DRAKONTOS

Andrés Cassinello
y José Luis Sánchez Gómez

La realidad cuántica

CRÍTICA

La realidad cuántica

Andrés Cassinello y
José Luis Sánchez Gómez

Ilustraciones realizadas por
Concha Gómez Acebo

CRÍTICA
BARCELONA

001-208 Realidad cuantica.indd 5 06/07/2012 8:26:12

1

La aparición de «ψ» y los saltos cuánticos

En el siglo XVIII Newton había descubierto que la luz blanca se descompone, en un prisma óptico, en todos los colores del arco iris. En la segunda mitad del siglo XIX se descubrió que cuando se hace pasar por un prisma óptico la luz que emite una sustancia que se calienta hasta la incandescencia, aparecen unas rayas de colores. Para cada sustancia se obtienen unos ciertos colores, distintos según la sustancia.

El elemento más sencillo, el hidrógeno, produce en el prisma cuatro rayas, dos de color violeta, una de color azul-verde y otra de color rojo. Estas rayas constituyen el **espectro** del hidrógeno (véase la figura 1.1).[1]

Cada elemento produce un espectro característico. Así decía un químico del siglo XIX: «Ya no será necesario tocar un cuerpo para determinar su naturaleza, bastará verlo». Se puede identificar un elemento por su espectro. De hecho, Kirchhoff y Bunsen consiguieron descubrir así la existencia de elementos desconocidos hasta entonces. E incluso identificaron elementos contenidos en la atmósfera del sol analizando con detalle el espectro de la luz proveniente del mismo. (La astronomía adquiría un nuevo impulso y se convertía en astrofísica: se podía estudiar la composición de los cuerpos celestes sin más que analizar la luz que recibimos de ellos.)

Ahora bien, ¿cómo se producían esas rayas espectrales? ¿Por qué una sustancia emite luz de unos colores y otras de otros distintos?

Hubo que esperar al cambio de siglo para que Bohr, con su modelo atómico, justificase la formación de los espectros.

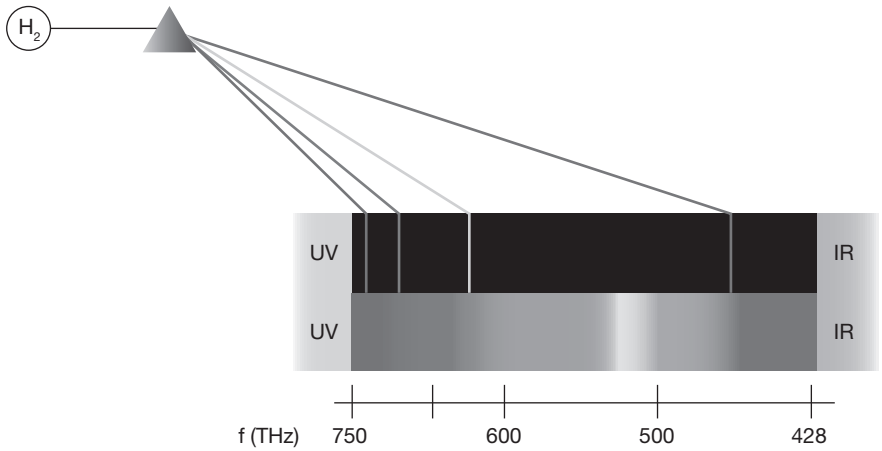


FIGURA 1.1. Representación de las cuatro rayas visibles del espectro del hidrógeno. Se ven, también, las frecuencias que corresponden a estos colores. Esta figura puede verse en color en el pliego.

En 1911 Rutherford descubrió que el átomo estaba formado por un núcleo que contiene prácticamente toda la masa del átomo, y electrones moviéndose a su alrededor. La imagen inevitable era la de un pequeño sistema planetario: los electrones orbitan alrededor del núcleo en diferentes niveles o capas. Cada órbita corresponde a una energía determinada.

En 1913 Bohr postuló que no todas las órbitas eran posibles. Los electrones sólo podían moverse en órbitas con unas determinadas energías dependientes de los números naturales 1, 2 3, ... (véase la figura 1.2). El estado (la órbita) que corresponde a n = 1, el de menor radio, es el de menor energía y recibe el nombre de «fundamental». Los demás (n = 2, 3, ...), de radios y energías mayores, se llaman estados «excitados». Las órbitas quedan así «cuantizadas» (se pueden contar, no forman un continuo). Entonces, cuando un electrón salta de una órbita o nivel energético a otro emite o absorbe luz de una determinada frecuencia (un determinado color) que depende de la magnitud del salto. Concretamente, cuando un electrón pasa del estado «fundamental» a uno «excitado» (de mayor energía) absorbe luz. Si, en cambio, pasa a un estado de menor energía, emite luz (véase la figura 1.2).

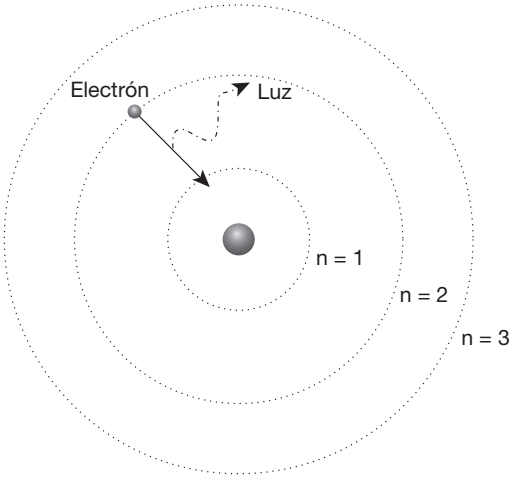


FIGURA 1.2. En el modelo de Bohr, los colores del espectro de un elemento corresponden a la luz emitida cuando los electrones saltan desde órbitas de mayor energía a otras de energía menor.

Lo que sucede, entonces, cuando se calienta un gas es que, debido al choque violento de las moléculas del gas, los electrones de los átomos se excitan: pasan a órbitas más energéticas; y desde ellas saltan a otras de menor energía emitiendo luz. Ésa es la luz que se ve en el espectro. El color (la frecuencia) de esa luz es proporcional a la diferencia de energía de las órbitas implicadas.

Mientras se siga calentando el gas seguirá habiendo choques entre las moléculas y por tanto se mantendrá el espectro de emisión de luz.

El modelo de Bohr encajaba con las observaciones experimentales que, desde 1860, habían recogido los espectros de diferentes tipos de átomos.

El átomo de Bohr explicaba de una manera muy simple los datos anteriores, pero tenía un problema fundamental: era inestable. Según la ciencia física conocida los electrones que giran alrededor del núcleo deberían emitir continuamente radiación [radiación es sencillamente luz pero en un rango de frecuencias más amplio. Para decirlo mejor: la luz es la radiación correspondiente a las frecuencias visibles, las que detecta el ojo humano] y por tanto perder energía hasta caer al núcleo. No se entendía cómo podía mantenerse un sistema así.

La energía de la luz emitida en un salto desde una órbita de energía E_2 más alejada del núcleo, a otra órbita de energía E_1 más cercana al núcleo es proporcional a la diferencia de energías:

$$E = E_2 - E_1$$

Y la frecuencia de esa luz es

$$f = \frac{E}{h}$$

El número por el que hay que multiplicar la frecuencia para convertirla en energía es *h*, la constante introducida por Planck en 1900 en su revolucionaria hipótesis —formulada «como un acto de desesperación»— de que la energía se transfiere en paquetes discretos.

Así, la luz azul, como tiene mayor frecuencia que la roja, también es más energética que ésta.

CUADRO 1.1. Relación entre las energías de dos niveles y la frecuencia de una raya del espectro.

Además no había justificación de por qué los electrones podían girar en determinadas órbitas y no en otras.

En 1925, Heisenberg por un lado, y en 1926, Schrödinger por otro, propusieron una explicación.

La solución de Schrödinger es la que aquí nos interesa. Se apoyaba en una idea que De Broglie había formulado unos años antes (véase la figura 1.3).

La hipótesis de De Broglie era que los electrones (y, en general, todas las partículas) tenían una onda asociada. Siguiendo una convención que se ha mantenido a lo largo de los años, llamaremos **ψ** («psi») a la amplitud de esa onda asociada en cada punto del espacio. Será una función de las coordenadas del punto en cuestión, y del tiempo, ya que irá variando. Recibe el nombre de **función de onda**.

Según De Broglie las órbitas de los electrones alrededor del núcleo se asemejan a las ondas que se crean en una cuerda sujeta por los extremos cuando se la hace vibrar. En el caso de la cuerda sólo son posibles

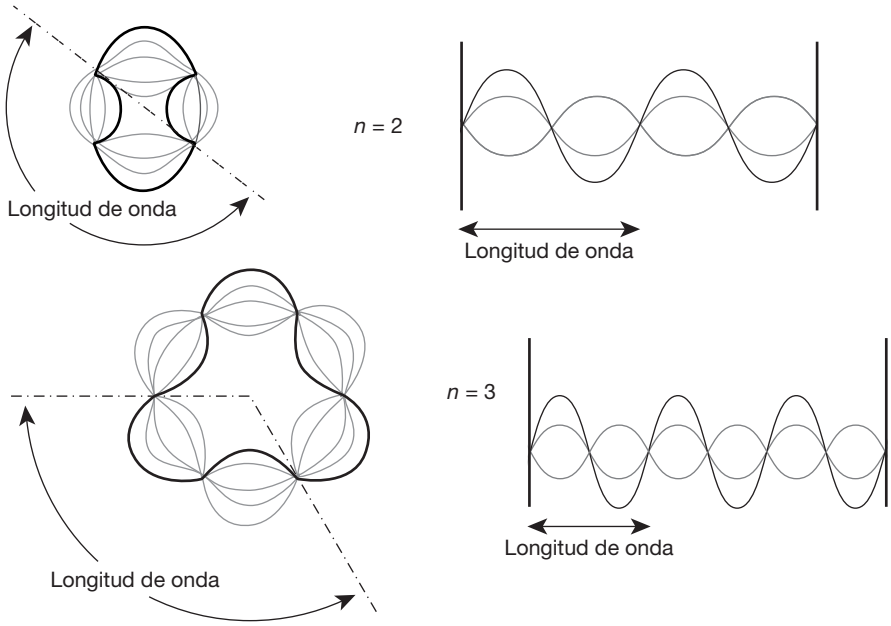


FIGURA 1.3. A la derecha vemos ondas estacionarias creadas en una cuerda agarrada por los extremos, arriba con 2 longitudes de onda, abajo con 3 longitudes de onda. A la izquierda la cuerda forma una circunferencia. Vemos las ondas estacionarias de De Broglie también con 2 y 3 longitudes de onda (arriba y abajo, respectivamente). Corresponden a las órbitas n = 2 y n = 3 de Bohr.

las ondas estacionarias [estacionarias: que no se propagan. Hay puntos de la cuerda que permanecen inmóviles] en las que cabe un número entero de longitudes de onda en la cuerda. (En la figura 1.3 se representan los casos con 2 y con 3 longitudes de onda.) Según De Broglie los electrones tienen una onda asociada y con ellos pasa lo mismo: sólo son posibles las órbitas en las que quepan un número entero de longitudes de onda electrónicas. Eso explica por qué unas órbitas son válidas y otras no. El modelo de Bohr quedaría —por lo menos en parte— justificado.

En realidad el modelo de los electrones girando alrededor del núcleo, o convertidos en ondas estacionarias de De Broglie, no describe la verdadera naturaleza del átomo, pero esas ideas sirvieron de punto de partida para la búsqueda del modelo correcto. Ese modelo requería una teoría que iba a revolucionar la física.

Situémonos por un momento en el otoño de 1925, en Zúrich. Schrödinger era profesor de la Universidad de Zúrich. El departamento de física de esta universidad organizaba, junto con el departamento de física de la más célebre Escuela Politécnica (donde había estudiado Einstein hacía unos cuantos años), un seminario quincenal donde se comunicaban y discutían los artículos más recientes.

El profesor Debye, de la Escuela Politécnica, dirigía el seminario. Entre los participantes se encontraba Felix Bloch, que llegaría a ganar el Premio Nobel en 1952, pero que por entonces era estudiante de la Escuela Politécnica.

Felix Bloch recordaba así aquellos días:[2]

> En una ocasión, al final del *colloquium* oí a Debye que le decía a Schrödinger algo como: «Schrödinger, Ud. no está trabajando ahora en ningún problema muy importante. ¿Por qué no nos cuenta en alguna sesión algo acerca de la tesis de De Broglie, que parece haber atraído cierta atención?».
>
> Así, en uno de los coloquios siguientes, Schrödinger hizo una magnífica exposición de cómo De Broglie asociaba una onda con una partícula y cómo podía obtener las reglas de cuantización de Bohr y Sommerfeld exigiendo que se incluyese un número entero de ondas en una órbita estacionaria. Cuando había finalizado, Debye señaló que pensaba que ese modo de hablar era un tanto infantil. Como estudiante de Sommerfeld había aprendido que, para tratar adecuadamente con ondas, uno debía tener una ecuación de ondas. Sonó bastante evidente y no pareció que hiciese una gran impresión, pero Schrödinger sí reflexionó más tarde sobre esa idea.
>
> Algunas semanas después dio otra conferencia en el *colloquium* y comenzó diciendo: «Mi colega Debye sugirió que se debería tener una ecuación de ondas; bien, yo he encontrado una».
>
> Y entonces nos contó esencialmente lo que iba a ser, con el título «Cuantización como un problema de autovalores», el primer artículo de una serie publicada en *Annalen der Physik.*

Schrödinger publicó ese primer artículo en enero de 1926, y a él siguieron otros tres con los que completó la creación de la nueva teoría: la mecánica cuántica ondulatoria.

Schrödinger había encontrado la ecuación de ondas correcta: al resolver su ecuación salían, sin suposiciones ad hoc como anteriormente, las energías de las órbitas de los electrones. Ya no había que inventarlas como había hecho Bohr; ni que plantear suposiciones forzadas como había hecho De Broglie; ahora las energías salían de una verdadera ecuación. La ecuación de Schrödinger se formulaba con respecto a ψ, la función de onda (recordemos: la amplitud de la onda asociada al electrón). En las soluciones de Schrödinger la función de onda ya no era una línea vibrando, como había supuesto De Broglie, sino algo más parecido a una nube continua que llenaba el espacio que rodea el átomo. Las órbitas de Bohr quedarían como aproximaciones de las soluciones más complejas encontradas por Schrödinger.

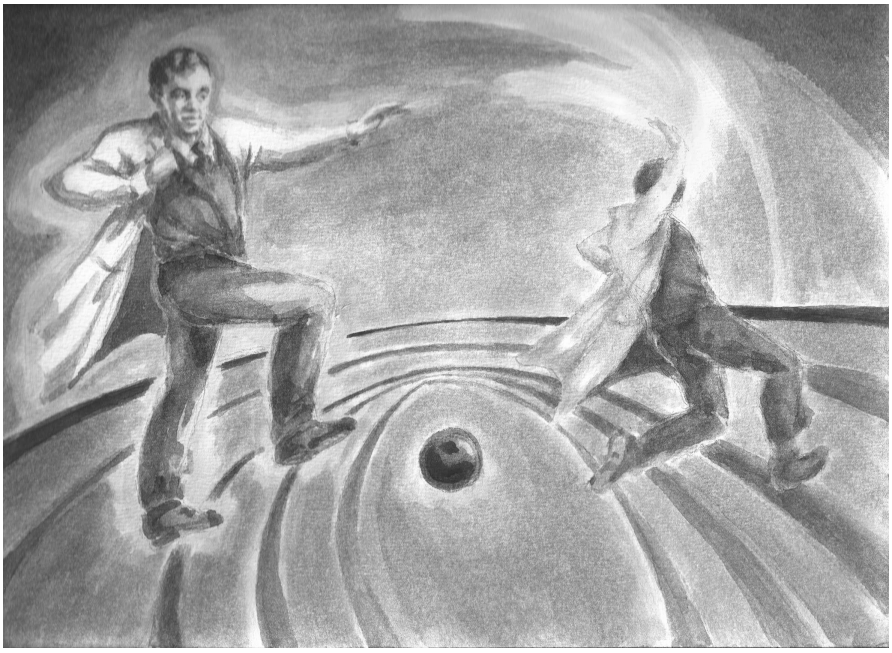


Ilustración 1. Muestra al científico dando garbosos saltos cuánticos. Cuando al saltar se acerca al núcleo emite radiación (figura de la izquierda). Cuando, por el contrario, se aleja del núcleo (figura de la derecha) absorbe radiación. Esta ilustración puede verse en color en el pliego.

Según la interpretación que Schrödinger hizo de inmediato de su propia ecuación, la intensidad de la onda ψ en cada punto expresaba la cantidad de carga electrónica —la «fracción» de electrón, para entendernos— que hay en tal punto. Así, la carga total del electrón se repartiría por el espacio proporcionalmente a la intensidad de ψ. El electrón sería una onda material ψ —o un agregado, un paquete, de ondas materiales—, que llenaría el espacio de forma continua.

Schrödinger podría ahora utilizar su ecuación para explicar algo que siempre le había intrigado: ¿cómo, en el átomo de Bohr, «salta» el electrón de una órbita a otra? No puede ser que desaparezca de una órbita y aparezca en otra. En la naturaleza no hay saltos discontinuos. Habrá alguna manera de describir el cambio de órbita... En definitiva, no se entendía cómo se realizan esos saltos.

Con su ecuación sí se explicaban: las órbitas corresponden a funciones de onda estacionarias. Como esas funciones corresponden a energías distintas pueden generar pulsaciones de un modo semejante a como dos tonos sonoros de frecuencias próximas crean un sonido cuya intensidad aumenta y disminuye con una frecuencia igual a la diferencia de las frecuencias originales. La emisión o absorción de radiación cuando el electrón salta de una órbita a otra correspondería, en su modelo, a la pulsación que crean dos ondas estacionarias de distinta energía. La frecuencia de la radiación emitida o absorbida sería proporcional a la diferencia de las energías de las órbitas implicadas. En definitiva, los saltos cuánticos se explicarían como intercambios de energía entre dos formas de vibración distintas, de manera que habría una transición continua de un estado estacionario a otro.

El caso es que Schrödinger había encontrado un mecanismo que evitaba los incomprensibles saltos cuánticos. Conseguía recuperar una imagen continua de la naturaleza. De hecho, su ecuación tuvo tan buena acogida porque gran parte de los físicos se sentían más cómodos con la imagen continua que proporcionaba su ecuación que con la teoría rival, la de Heisenberg, que partía de elementos discontinuos. (Poco más tarde se vería que las dos teorías, aparentemente tan distintas, eran equivalentes.)

Pero poco duró la satisfacción de Schrödinger. Se puso de manifiesto muy pronto que su interpretación de la función de onda, ψ,

no era válida. No es que la ecuación fuese errónea. Su ecuación era correcta. De hecho, era —y sigue siendo— la herramienta fundamental de todo el edificio cuántico. Los problemas aparecían al pretender que la función de onda, ψ, fuese la representación material, física, del electrón. Uno de los físicos más importantes de la época, Lorentz, le escribía en mayo de 1926:[3]

> Si le he entendido correctamente, entonces una «partícula», un electrón por ejemplo, sería comparable a un paquete de ondas [...].
>
> Pero un paquete de ondas a la larga nunca puede permanecer unido ni confinado a un pequeño volumen. La más pequeña dispersión en el medio lo disgregará en la dirección de propagación, e incluso sin esa dispersión se abrirá más y más en la dirección transversal. Debido a esta inevitable dispersión del paquete de ondas, no me parece que sea muy adecuado para representar cosas a las que queremos adscribir una existencia individual permanente.

Esa dispersión del paquete de ondas haría que, por ejemplo, un electrón libre, es decir, un electrón que ha saltado fuera del átomo, ocupase, según la descripción ondulatoria de Schrödinger, un espacio cada vez mayor al ir pasando el tiempo. El electrón, si la imagen de Schrödinger fuera válida, dejaría de estar confinado en una zona del espacio, lo cual está en contra del comportamiento observado del electrón en múltiples experimentos.

Este y otros problemas no menos importantes —que no podemos tratar aquí— mostraron que no era posible asignar a ψ una realidad material. Aunque su ecuación fuese correcta no lo era su interpretación del electrón como un paquete de ondas físicas reales ni, por tanto, su explicación del salto cuántico. El problema estaba en el corazón de su ecuación de ondas. En una onda hay algo, un sustrato material, que vibra. ¿Qué es lo que vibra en la ecuación de ondas de Schrödinger? Resulta que todos los intentos de asignar a su onda, ψ, una materialidad se mostraban inconsistentes.

Faltaba dar el paso definitivo: liberar a ψ de su carácter material.

El lector no muy versado en matemáticas se preguntará cómo es posible que la ecuación de Schrödinger, que predice con toda precisión los niveles electrónicos del átomo de hidrógeno (las órbitas de Bohr), no especifique, sin embargo, qué es lo que está vibrando.

La explicación es la siguiente:

La ecuación de Schrödinger independiente del tiempo es:

$$\mathbf{H}\psi = E\psi$$

Es una ecuación de valores propios: un operador matemático actúa sobre ψ y tiene que dar un múltiplo del propio ψ. Para que tenga solución, E tiene que tomar ciertos valores reales: son las energías permitidas del átomo de Bohr. Son condiciones para que la ecuación tenga solución, pero no son la solución misma. De ahí que puedan predecirse las energías, condiciones de la solución, a pesar de que no se entiendan bien las propias soluciones ψ.

CUADRO 1.2. En el que se explica cómo, a pesar de que con la ecuación de Schrödinger se obtienen las correctas energías de las órbitas, persisten las dificultades de interpretar ψ.

Cinco meses más tarde de la publicación del artículo de Schrödinger, en junio de 1926, Born lograba una interpretación consistente de ψ, la interpretación que perduraría: ψ expresa la probabilidad de que el electrón se encuentre en un sitio o en otro.

La onda ψ no es el electrón mismo, sólo describe dónde puede estar el electrón.

Los electrones se mueven alrededor del núcleo, pero no cabe asignarles una trayectoria específica. La función de onda ψ sí toma un valor determinado en cada punto del espacio en cada instante, pero el electrón no puede suponerse que esté en una posición concreta en cada momento. Tampoco su carga se reparte por el espacio según la intensidad de ψ. El electrón no es, por tanto, una onda dada por ψ. Ahora bien, ψ expresa lo que sabemos del electrón. ψ incluye toda la información que puede obtenerse, en un instante dado, sobre el electrón. ψ indica dónde puede encontrarse el electrón. Donde ψ tome un valor

más alto, allí será más probable encontrar el electrón; donde ψ sea pequeña, será menos probable que esté el electrón.

Born estableció que la probabilidad de que el electrón ocupase una determinada posición era igual al cuadrado de ψ.[4]

El electrón es una partícula pero su situación se hace fantasmal: sólo podemos conocer la probabilidad de que esté aquí o allá, y esa probabilidad la proporciona una onda, la onda ψ. Ya sabemos en qué consiste la onda ψ: ¡es una onda de probabilidad! (Habrá que dilucidar si detrás de esa afirmación puede establecerse una conexión con una realidad física. Ése será el tema que nos ocupará en el siguiente capítulo.)

De esta manera, cualquier partícula o sistema cuántico (electrón, fotón, etc.) queda descrito por su función de onda ψ y la probabilidad de que esa partícula o ese sistema cuántico se encuentren en un cierto lugar es igual al cuadrado de ψ.

Respecto a los «saltos» de los electrones cuando pasan de un estado energético a otro, la situación seguía sin aclararse.

En octubre de 1926 Schrödinger viajó a Copenhague, invitado por Bohr. Heisenberg cuenta cómo fue el encuentro:[5]

> La discusión entre Bohr y Schrödinger había empezado en la estación de ferrocarril y se prolongaba todos los días desde por la mañana temprano hasta tarde de noche. Como Schrödinger se alojaba en casa de Bohr, no había nada que interrumpiese las conversaciones. [...] Es difícil comunicar lo apasionado de las discusiones, lo profundo de las convicciones de cada uno de ellos. [...]
>
> Schrödinger: Seguro que entiende que la propia idea de los saltos cuánticos lleva necesariamente a un sinsentido. [...] ¿El salto ocurre gradualmente o de golpe? Si es gradual, el electrón también debería cambiar gradualmente su frecuencia orbital y su energía. No se concibe cómo eso puede dar lugar a una raya (*una sola frecuencia*) espectral. Por otro lado, si el salto ocurre de golpe, uno puede obtener el valor de la frecuencia de la luz (*emitida o absorbida*), pero entonces debemos preguntarnos cómo se comporta el electrón durante el salto. ¿Por qué no emite un espectro continuo como la teoría electromagnética requiere? Y ¿qué leyes rigen su movimiento durante el salto? En resumen, la idea misma de los saltos cuánticos es una mera fantasía.

Bohr: Lo que dice es completamente correcto. Pero eso no prueba que no existan los saltos cuánticos. Sólo prueba que no podemos imaginarlos, que los conceptos con los que describimos los sucesos de la vida ordinaria y los experimentos de física clásica son inadecuados para describir los saltos cuánticos. Lo cual no debería sorprendernos mucho ya que los procesos implicados no son objeto de nuestra experiencia directa.

Schrödinger: No quiero entrar en largas disquisiciones sobre la formación de los conceptos; prefiero dejar ese asunto a los filósofos. Sólo quiero saber qué pasa dentro del átomo. No me importa qué lenguaje se utilice para analizarlo. Si hay electrones en el átomo, y si éstos son partículas —como todos pensamos—, entonces se deben mover de alguna forma. [...] Pero del formalismo de la mecánica cuántica por si solo está claro que no podemos esperar respuestas a estas preguntas. Ahora bien, en cuanto cambiamos de imagen y afirmamos que no hay electrones discretos, sino ondas electrónicas u ondas de materia, las cosas son muy distintas. La emisión de luz se explica tan fácilmente como la transmisión de ondas de radio a través de una antena, y así, lo que parecía una contradicción insoluble desaparece de repente.

Bohr: Siento no estar de acuerdo. Las contradicciones no desaparecen; simplemente se desplazan de lugar. Habla de la emisión de luz por el átomo o de modo más general, de la interacción entre el átomo y el campo electromagnético circundante, y piensa que todos los problemas se resuelven una vez asumimos que hay ondas materiales pero no saltos cuánticos. Pero considere sencillamente el caso del equilibrio termodinámico entre el átomo y el campo de radiación —recuerde, por ejemplo, la demostración de Einstein de la fórmula de Planck—. Esta demostración requiere que la energía del átomo debe tomar valores discretos y cambiar en ocasiones de forma discontinua; aquí no nos sirven de ayuda los valores discretos de las frecuencias. ¡No pretenderá en serio arrojar dudas sobre las bases de la teoría cuántica!

[...]

Schrödinger: Si estos malditos saltos cuánticos estuvieran aquí para quedarse, lamentaría mucho haber contribuido a la teoría cuántica.

Schrödinger se negó siempre a aceptar que no hubiera forma de describir los saltos cuánticos. Todavía en 1940, muchos años después

de la consolidación de la mecánica cuántica, publica un artículo titulado: «¿Hay saltos cuánticos?». En él sigue negándose a aceptar unos saltos cuánticos repentinos e indescriptibles. Schrödinger considera que deben explicarse a partir de combinaciones de ondas estacionarias reales: la onda asociada al nivel energético de partida va perdiendo intensidad al tiempo que la onda asociada al nivel energético de llegada va incrementando la suya. Así el salto se describiría como una transición gradual, continua, de una onda estacionaria a la otra.

Veremos en el capítulo 3 cómo esta imagen de Schrödinger, aunque no consiga escudriñar el salto cuántico, como él pretendía, sí será operativa para «controlar» ese salto, el cual, así controlado, se convertirá en una herramienta fundamental para las prodigiosas nuevas aplicaciones de la mecánica cuántica.

Pero antes debemos profundizar en el significado y las características de la función de onda. A esa tarea dedicaremos el siguiente capítulo.

La Viena de Schrödinger

Schrödinger nació en 1887 en la capital del Imperio Austrohúngaro, la «ciudad de los ensueños», el verdadero corazón del Imperio. En la segunda mitad del siglo XIX el emperador Francisco José se había ocupado de extender y embellecer la ciudad: el «anillo central (Ringstrasse)» era una sucesión de suntuosos edificios realizados al gusto de la época imitando la arquitectura barroca, gótica o renacentista.

Este estilo ampuloso era la expresión estética de un convencionalismo moral y un conservadurismo en las costumbres que afectaba también a la vida cultural del Imperio.

El cambio de siglo trajo una renovación de la decadente cultura del Imperio. Fueron muchos los hombres que crearon una nueva cultura en Viena a principios de siglo, entre ellos destacan Sigmund Freud, fundador del psicoanálisis, Arnold Schönberg, que revolucionó la música, Adolf Loos y Otto Wagner, la arquitectura, Ludwig Wittgenstein, la filosofía y Ernst Mach y Ludwig Boltzmann, la física.

Sobre la vida cultural de Viena dicen Janik y Toulmin lo siguiente:[6]

«No le resulta fácil hoy en día, especialmente a un norteamericano joven, hacerse cargo de hasta qué punto eran pequeños y estaban estrechamente vinculados los círculos culturales de la monarquía de los Habsburgo. Estamos acostumbrados actualmente a vivir en una sociedad en la que hay muchos centros culturales diferentes y muchas actitudes culturales diversas. Asimismo, la educación de masas hace difícil concebir un país en el que realmente había sólo una universidad, que, por lo demás, bastaba para contenerla con un solo edificio; del mismo modo se hace difícil en nuestro tiempo comprender exactamente hasta qué punto la céntrica Viena constituía la entera vida cultural del Imperio. [...] En los últimos tiempos de la Viena de los Habsburgo, cualquiera de los líderes culturales de la ciudad podía trabar conocimiento con cualquiera de los otros sin dificultad mayor, y, de hecho, muchos de ellos eran amigos íntimos, pese a trabajar en muy distintos campos del arte, del pensamiento y de los negocios públicos».

Eso explica que a la mayoría de los líderes intelectuales de la ciudad les influyese un personaje peculiar que quizá no ha dejado un abultado catálogo de obras memorables a la posteridad, pero que dedicó toda su energía a la tarea de regenerar las costumbres y la cultura de la sociedad vienesa: Karl Kraus.

Polemista incansable, publicó una revista quincenal, desde 1898 hasta 1939 —hecha muy a menudo completamente por él mismo—, en la que denunció, mediante la sátira, tanto la falta de autenticidad de las convenciones sociales de la burguesía vienesa como las manifestaciones culturales y artísticas de todo signo que fueran pura ornamentación o apariencia, que no vibrasen —según su criterio— con el latido de lo auténtico.

«Para los vieneses nada había que tuviese más importancia que las artes, especialmente la literatura, el teatro y la música; y sus gustos en estas materias reflejaban (desde el punto de vista de Kraus) la duplicidad moral que existía a todo lo largo y ancho de la sociedad. Así pues iba a ser a través de la literatura y la música como pondría al desnudo la hipocresía subyacente a la vida de la Ciudad de los Ensueños.»[7]

La Viena intelectual acudía con entusiasmo a las lecturas semanales de Karl Kraus. Cuenta Elias Canetti que en ellas tanto se podía escuchar a Kraus recitando un drama de Shakespeare o una obra propia,

como haciendo una sátira de las costumbres vienesas o criticando la última inauguración teatral o musical. En todo caso «en sus lecturas atacaba todo lo malo y podrido».[8]

Kraus atacó también la doble moral con que la sociedad contemplaba la prostitución y defendió que la sexualidad —también la de los homosexuales— era una opción personal privada.

Sea como sea, «en ninguna otra ciudad europea el afán de cultura fue tan apasionado como en Viena», dice Stephan Zweig. «Uno no era auténticamente un vienés sin el amor por la cultura, sin ese sentido que le permitía analizar a la vez que gozar de esa superfluidad sacratísima de la vida.»[9]

En los cafés vieneses —son especialmente famosos el «Griensteidl» y el «Central»— se reunían las tertulias literarias y se leían los periódicos, los cuales, de manera destacada, informaban de los espectáculos teatrales y musicales de la ciudad. Nada había más importante para un vienés que lo que sucedía en el Burgtheater (Teatro de la Ciudad) o en la Staatsoper (Ópera de Viena).

A la juventud de la época de Schrödinger le tocó, desde ese heredado interés por la cultura, sustituir los valores decimonónicos por nuevos criterios estéticos y morales: estaban creando el mundo «moderno».

Desde el *gymnasium* hasta la universidad existía un contagio colectivo en el descubrimiento de nuevas tendencias artísticas. No valían los cánones del mundo caduco del Imperio, había que explorar nuevos territorios estéticos.

El *aggiornamento* también afectó a la ciencia. A principios de siglo dos científicos aglutinaban las nuevas corrientes de pensamiento: Mach y Boltzmann. Los dos fueron profesores de la Universidad de Viena.

De especial importancia para la ciencia y la filosofía, no sólo de Austria, sino de todo el mundo occidental, fue la figura de Ernst Mach. Su crítica de la ciencia y la filosofía de la época desde su cátedra de Viena tuvieron una enorme influencia en todos los ámbitos de la cultura.

Mach sostenía que las teorías físicas son descripciones de los datos de los sentidos que simplifican la experiencia, permitiendo por ello al científico anticipar eventos posteriores.

Todo conocimiento se basa en **la sensación** y la física estudia las conexiones de estas sensaciones.

Se trata de desterrar de la ciencia todos los elementos metafísicos, de combatir la tendencia a conferir realidad a abstracciones como «fuerza», «las leyes de la naturaleza», «espacio absoluto» o «tiempo absoluto». Hay que combatir esa tendencia metafísica porque no ayuda más que a crear confusión y engendrar toda suerte de «monstruos conceptuales».

Mach, de hecho, tuvo empeño en explicar cómo, a lo largo de la historia, se habían introducido explicaciones espurias de los fenómenos que trascendían los límites de lo observable. «La ciencia debe sólo describir los datos de los sentidos de la manera más eficaz posible.»

Mach entronca con la tradición filosófica británica del nominalismo y empirismo de Locke y Hume.

Las ideas de Mach influyeron mucho sobre el joven Einstein, quien, en la formulación de la Teoría de la Relatividad Especial (1905), se empeña en utilizar sólo conceptos relacionados con magnitudes mensurables y haciendo siempre hincapié en la forma de medirlas. Sin embargo esa influencia desapareció en gran parte a raíz de la creación de la Relatividad General (1915), y Einstein acabó siendo un decidido defensor del realismo objetivo (como se verá en el capítulo 5).

A las ideas de Mach se contraponen las de Heinrich Hertz, aunque Mach, que no entendió a Hertz, no lo creyese así.

Hertz —siguiendo a su vez a su maestro, Helmholtz— sostiene en su libro *Principios de Mecánica* que los hombres no son meros espectadores pasivos a los que les ocurren las «impresiones» de Hume o las «sensaciones» de Mach; los hombres construyen conscientemente modelos, representaciones, de los fenómenos. Los elementos de estas representaciones no proceden, necesariamente, de la experiencia; más bien se corresponden con «secuencias posibles» de eventos observados. El sistema de ecuaciones de Maxwell, por ejemplo, supone, en sí mismo, un encuadre de la realidad física.

En esta línea de pensamiento se encuadran tanto Planck como Boltzmann. Concretamente, este último defendió las representaciones de Hertz, y escribió, en 1890, en franca oposición a la poca importancia que Mach concedía a la teoría: «Mantengo el punto de vista de que el papel de la teoría es la construcción de una imagen del mundo externo que sólo existe en nosotros mismos, la cual tiene que servir de guía a todos nuestros pensamientos y experimentos».[10] Boltzmann hizo, ade-

más, su particular aportación a la física teórica desarrollando la mecánica estadística, piedra angular de toda la física contemporánea. Mediante ella, estudiando los posibles estados microscópicos de átomos y moléculas, se obtienen los resultados macroscópicos de la termodinámica.

Hay que darse cuenta de que cuando Boltzmann postula su hipótesis no había todavía datos experimentales que mostrasen la existencia física de los átomos. Desde su visión positivista, Mach no podía sino rechazar los átomos porque no se correspondían con experiencias sensibles; y por supuesto, se oponía a todas las consideraciones de la mecánica estadística sobre sus estados posibles.

En cualquier caso, la viva polémica mantenida por estos dos grandes de la física y la epistemología favoreció la capacidad crítica de la comunidad científica y, sin duda, alimentó el interés por la ciencia de los jóvenes. Nada más estimulante para los que empiezan que ver cómo se va creando la ciencia a partir de las discusiones de profesores consagrados. El propio Schrödinger cuenta que cuando llegó a la universidad, en 1906, estaba impaciente por escuchar a Boltzmann. Por desgracia se encontró con que había fallecido —se suicidó poco antes, en septiembre de 1906—. Aun así pudo disfrutar indirectamente de sus enseñanzas a través del que Boltzmann consideraba el mejor de sus discípulos, Fritz Hasenöhrl. Las ideas de Boltzmann impactaron a Schrödinger: «Su mundo de ideas puede decirse que fue mi primer amor en ciencia. Ninguna otra personalidad me ha fascinado de tal manera ni lo hará en el futuro».[11]

Sobre la influencia relativa de estos personajes sobre Schrödinger, es el mismo Schrödinger el que, en su carta a Eddington de 1944, nos dice:

«Como usted sabe, Boltzmann y Mach estaban tan interesados en filosofía, más especialmente en epistemología, como lo estaban en física, de hecho todos sus últimos escritos están impregnados de una visión epistemológica [...] Pero nosotros, llenos de gran admiración por la sincera e incorruptible lucha de ambos en pos de la verdad, no los considerábamos irreconciliables. El ideal de Boltzmann era producir "imágenes" absolutamente claras, casi ingenuamente claras, y detalladas, sobre todo para estar seguros de evitar hipótesis contradictorias. El ideal de Mach era una síntesis cautelosa de hechos observables que podían, si así se deseaba, remontarse hasta la percepción sensorial directa

[...] Sin embargo, nosotros decidimos por nuestra cuenta que eran sólo distintos métodos de ataque y que uno estaba perfectamente legitimado para seguir a uno o a otro a condición de no perder de vista los principios importantes que destacaban más fuertemente sus seguidores respectivos.»[12]

En la formación de Schrödinger tiene gran importancia el ambiente cultural de la Viena en la que creció.

Como buen vienés disfrutó desde muy joven de los espectáculos teatrales. Schrödinger escribía en un cuaderno opiniones y comentarios sobre las obras de teatro a las que asistía.

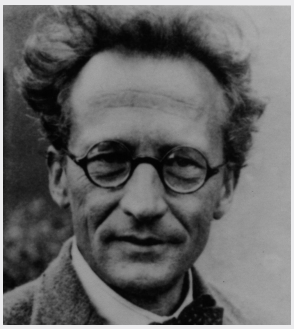
Su educación fue de una amplitud y solidez como sólo podía darse en una ciudad que respiraba cultura por todos sus poros. Sin duda participó también de la corriente de energía crítica y creativa que se expandía en Viena en aquellos años. Estos elementos ayudaron a configurar una personalidad que se interesó por multitud de temas, no sólo por la física —su interés por la filosofía y por la historia, que le acompañaron toda la vida, le llevaron a escribir un librito que todavía hoy utilizan los profesores de filosofía en sus clases: *La naturaleza y los griegos*; y su contribución a las ciencias de la vida se materializó en otro libro influyente: *¿Qué es la vida?*—. El entorno en el que creció le ayudó, además, a gozar de una independencia y libertad de pensamiento, que le permitieron, por un lado, no atender en exceso a las convenciones sociales —en Dublín vivió con su mujer y su amante—, y por otro, tener el arrojo suficiente para romper los moldes de la física clásica.

Breve biografía de Schrödinger

Erwin Schrödinger nació en 1887 en Viena.

Su primer gran maestro fue su padre, hombre de vasta cultura, aficionado a la pintura y estudioso de la botánica. Para Erwin «era un amigo, maestro y compañero de conversaciones interminables».[13]

En la educación secundaria (*gymnasium*), de 1898 a 1906, fue un alumno especialmente brillante y adquirió una sólida formación no sólo en matemáticas y física, sino en latín, griego y cultura clásica. Se interesó especialmente por la filosofía griega.



En la universidad, de 1906 a 1910, apreció sobre todo las enseñanzas de Hasenöhrl, discípulo de Boltzmann.

Pasó un breve periodo como profesor en la misma Viena, antes de la guerra del 14, y otro brevísimo en algunas ciudades alemanas y polacas, después de ella, hasta que se asentó en Zúrich en 1921.

En su lección inagural en la Universidad de Zúrich, en 1922, titulada «¿Qué es una ley natural?», sugirió, siguiendo la estela de Boltzmann, que las leyes de la naturaleza son estadísticas y planteó dudas sobre la causalidad absoluta.

Es en Zúrich donde consigue su máximo logro: la famosa ecuación que lleva su nombre, publicada en 1926.

Un año más tarde le fue ofrecida la cátedra de Berlín y allí permaneció desde 1927 hasta 1933.

No estaba dispuesto a vivir bajo el yugo nazi, por lo que abandonó voluntariamente Alemania en 1933. Es entonces cuando le conceden el Premio Nobel, que compartió con Dirac. (Vuelve a Austria en 1936 por un periodo de casi de 2 años y esta vez sí es depurado por el régimen nazi.)

Se estableció en Dublín en 1939, y allí vivió hasta 1956.

En 1956, poco después de que las potencias aliadas pusieran fin a la ocupación de Austria, volvió a Viena, su amada ciudad natal. Allí murió en 1961.

La vida amorosa de Schrödinger (Una familia especial)

En una época muy convulsa, en la que también se reinventaron las relaciones sexuales, Schrödinger vivió de una manera muy personal sus relaciones amorosas.

A los pocos años de casarse con Annemarie Bertel parece que quedó claro para ambos cónyuges que su relación no excluía pasiones amorosas fuera del matrimonio. Annemarie le escribe en 1936: «Tú

eres uno de quienes me han imbuido que el matrimonio burgués es el fin definitivo del profundo sentimiento de amor, porque la convivencia cotidiana destruye la magia [...] Y puedes creerme, Erwin, no quisiera cambiar esta forma de felicidad por un matrimonio que me permita estar siempre con Peter».[14] («Peter» era el apodo de Hermann Weyl, gran matemático y amigo del matrimonio desde su estancia en Zúrich.)

Schrödinger fue siempre muy enamoradizo, desde su fascinación por la joven Itha Junger, a la que daba clases particulares en 1926, siendo ella una jovencita y él ya bastante mayor, hasta sus amores tardíos en Dublín cuando era casi sexagenario. Pero con quien tuvo una relación más larga —aparte de con su mujer, con la que el sexo parece que no era tan importante— fue con Hilde March, la mujer de su amigo Arthur March, con la que tuvo una hija que nació en 1934. De hecho, en Dublín Schrödinger vivió con Annemarie, Hilde y su hija. Por difícil que pueda parecer la convivencia de esta especial familia, para Schrödinger fue una época feliz: «fue una época muy, muy hermosa. Sin ella

En esta elegante casa vivió Schrödinger a la vuelta de su largo exilio. Está junto a la bellísima «Escalera Strudelhof», construida en el más puro estilo «jugendstill» (modernista) en 1910.

no habría conocido nunca esta isla un tanto apartada y bella, en ningún lugar hubiésemos pasado la horrible guerra nazi de un modo tan placentero que hasta da vergüenza».[15]

Esta familia tan particular duró hasta 1946, año en el que Hilde dejó Dublín con su hija y volvió con Arthur March a Innsbruck.

La convivencia de Schrödinger con su mujer Annemarie se mantuvo a través de todas estas vicisitudes amorosas hasta la muerte de Schrödinger, ya de vuelta en su anhelada ciudad natal, Viena, en 1961.

Poco antes de morir escribe unas notas autobiográficas que comienzan con una melancólica confesión que refleja la importancia que para él tenía la amistad al tiempo que expresa un velado arrepentimiento:

«Durante el último periodo de mi vida he estado separado de mi mejor amigo, del amigo al que más ligado estaba. (Es posible que éste sea el motivo por el cual se me ha reprochado con frecuencia carecer de sentido para la amistad y tenerlo sólo para la aventura amorosa).»