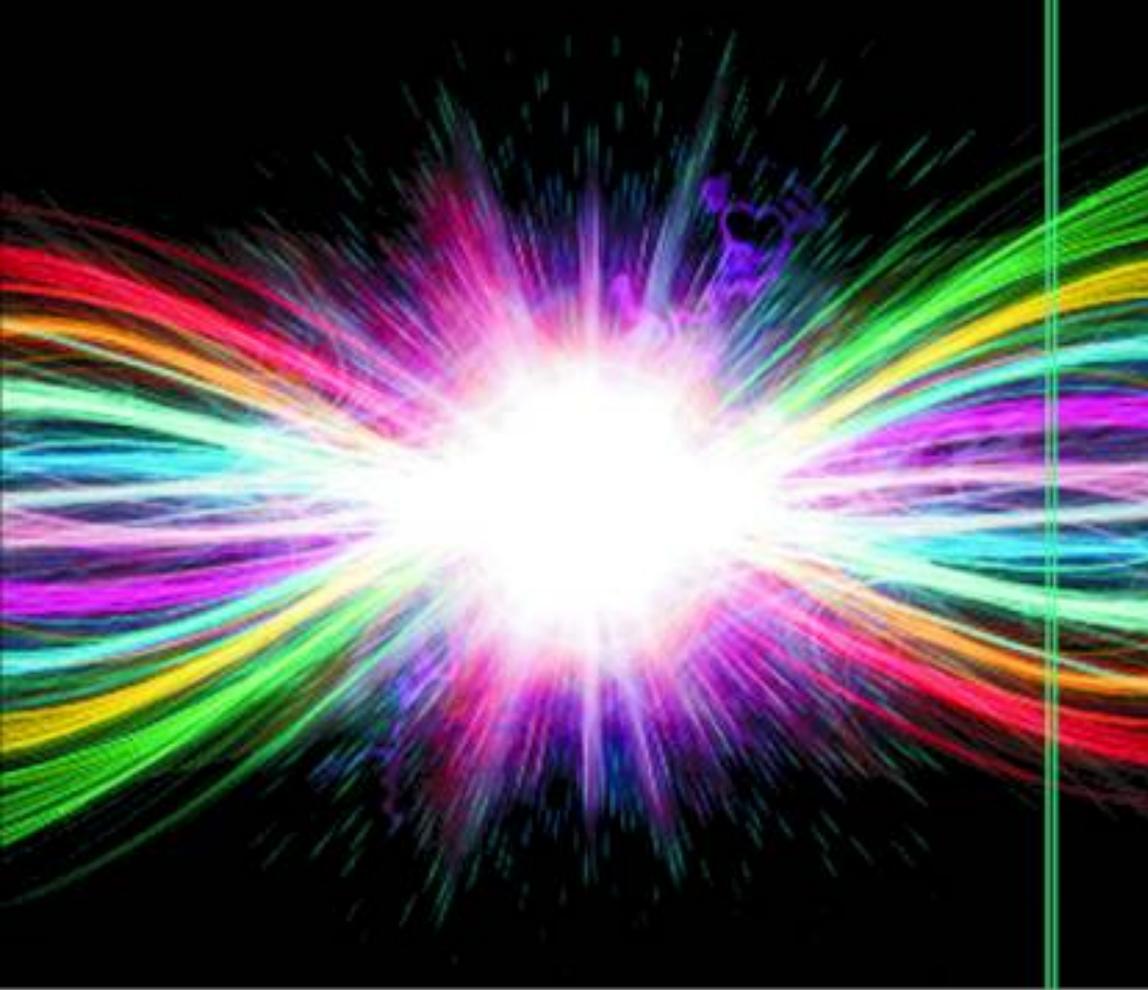


DRAKONTOS

Andrés Cassinello  
y José Luis Sánchez Gómez

# La realidad cuántica

DK



CRÍTICA

## Índice

Portada

Cita

Introducción

1. La aparición de « $\psi$ » y los saltos cuánticos

2. Superposición y colapso

3. Medir

4. Entrelazamiento

5. Desigualdad de Bell

6. La era de la información cuántica

7. Criptografía

8. Breve excursión casi filosófica

9. Universalidad de la teoría cuántica

Apéndices

Notas

Ilustraciones

Créditos

Si tuviera que decir dónde estaban mis auténticas asperezas, diría que allí donde era subyugado por experiencias que no podía explicar. Hasta ahora nadie, ni siquiera yo mismo, ha conseguido liberarme de algo explicándomelo.

ELIAS CANETTI, *La antorcha al oído*, p. 88

## Introducción

Este libro quiere cubrir una laguna: los libros de divulgación de la física al uso se dedican sobre todo a contar anécdotas —casi siempre entretenidas e interesantes, no lo dudamos— o, en todo caso, a la descripción superficial de algunos principios, pero dejan a muchos lectores interesados con un cierto sabor amargo porque ven cómo se aproximan a una materia, pero no la abordan del todo. Tratan temas que parecen atractivos, pero no los explican. El lector sólo adquiere una vaga idea de los asuntos tratados, pero no un conocimiento medianamente preciso o profundo.

Pensamos que con frecuencia se recurre a un libro de divulgación porque no se tiene el bagaje matemático para enfrentarse a libros más técnicos, pero sí se pretende adquirir una idea cabal de los temas y principios expuestos.

En este libro pretendemos explicar los fundamentos de la mecánica cuántica y sus aplicaciones recientes. Hemos buscado un difícil equilibrio: utilizar matemáticas muy básicas, pero no por eso dejar de explicar en toda su profundidad los temas que se tratan. Para ello hemos seleccionado un hilo conductor que resume la esencia cuántica, lo hemos desbrozado del rigor matemático formal sustituyéndolo por ideas intuitivas, le hemos quitado todo lo complementario y hemos buscado los casos sencillos y los experimentos que permiten concentrarse en explicar lo fundamental. Hemos rechazado todo aquello que, aunque importante en mecánica cuántica, nos distrae de ese hilo conductor y que, además, requiere un aparato técnico más complejo. (De ahí que no hablemos, por ejemplo, del espín, magnitud cuántica por excelencia y muy utilizada en otros textos para expli-

car los entresijos cuánticos.) Preferimos concentrarnos en un solo tema, que además se puede presentar de una forma muy intuitiva, la polarización de la luz, y que él nos vaya conduciendo a través del meollo cuántico.

Como decimos, el nivel de matemáticas se ha reducido al mínimo, supliéndolo por imágenes y analogías de manera que sólo se requieren matemáticas elementales para seguir el cuerpo principal del libro. Nos referimos a sumas, productos y potencias de números enteros. También se da la opción de profundizar un poco más con un nivel de matemáticas ligeramente superior. Cuando aparece «coseno de un ángulo», por ejemplo, ponemos una línea quebrada que encierra el material correspondiente para que los lectores versados en tales herramientas matemáticas procedan a su lectura. A lo largo del libro se van sucediendo esos recuadros de línea quebrada, que exigen, por tanto, sólo un nivel medio de matemáticas.

En el Apéndice hemos puesto los desarrollos un poco más laboriosos que aquilatan los detalles del texto. Así los lectores que quieran profundizar algo más o convencerse por sí mismos de algunos extremos, pueden hacerlo.

Tenemos que aclarar desde el principio algo importante: la mecánica cuántica nadie la entiende. Más precisamente, si entender significa tener una imagen clara de cómo funciona el mundo subatómico habrá que aceptar que no lo entendemos. Nuestra pretensión será más humilde. Intentaremos explicar qué se sabe y de qué manera; pero ya advertimos a aquellos que aspiren a leer este libro para encontrar certidumbres: no las hay. Como mucho, podremos abrir puertas para asomarnos a mundos insospechados donde las cosas no son como en el mundo macroscópico; donde se puede estar a caballo entre dos situaciones aparentemente incompatibles; donde lo que uno haga en un sitio puede afectar instantáneamente a objetos que se encuentran lejos; o donde no se puede mirar impunemente porque al mirar se altera lo que uno mira.

Las ideas que aquí se explican son importantes porque modifican nuestra imagen del mundo. Explicarlas puede evitar maximalismos fáciles: tan malo es despreciar la ciencia como creer que la ciencia lo puede todo. Hay gente que piensa que la ciencia ha avanzado tanto que es posible teletransportar individuos (a Mr. Spok, por ejemplo, en *Star Trek*). Pero no se pueden enunciar principios generales sin especificar las situaciones en las que son válidos. La ciencia precisa; no admite afirmaciones generales sin especificar las condiciones de su aplicación. A esa tarea nos dedicaremos a lo largo del libro.

El libro consiste en el desarrollo de un solo tema: la superposición. Ése es el concepto diferencial entre la física clásica y la cuántica. Que una partícula subatómica pueda estar en una situación intermedia, en un estado «suspendido» entre dos estados clásicos —dos posiciones, por ejemplo—, separa radicalmente las leyes cuánticas de las clásicas. Y permite inventar aplicaciones inimaginables para el sentido común, aplicaciones basadas en estados de superposición. Bohr, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, decía que nuestros conceptos, nacidos de una visión macroscópica del mundo para la que es adecuada la física clásica, no permiten aprehender el mundo cuántico. Hay un radical misterio en la mecánica cuántica. Ése será uno de los objetivos del libro: precisar las fronteras de ese misterio.

En el capítulo 1 se cuenta cómo empezó todo, y por dónde se coló, desde el principio, lo incomprensible. Ocurrió cuando Schrödinger, otro de los fundadores, encontró su famosa ecuación. La ecuación tenía un sujeto,  $\psi$ , la función de onda, y ese sujeto era un tanto esquivo. Tan vagaroso era que costó mucho ponerle un traje, y encima el traje tenía una hechura desconocida hasta entonces. Surge la pregunta: ¿en qué contexto sociocultural formula Schrödinger su revolucionaria ecuación? El capítulo se complementa con la descripción del ambiente cultural de la Viena de Schrödinger y de sus circunstancias personales.

En el capítulo 2 se presenta de un modo operacional, a través de experimentos, el protagonista del libro: la superposición, y su antagonista: el colapso. A lo largo del capítulo se analizará la lucha entre estos dos caracteres principales en diferentes situaciones, a cual más intrigante.

Sumergidos ya en las extrañezas cuánticas, intentaremos aclarar, en el capítulo 3, qué significa medir en el desdibujado mundo cuántico, y lo haremos investigando una propiedad de la luz que nos acompañará en el resto del libro: la polarización.

Podremos, entonces, en el capítulo 4, extender la idea de superposición a sistemas de 2 partículas. Así aparecerá el entrelazamiento, una ligazón entre partículas que permanece aunque las partículas se separen grandes distancias y que hace que una partícula «sienta» lo que se le hace a la otra por lejos que esté.

El capítulo 5 delimita la frontera entre el mundo clásico y el cuántico. Las discusiones entre Einstein y Bohr sobre si el mundo es cuántico o no, encuentran, con la esencial aportación de John Bell, el rasero que traduce a hechos las dos visiones, porque descubre, en el entrelazamiento, predicciones experimentales diferenciadas para cada una de ellas. Bell pone, de esta manera, números al misterio y deja que sea la realidad la que dé la razón a una u otra filosofía.

La desigualdad de Bell proporciona, además, un criterio para saber si de verdad un sistema está entrelazado y puede utilizarse para transmitir información con la seguridad de que ningún espía pueda interceptarla. Abre, así, las puertas de la revolución que, en los años noventa del siglo pasado se gestó en el campo de la información. En el capítulo 6 se explica cómo se aprovecharon las extrañezas y anomalías cuánticas para procesar y comunicar la información de una forma totalmente nueva, domando el misterio cuántico para crear aplicaciones imposibles de concebir con las herramientas clásicas: la teleportación, la criptografía cuántica y los ordenadores cuánticos.

El capítulo 7 se centra en la criptografía; primero explica, con un ejemplo, el método de clave pública RSA, que, aunque no sea cuántico, deja también un poco perplejo al profano; a continuación se detalla el procedimiento cuántico, intrínsecamente seguro.

El capítulo 8 quiere poner orden en los descubrimientos de los capítulos precedentes situándolos en un entramado coherente. La dificultad de ese intento hace que el capítulo se titule: «Breve excursión casi filosófica». En este capítulo vuelve a tratarse el problema del colapso, pero esta vez desde la perspectiva más general del problema de la medida, del que es famoso exponente el «gato de Schrödinger». En ese capítulo se muestra cómo la única alternativa a la pragmática interpretación de Copenhague (en su versión moderna, de «la información cuántica») es la de «los muchos universos», defendida mayoritariamente por los cosmólogos, porque encaja mejor en la concepción global del universo.

Por último, el capítulo 9 trasciende las propias fronteras del libro llevando la teoría cuántica al dominio de la Cosmología. La pregunta que nos hacemos es: ¿sigue siendo válida la mecánica cuántica cuando existen campos gravitacionales muy intensos, como los que se dan en los agujeros negros? El caballo de batalla, se verá en ese capítulo, es, otra vez, la información. Será en sus términos en los que se replantee la pregunta anterior. Hasta tal punto parece estar la información permeándolo todo, que el libro concluirá con una pregunta: ¿es la realidad en el fondo —al nivel más profundo— información?

El libro se enriquece con cinco sugerentes ilustraciones artísticas de Concha Gómez Acebo que remachan, a veces con un toque de humor, algunas ideas importantes de la mecánica cuántica. Al parecer, los temas aquí tratados fueron fuente de inspiración para su talento de pintora y alentaron su ingenio e imaginación.

El libro ha contado, desde su gestación, con un lector: Pepe Mañeru. Las frecuentes visitas de uno de los autores (A. C.) al amigo Mañeru, en Jávea, a la dorada tranquilidad de la falda del Montgó (un lugar inmejorable para meditaciones cuánticas), pronto se convirtieron en lecturas críticas de los primeros capítulos del libro. Los consejos de Mañeru no sólo han permitido aclarar explicaciones confusas; por ellos se han reorganizado capítulos enteros dándoles coherencia. Contar desde el principio con un lector crítico ha sido parte esencial del proceso de creación del libro.

Hay además un buen número de personas con quienes a lo largo de los últimos años hemos hablado (y discutido) sobre mecánica cuántica. No nos es posible citar a todas ellas, pero sí deseamos mencionar en particular a Miguel Ferrero, Antonio Gallego y David Salgado, que han sido nuestros frecuentes interlocutores en temas muy afines a los desarrollados aquí.

Agradecemos a Guillermo Cassinello Toscano la ayuda prestada en la confección de muchos de los gráficos de este libro.

## 1

La aparición de « $\Psi$ » 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).<sup>1</sup>

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 adquiriría 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 ( $n = 2, 3, \dots$ ), 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).

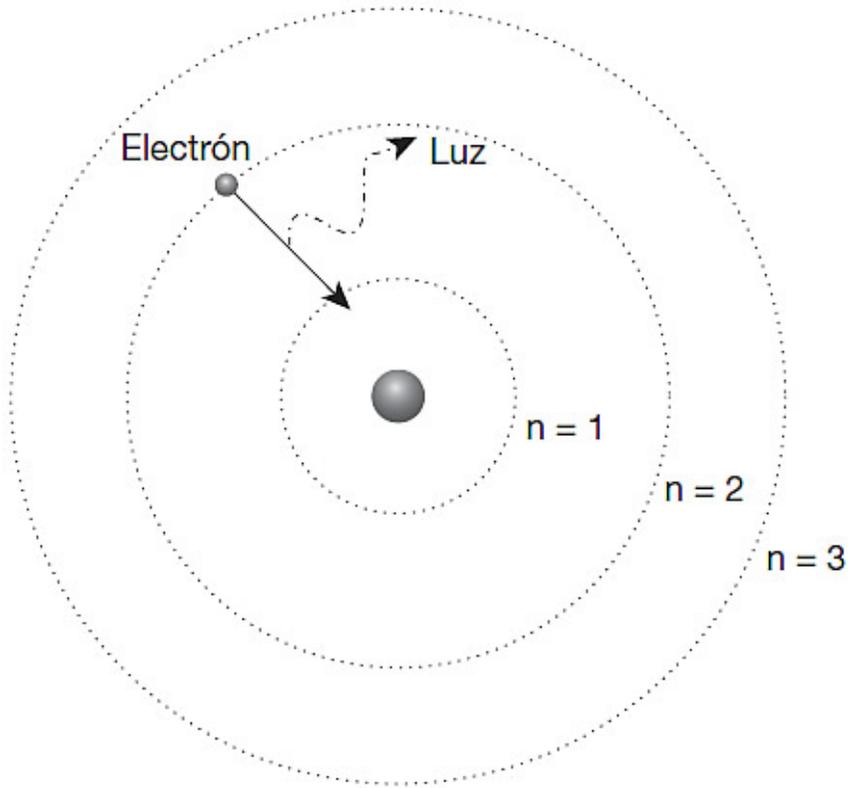


FIGURA 1.2. En el modelo de Bohr, los colores del espectro de un elemento corresponden a la luz emitida cuando los electrones saltan desde órbitas de mayor energía a otras de energía menor.

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  $\Psi$  («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 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.

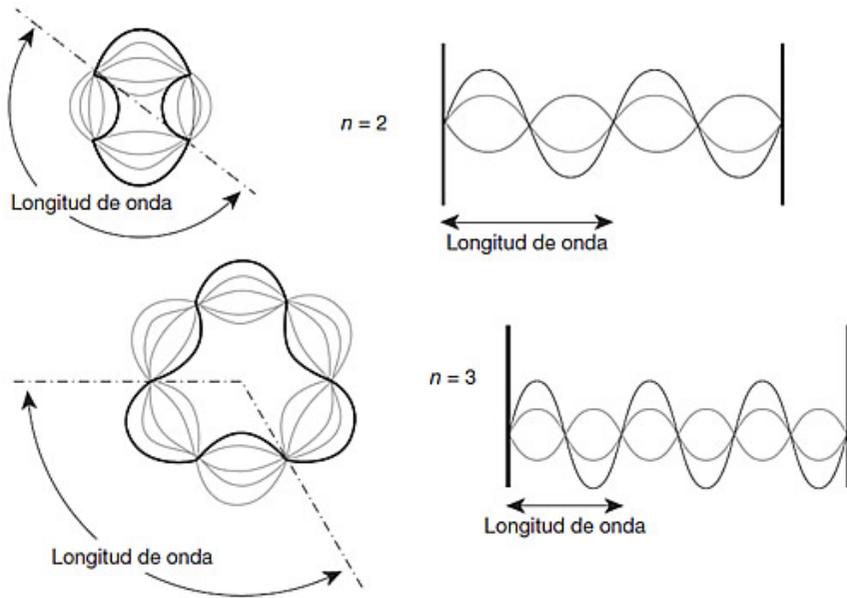


FIGURA 1.3. A la derecha vemos ondas estacionarias creadas en una cuerda agarrada por los extremos, arriba con 2 longitudes de onda, abajo con 3 longitudes de onda.

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.

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.