

DAVID JOU

INTRODUCCIÓN AL MUNDO CUÁNTICO

De la danza de las partículas
a las semillas de las galaxias

PASADO & PRESENTE

PASADO & PRESENTE
BARCELONA

ÍNDICE

<i>Prólogo</i>	7
LA EFICACIA DE LA FÍSICA CUÁNTICA:	
PRESENCIAS CUÁNTICAS EN LA VIDA COTIDIANA	
<i>Cinco ideas</i>	13
1. SALTOS DE LUZ	
La primera década: Planck, Einstein, Nernst.	15
2. ÓRBITAS ATÓMICAS	
Los inicios de la física atómica: Bohr, Sommerfeld, Schrödinger	29
3. ENLACES MOLECULARES	
Arquitecturas cuánticas	45
4. FUERZAS NUCLEARES	
Promesas y apocalipsis de la física nuclear.	59
5. PARTÍCULAS ELEMENTALES	
Partículas elementales e interacciones fundamentales .	77
6. LABERINTOS ELECTRÓNICOS	
La revolución electrónica.	99
7. RESONANCIAS MAGNÉTICAS	
Magnetismo cuántico y memorias informáticas. ...	115
8. AVENIDAS FOTÓNICAS	
Óptica cuántica: del láser a la optoelectrónica	127
9. CONDUCTIVIDADES SIN LÍMITE	
Superconductores y superfluidos	139

10. BASES DE LA VIDA	
La física cuántica y la vida	151
LAS PERPLEJIDADES DE LA FÍSICA CUÁNTICA:	
LA SORPRESA DEL MUNDO	
<i>Cinco ideas</i>	163
11. COMPLEMENTARIEDAD	
La dualidad partícula-onda: Bohr	165
12. INDETERMINISMO	
El principio de incertidumbre de Heisenberg	177
13. SUPERPOSICIÓN	
Complejidad cuántica y el gato de Schrödinger	187
14. ENTRELAZAMIENTO	
Las desigualdades de Bell y el enigma del espacio	197
15. COMPUTACIÓN	
Información cuántica: los frutos de una lógica diferente	207
16. HISTORIAS	
La sorpresa del tiempo: Feynman	219
17. VACÍO	
La agitación del vacío cuántico	227
18. GRAVITACIÓN	
Física cuántica y agujeros negros.	237
19. UNIVERSO	
Física cuántica y cosmología	247
20. CONCIENCIA	
Física cuántica, arte y espiritualidad	259
<i>Conclusión: La física cuántica y la estructura del mundo</i>	271
<i>Glosario: Sesenta términos de la física cuántica</i>	279
<i>Bibliografía</i>	297

LA EFICACIA DE LA FÍSICA CUÁNTICA:
PRESENCIAS CUÁNTICAS EN LA VIDA
COTIDIANA

PASADO & PRESENTE

CINCO IDEAS

- 1) Las ondas tienen asociados aspectos corpusculares: intercambian su energía en múltiplos de un cuanto de energía, dado por la constante de Planck multiplicada por la frecuencia de la onda. Las partículas tienen asociados aspectos ondulatorios, caracterizados por una longitud de onda dada por la constante de Planck dividida por la cantidad de movimiento (que es la masa multiplicada por la velocidad). La constante de Planck, pues, juega un papel central en la física cuántica. Si fuera nula, los aspectos cuánticos desaparecerían.
- 2) En los sistemas físicos confinados en un espacio finito la energía, velocidad lineal, velocidad angular, momento magnético y otras magnitudes no pueden tener valores arbitrarios, sino cuantizados.
- 3) Al pasar de un nivel energético a otro, los sistemas emiten —o absorben— un cuanto de radiación, cuya frecuencia característica viene dada por la diferencia de energías dividida por la constante de Planck. Ello ocurre, por ejemplo, con los electrones en los átomos, con los protones y neutrones en los núcleos atómicos, con los electrones y agujeros en los semiconductores, con los imanes en un campo magnético.

- 4) Las ondas asociadas a las diversas partículas de un sistema interfieren entre sí y, a bajas temperaturas, pueden dar al sistema un comportamiento coherente —unísono, organizado, reforzado— de todas sus partes, que anulan su resistencia a los movimientos internos y le proporcionan una conductividad eléctrica o térmica extraordinariamente elevada.

- 5) Los efectos anteriores permiten comprender la estructura de átomos, núcleos atómicos y moléculas y las relaciones entre partículas elementales y son la base de una riquísima tecnología con un alto impacto social: electrónica en general (radios, televisores, ordenadores, teléfonos móviles), láseres, cámaras digitales, células fotoeléctricas, células fotovoltaicas, diodos emisores de luz, superconductores, discos compactos CD, DVD y Blu Ray, fibras ópticas, centrales nucleares, armas nucleares, radioterapia, resonancia magnética nuclear...

SALTOS DE LUZ
 LA PRIMERA DÉCADA:
 PLANCK, EINSTEIN, NERNST

Se puede situar el instante inicial de la física cuántica en el atardecer del domingo siete de octubre de 1900, en Berlín. El matrimonio Planck ha tenido como invitados al matrimonio Rubens. Heinrich Rubens es un experto en radiación infrarroja, y durante la comida se ha hablado, entre otros temas, de algunas medidas recientes de esta radiación. Ello interesa mucho a Planck, que había deducido una expresión de la distribución de energía de la radiación en diferentes longitudes de onda. Durante la comida, se da cuenta de la discrepancia entre los recientes datos de infrarrojos y su teoría. Al atardecer, cuando la visita ya se ha despedido, Planck intuye una solución a dicha discrepancia. Tras unos pocos cálculos obtiene una nueva expresión teórica para la distribución de radiación. Al día siguiente, la compara con los resultados experimentales. El acuerdo es plenamente satisfactorio.

Seguirán las trece semanas más intensas de su vida. En la sesión del 19 de octubre de 1900 de la Sociedad Alemana de Física, Planck presenta su expresión, pero admite no saberla interpretar. A mitades de noviembre intuye la explicación, que presenta a la Sociedad Alemana de Física el 14 de diciembre —fecha oficial del nacimiento de la física cuántica—. Su interpretación, no muy de su agrado conceptualmente pero matemáticamente satisfactoria, es que la radiación no puede ser emitida de forma continua, en cantidades arbitrarias, sino tan solo en múltiplos de una cantidad concreta, dada por el producto de una constante, h , por la frecuen-

cia de la radiación f. A esta cantidad elemental de energía, Planck la denominará «cuanto». Nace así la física cuántica, aunque nadie es capaz, en aquel momento, de intuir su alcance físico ni su impacto intelectual.

La naturaleza física de la luz

Uno de los grandes temas de la física como ciencia matemática de la naturaleza es la constitución y el comportamiento de la luz. Muchos científicos, entre los cuales Newton, supusieron que estaba constituida por partículas diminutas emitidas por los cuerpos luminosos, y que diferentes colores correspondían a partículas de formas diferentes. Una alternativa defendida por físicos como Huygens, era que la luz está constituida por ondas, como el sonido, y que colores diferentes corresponden a longitudes de onda diferentes.

Las dos posibilidades estuvieron abiertas hasta que en 1800 los estudios de Thomas Young sobre la interferencia de la luz concluyeron que la luz está formada por ondas. Pero, ¿por qué tipo de ondas? Hasta 1865 no se supo que la luz es un caso particular de ondas electromagnéticas. Esto es un resultado de los estudios de James Maxwell sobre la unificación de las interacciones eléctrica y magnética en una sola interacción electromagnética, a la cual corresponden unas ondas que se propagan precisamente con la velocidad de la luz.

Pero la luz es solo un caso particular de onda electromagnética, que los ojos pueden captar. Nuestros ojos captan radiación cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 450 nm y 700 nm (nm significa nanómetro, una millonésima de milímetro), gracias a unos pigmentos fotosensibles que hay en la retina. La radiación de 450 nm corresponde al color violeta y la de 700 nm al color rojo. Otros animales captan colores ligeramente diferentes, porque tienen otros pigmentos fotosen-

sibles. La gran mayoría de ondas electromagnéticas nos resultan invisibles: las de longitud de onda mayor que la del color rojo —infrarrojas, microondas, radioondas—, y las de longitud de onda menor que la del color violeta —ultravioleta, rayos X, rayos gamma.

La radiación del cuerpo negro

La emisión de radiación electromagnética por los cuerpos calientes —estrellas, hornos, metales al rojo o al blanco, o incluso nuestro cuerpo— en función de la temperatura es un tema de gran importancia en astrofísica, metalurgia, meteorología, y biofísica. En particular, hacia finales del siglo XIX el desarrollo de la astrofísica y del incipiente alumbrado eléctrico incrementó el interés por la relación entre la radiación electromagnética y la temperatura de los cuerpos que la emiten, en concreto qué cantidad de radiación se emite por unidad de tiempo y de área en función de la temperatura y de la longitud de onda.

Este problema tomó cuerpo teórico en 1859, cuando Gustav Kirchhoff dedujo que la distribución de radiación electromagnética radiada por cualquier cuerpo negro —que absorbe y reemite perfectamente radiación— en función de la longitud de onda es una función universal de la temperatura. Obtener esta función se fue convirtiendo en un reto a medida que la física de la radiación iba avanzando.

En 1879, Jozef Stefan halló que la potencia total irradiada por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta (es decir, contada desde el cero absoluto, que se halla a $-273,15$ grados Celsius). Cinco años después, Ludwig Boltzmann justificó teóricamente este resultado combinando la termodinámica con la teoría electromagnética. Ese éxito fue el estímulo para que el joven Planck dirigiera su

atención a la radiación, de modo que en 1900, cuando llega a su gran resultado, hace ya dieciséis años que trabaja en el tema. El gran problema teórico consiste en que, según la física clásica, la potencia emitida debería crecer sin límite a medida que la longitud de onda disminuye, conduciendo a una potencia total infinita.

En 1893, Wilhelm Wien propone una ley de distribución que supera este inconveniente. En 1899, Max Planck consigue deducir la distribución de Wien. Dicha distribución, satisfactoria para la luz visible, falla en el dominio del infrarrojo lejano. Es este el problema que Planck resuelve entre octubre y diciembre de 1900. Su resultado es la llamada función de distribución de Planck para la intensidad de la radiación en función de la longitud de onda λ , lo más importante, su interpretación en términos de la emisión de radiación en cuantos, es decir, en múltiplos de hf .

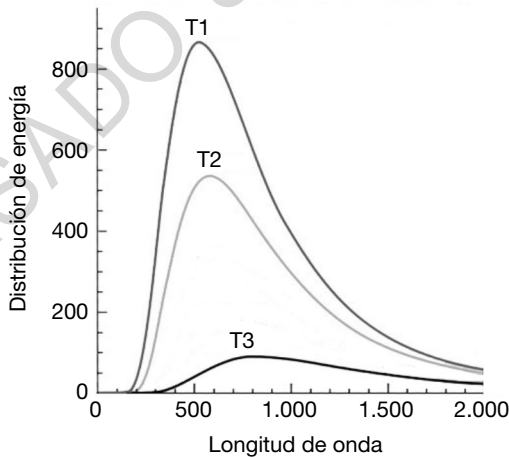


Figura 1.1. Distribución de Planck de la energía de la radiación electromagnética del cuerpo negro en función de la longitud de onda para tres valores de la temperatura ($T_1 > T_2 > T_3$). Obsérvese que para longitudes de onda pequeñas la distribución tiende a cero; en cambio, según la teoría clásica debería tender a infinito.

Física cuántica, estrellas y cambio climático

La ley de Wien afirma que la longitud de onda a la que se emite más radiación es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del emisor. En particular, si la temperatura superficial de una estrella es de seis mil grados centígrados, como en el Sol, la longitud de onda en que más energía emite es de unos 500 nm, y si la temperatura fuera dos veces menor (o mayor), la longitud de onda sería dos veces mayor (o menor, respectivamente). Así pues, las estrellas azuladas (longitud de onda más pequeña) tienen temperaturas más elevadas que las estrellas rojizas (longitud de onda más larga).

Los pigmentos fotosensibles de los ojos, así como la clorofila y otros pigmentos vegetales, son especialmente sensibles a radiaciones cuya longitud de onda es vecina a la más emitida por el Sol. Si nos trasladáramos a las proximidades de una estrella cuya temperatura superficial fuera de unos cuatro mil grados, la radiación más emitida por ella sería de unos 750 nm, y nuestros ojos no serían capaces de verla, ni las plantas de la tierra la absorberían. Algo parecido ocurriría si nos trasladáramos alrededor de una estrella a ocho mil grados, en cuyo caso, la longitud de onda más emitida sería de unos 350 nm. En otras palabras, la física cuántica establece una conexión profunda entre los pigmentos fotosensibles de los seres vivos de un planeta y la temperatura superficial de la estrella respectiva.

Otra consecuencia se da en la meteorología: el hecho de que la radiación emitida por el Sol tenga una longitud de onda predominante de unos 500 nm, que no es absorbida por la atmósfera, permite que la luz del Sol penetre hasta la superficie de la Tierra, donde es absorbida y emitida de nuevo en forma de radiación infrarroja, de unos 10.000 nm, hacia la atmósfera, donde sí es absorbida parcialmente. Ello implica que la parte de la atmósfera cercana a la Tierra se calienta desde abajo, pese a que la fuente de calor, el Sol, está arriba. Que la at-

mósfera se caliente desde abajo supone un factor de inestabilidad —el aire más caliente es menos denso que el aire frío y tiende a subir— y hace que el aire tienda a estar en movimiento, dando lugar a vientos y tempestades.

Otra consecuencia de la ley de Wien es el efecto invernadero, sea en un invernadero de techo de cristal, sea en la misma atmósfera. La idea básica es que la luz que llega, de longitud de onda corta, atraviesa el vidrio o la atmósfera, pero la radiación reemitida por el suelo no puede hacerlo. En concreto, el efecto invernadero terrestre se refiere al calentamiento de la atmósfera si aumenta la concentración de algunos gases como el anhídrido carbónico CO_2 o el metano CH_4 , que absorben radiación infrarroja. En ausencia de esos gases, la radiación infrarroja emitida por la Tierra calentaría ligeramente la atmósfera desde abajo, pero abandonaría con facilidad la atmósfera y sería reemitida al espacio exterior. Así, la potencia total recibida por la Tierra desde el Sol sería reemitida al espacio exterior y la temperatura del planeta se mantendría constante. Ahora bien, moléculas como CO_2 y CH_4 captan buena parte de la radiación emitida por la Tierra, y la vuelven a enviar hacia abajo, de manera que incrementan el calentamiento de la atmósfera. Obviamente, si la concentración de esos gases aumenta, aumentará la temperatura de la atmósfera, con una multitud de efectos sobre el clima terrestre —más sequía en latitudes medias, más fluctuaciones y episodios extremos de frío y calor, de lluvias y vendavales, un descongelamiento de zonas planetarias de latitud elevada, como el Océano Ártico...— cuyas consecuencias para la humanidad son un gran tema de debate científico y social.

Berna 1905: Einstein y el efecto fotoeléctrico

El 12 de marzo de 1905, Albert Einstein, un joven físico empleado en la oficina de patentes de Berna, y que dos días después cum-

plirá veintiséis años, envía a la revista Annalen der Physik un artículo sobre la naturaleza discreta de la radiación electromagnética. Su trabajo pone de manifiesto que, desde el punto de vista termodinámico, la radiación electromagnética puede ser interpretada como un gas de partículas de energía hf . Como ilustración de las consecuencias de este resultado, lo aplica al efecto fotoeléctrico y a dos efectos más (fotoionización y fosforescencia).

A primera vista, ese trabajo parece coincidir con el resultado de Planck, pero en realidad lo amplía considerablemente. Planck solo se refería a los procesos de emisión. Einstein, en cambio, se refiere a emisión, absorción y transmisión de la luz. Por ello, Planck cree que la propuesta de Einstein es precipitada y errónea, y la criticará en varias ocasiones. Sin embargo, será Einstein quien tendrá razón y, dieciséis años más tarde, recibirá el premio Nobel de Física por ese trabajo, una vez sus predicciones hayan sido corroboradas experimentalmente.



Figura 1.2. Max Planck y Albert Einstein, los dos iniciadores de la teoría cuántica, en una fotografía de 1925.