacos incandescentes es continuo; no contiene líneas brillantes ni oscuras. Por consiguiente, podemos concluir que el espectro de un cuerpo *negro* incandescente (utilizando el término en el sentido ya definido) debe ser continuo. El espectro de un gas incandescente está formado, al menos casi siempre, de una serie de líneas brillantes separadas entre sí por espacios perfectamente oscuros. Si la capacidad de emisión de tal gas se representa por  $E$ , la relación  $E/e$  posee un valor apreciable para aquellos rayos que corresponden a las líneas brillantes del espectro del gas, pero tiene un valor despreciable para todos los demás rayos. Sin embargo, según la ecuación [(3)] esta relación es igual a la capacidad de absorción del gas incandescente. En consecuencia, se sigue que el espectro de un gas incandescente *será el recíproco* de éste [...], cuando está colocado delante de una fuente de luz de suficiente intensidad, que da un espectro continuo; esto es, las líneas del espectro del gas, que antes eran brillantes, se verán como líneas oscuras en un fondo brillante. Una consecuencia notable de mi proposición que mencionaré es que si la fuente de luz más remota es un cuerpo sólido incandescente, la temperatura de este cuerpo debe ser mayor que la del gas incandescente para que tenga lugar tal conversión».

Y así, podía concluir (Kirchhoff 1861 b: 247): «El Sol está formado por un núcleo luminoso, que podría producir por sí mismo un espectro continuo, y por una atmósfera gaseosa incandescente, que podría producir por sí misma un espectro formado por un inmenso número de líneas brillantes características de las numerosas sustancias que contiene. El espectro solar real es el recíproco de éste. Si fuese posible observar el espectro que pertenece a la atmósfera solar con todas las líneas brillantes que posee, nadie se sorprendería de escuchar que, a partir de la existencia en el espectro solar de las líneas

brillantes características del sodio, potasio e hierro, se hubiese comprobado la presencia de estos cuerpos en la atmósfera del Sol. Sin embargo, según la proposición que acabo de establecer, tampoco puede existir duda de lo cierto de esa afirmación si viésemos el espectro real de la atmósfera solar».

Había sido, en definitiva, capaz de explicar sus observaciones iniciales, observaciones que surgieron del contexto de su colaboración con Bunsen. Y al hacerlo no sólo había introducido la noción de cuerpo negro, en el sentido técnico moderno, sino que había llegado a resultados que contenían elementos —como la «constancia» entre emisión y absorción, es decir, y utilizando otro lenguaje, que existe, como veremos a continuación, una función universal,  $K\lambda(T)$ — sin los que la historia de la creación de la física cuántica habría sido otra, en el supuesto, claro está, de que hubiese sido creada.

### La noción de cuerpo negro

Para clarificar la noción de «cuerpo negro», citaré la explicación que dio Jeremy Bernstein (1991: 21) en uno de sus libros:

Un cuerpo negro se puede construir con un cilindro hueco de paredes delgadas de algún material como el tungsteno. Se calientan las paredes del cilindro haciendo pasar, por ejemplo, una corriente eléctrica por ellas. De las paredes calentadas se produce entonces una radiación, que se recoge dentro del cilindro hueco. Si se hace un agujero pequeño en el cilindro, sale de él suficiente radiación como para poder medir sus características (por cierto, si se mantiene el cilindro a la temperatura ambiente el agujero se ve perfectamente negro desde el exterior, ya que toda radiación que caiga en él queda atrapada dentro del cilindro, de ahí el nombre de «cuerpo negro»). En particular, la radiación de cuerpo negro tiene una distribución característica de longitudes de onda-colores. Sucede que esta distribución solamente depende de la temperatura a la que se calienta el cilindro y no del material del que está hecho el cilindro.