



# C U Á N T I C A

TU FUTURO EN JUEGO

JOSÉ IGNACIO LATORRE

$\hbar$  *Ariel*

# C U Á N T I C A

TU FUTURO EN JUEGO

JOSÉ IGNACIO LATORRE

*Ariel*

1.ª edición: marzo de 2017

© 2017, José Ignacio Latorre

Derechos exclusivos de edición en español:

© 2017: Editorial Planeta, S. A.

Avda. Diagonal, 662-664 - 08034 Barcelona

Editorial Ariel es un sello editorial de Planeta, S. A.

[www.ariel.es](http://www.ariel.es)

ISBN: 978-84-344-2539-2

Depósito legal: B. 2.373 - 2017

Impreso en España

El papel utilizado para la impresión de este libro  
es cien por cien libre de cloro y está calificado como papel ecológico.

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase 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

# 1

## Las leyes cuánticas

# POSTULADO I

——  $\hbar$  ——

## INFORMACIÓN

El postulado I de la mecánica cuántica establece que la *información* que tenemos sobre un sistema físico viene descrita por un objeto matemático que llamamos *función de onda*.

Podemos predecir, por ejemplo, lo que *hará* un electrón, pero no lo que *es* un electrón en su esencia más íntima. Tampoco sabremos *por qué* existe un electrón. Solo sabremos manipular la información que lo describe.

Parece difícil de comprender. Repitémoslo: la función de onda contiene toda la información que podemos disponer de un sistema. Toda.

Hace falta caminar despacio.

## Humildad

Este primer postulado cuántico no tiene precedente conceptual en la historia de la ciencia.

Fijémonos bien: el postulado NO dice *qué* es un sistema. Por ejemplo, NO dice *qué* es un electrón. Solo dice que podemos usar ecuaciones para describir la *información* que tenemos del electrón. Por ejemplo, podremos describir dónde está el electrón o a qué velocidad se desplaza. Con

las ecuaciones cuánticas seremos capaces de predecir todos los experimentos que hagamos con ese electrón.

La mecánica cuántica es una teoría humilde. Muchas personas pueden sentirse defraudadas. Por favor, no lo hagan. Todos queremos saber el porqué más profundo de las cosas, pero la sabiduría de la especie humana no ha llegado hasta ese punto. La mecánica cuántica no va a aportar las soluciones a nuestras preguntas existenciales. Solo somos personitas nacidas en este primer siglo cuántico que han llegado a comprender muy superficialmente ese mismo mundo cuántico que las contiene.

## **Cómo nos relacionamos con nuestro mundo**

Esta humilde teoría, la mecánica cuántica, habla de lo que percibimos, de lo que experimentamos. Habla de nuestra mirada. De lo que vemos. De lo que medimos. Creo que la mecánica cuántica es una teoría mucho más humana de lo que parece.

Un último envite. Es cierto que la mecánica cuántica no describe qué son las cosas, no explica qué es la realidad última. Solo describe cómo vivimos nuestro universo, cómo nos relacionamos con él, cómo lo conocemos. Es natural que queramos aprehender totalmente la esencia de las cosas. Pero esas ambiciosas preguntas no tienen respuesta en la mecánica cuántica. Si se quiere discutir el último porqué de nuestro universo, la mecánica cuántica no aporta ninguna solución.

## Matemáticas

El postulado I de la mecánica cuántica nos indica el camino *matemático* a seguir.

La función de onda (también llamada *ket* o *estado* en el argot científico) es un objeto matemático bien definido. De hecho, las matemáticas de la función de onda forman parte de nuestra intuición natural. Pensemos en un punto en una hoja de papel. Para definirlo podemos dibujar un origen de coordenadas y trazar una flecha desde el origen hasta el punto. Hemos construido un *vector*. Una flecha en el plano es un vector. Si giramos una flecha, o la desplazamos, tenemos otra flecha, otro vector. Un vector se transforma en otro vector. Todos los vectores posibles forman un ente que denominamos espacio vectorial.

En mecánica cuántica, la función de onda es un vector. El conjunto de los vectores de la mecánica cuántica recibe el nombre de espacio de Hilbert. Es frecuente denotar la función de onda con la letra griega  $\psi$ . Cuando queremos ser mucho más precisos y recordar que la función de onda es un vector utilizamos una notación que sorprende,  $|\psi\rangle$ . Siempre que leemos este tipo de símbolos sabemos que estamos hablando de la información de un estado cuántico. Por ejemplo, podríamos así representar el espín de un electrón, el nivel energético de un átomo o la dirección de circulación de una corriente superconductora. Es también posible tener estados cuánticos con una infinidad de posibilidades. En ese caso los espacios de Hilbert tienen dimensión infinita.

## Superposición de historias

El postulado I da pie a un hecho asombroso: la información de que disponemos sobre un sistema puede ser una *superposición* de varias opciones. La analogía con un vector, una flecha en el plano, es válida. Una flecha puede construirse como suma de dos flechas. De forma similar, la función de onda del sistema puede corresponder a la suma de las funciones de onda de dos opciones.

En mecánica cuántica hablamos de *superposición de historias*. Con estas palabras queremos indicar el hecho de que una función de onda puede comprenderse como suma de dos opciones. La información del sistema es compatible con dos formas de construirlo.

Veamos un ejemplo sorprendente. Lanzamos una partícula contra una pared con dos orificios. La información de que la partícula pase por uno de ellos viene representada por «orificio 1». Si, en cambio, la partícula pasa por el segundo, tendríamos «orificio 2». Pero en el mundo cuántico, si encontramos una partícula del otro lado de la pared, no sabemos qué opción puede haber tomado. Nuestra información es compatible con ambas opciones. Por lo tanto, la función de onda de una partícula del otro lado de la pared es la suma de las dos opciones:

$$\text{«orificio 1»} + \text{«orificio 2»}$$

Es tentador decir que la partícula ha pasado por los dos agujeros a la vez. Pero eso no es acertado. Lo correcto es decir que la información que tenemos sobre el sistema es compatible con las dos posibles historias y, en conse-

cuencia, la función de onda es la suma de todas las historias posibles.

## Interferencia cuántica

Si las historias posibles se suman en la función de onda, ¿es posible que exista una cancelación entre ellas?

¡Sí! Dos historias de cómo una partícula pudo llegar a un punto deben superponerse, y además pueden tener signos opuestos. Cuando eso sucede, la función de onda se anula en ese punto. Eso significa que la partícula nunca puede hallarse ahí. La posible cancelación entre historias, entre las partes de la función de onda, recibe el nombre de *interferencia cuántica*.

Es impresionante ir a un laboratorio de mecánica cuántica y observar un fenómeno de interferencia. Ante nuestros ojos vemos zonas negras en una pantalla que recoge electrones que han podido pasar por dos rendijas. Sus historias interfieren destructivamente. En cambio, en otras zonas su interferencia es constructiva.

La posibilidad de explicar el fenómeno de interferencia en detalle emana del uso de la función de onda como un vector. Las sumas de vectores pueden ser nulas. En mecánica cuántica, la suma de dos alternativas puede cancelarse gracias a que las representamos con vectores.

Siempre que nos planteemos si un sistema es cuántico, podremos intentar hacer aflorar sus propiedades de interferencia. Es su carta de identidad. Si hay interferencias en-

tre historias, estamos frente a un fenómeno genuinamente cuántico.

## **Superposiciones en el espacio**

¿Hasta dónde nos lleva el postulado I, dada la posibilidad que nos ofrece de describir superposiciones? Muy, muy, muy lejos.

¿Podemos crear un estado cuántico descrito por la superposición de que un ser esté vivo y muerto? Tenemos que llegar a esa discusión poco a poco, pero la respuesta anticipada es SÍ.

Empecemos por el caso sencillo de una partícula que pasa por dos agujeros. Podemos tener una partícula en la superposición cuántica de haber pasado por dos agujeros distintos. Esa posibilidad la hemos verificado experimentalmente. Lo interesante es el camino que se ha seguido para lograr repetir el experimento con objetos grandes en lugar de partículas elementales. ¿De verdad puede una gran molécula estar en la superposición de haber pasado por dos rendijas diferentes? Si esa posibilidad es real, deberemos poder medir la interferencia entre las historias posibles.

En 1927 se realizó el primer experimento que confirmaba el fenómeno de interferencia para electrones. Muchos años después, en 1999, se confirmó el primer comportamiento cuántico de grandes moléculas. Es un logro extraordinario. El experimento consiste en el envío de moléculas hechas con 60 átomos de carbono,  $C_{60}$ , contra una

doble rendija. Al detectar las moléculas del otro lado de las rendijas, el estado cuántico se corresponde con la superposición de dos historias: las de haber pasado por cada una de las dos rendijas. La forma de detectarlo fue ver la figura de interferencia que aparece cuando ese fenómeno se da. Posteriormente, se repitió el experimento con moléculas diez veces mayores. El reto ahora es realizar el experimento de la doble rendija con un virus. Un virus es un estado previo a la vida, se reproduce, se relaciona. Un virus puede estar en una superposición cuántica salvaje.

## **Superposiciones atrevidas**

Seamos más atrevidos. En mecánica cuántica, una partícula puede estar en una superposición de estar en un lugar o en otro diferente. El electrón podría estar en una superposición de estar en la Tierra o en la estrella más cercana al Sol, Alfa Centauri:

$$\text{«Tierra»} + \text{«Alfa Centauri»}$$

Sí, es posible tener estados cuánticos con superposiciones inusitadas. Tomemos un haz de partículas de luz —fotones— que pasa por un cristal que permite a cada fotón seguir o ser reflejado en otra dirección. De esta forma podemos lograr que un fotón tenga dos historias posibles. En una, el fotón se puede desviar, seguir un largo camino y luego volver a la fibra óptica de salida. En su otra historia, el fotón salió de forma directa. Al salir del aparato, el fotón se halla en una superposición de sus dos historias posibles. En una, salió de forma directa. En la otra, se desvió y llegó más tarde. A la salida, según la mecánica cuántica,

tica, el fotón se halla en una superposición de llegar «antes» y «después»:

«antes» + «después»

Hemos creado una superposición cuántica en el tiempo.

Puede parecer contraintuitivo el hecho de tener un objeto superpuesto en diferentes tiempos. Pero este principio, con fotones superpuestos en tiempos diferentes, es un elemento básico para enviar mensajes encriptados en uno de los protocolos prácticos de la criptografía cuántica.

La magia cuántica es, hoy en día, tecnología comercial.

## El gato de Schrödinger

Una forma divertida y muy popular de presentar la superposición cuántica lleva el nombre de *paradoja del gato de Schrödinger*. La idea es un poco siniestra y fue propuesta por Erwin Schrödinger en 1935. Un gato es encerrado en una caja donde hay una botella con veneno —para ser precisos, Schrödinger escogió el ácido cianhídrico—. En la caja hay un átomo radioactivo. Si este átomo decae y emite radiación, esa misma radiación dispara un contador Geiger. Este, a su vez, dispara un mecanismo con un martillo que cae sobre la botella, la rompe, esparce el veneno y mata al gato. Si el átomo no decae, todo sigue igual y el gato deambula felizmente por la caja.

En mecánica cuántica tenemos dos estados posibles, dos historias. En una, la información de que el gato está vivo:

«gato vivo». En una segunda historia, la información que tenemos del gato es que está muerto: «gato muerto».

Si encerramos al gato en la caja y no observamos al gato, nuestra información del sistema es compatible con que el gato esté vivo y también con que esté muerto. El estado cuántico es:

$$\text{«gato vivo»} + \text{«gato muerto»}$$

Si empleásemos notación matemática, tendríamos un estado:

$$|\text{gato}\rangle = |\text{vivo}\rangle + |\text{muerto}\rangle$$

No hay contradicción alguna. El gato NO está vivo y muerto a la vez, como a veces se lee en textos divulgativos. El gato no es lo que representamos en mecánica cuántica. Lo que describimos es la información sobre el gato. Esta información es suma de las posibles alternativas.

En una carta que le escribió a Schrödinger en 1950, Einstein alabó la claridad de su experimento imaginario a la hora de poner a prueba nuestra comprensión de la mecánica cuántica.

Hoy en día hemos logrado construir estados que se hallan en superposiciones sorprendentes donde, o bien todos los átomos se hallan en un estado, o bien se hallan en otro. Estos estados son el equivalente del gato de Schrödinger. Las medidas que hacemos sobre estos estados confirman su correcta descripción cuántica, por muy extraña que nos parezca.

## Decoherencia

¿Por qué no vemos los fenómenos cuánticos de interferencia en nuestra vida de cada día? La respuesta es que los seres humanos somos muy grandes. Somos el conjunto de millones de millones de millones de millones de moléculas (sí, lo he repetido cuatro veces). La superposición cuántica de estados tiene propiedades sorprendentes cuando la suma de las partes de la función de onda es muy afinada. Al tener muchas partículas, estas sutiles relaciones se alteran fácilmente. A este efecto lo llamamos *decoherencia*.

Podemos razonar en dirección contraria. Si deseamos observar fenómenos cuánticos, debemos preservar la coherencia cuántica. Nuestros instrumentos deben respetar al máximo las delicadas superposiciones entre todas las historias que forman la función de onda. De ahí que sea tan difícil realizar buenos experimentos.

El tiempo típico en el que una superposición cuántica es destruida por las partículas de su entorno es de una milésima de una millonésima de una millonésima de segundo. Tenemos dos opciones: o bien realizamos experimentos ultrabreves, o bien protegemos a nuestros objetos cuánticos de su entorno. Ese doble camino es el que actualmente seguimos para construir nuevos ordenadores cuánticos.

## Ontología

Amigo filósofo, el postulado I da carta de identidad a la mecánica cuántica en el reino de la filosofía. En la eter-

na separación entre el conocimiento del mundo y su naturaleza última —la pugna entre epistemología y ontología—, la mecánica cuántica solo habla del conocimiento del mundo, no de su esencia.

Grandes filósofos han debatido largamente sobre este tema. También muchos científicos han expresado opiniones contrarias. Hay una corriente de investigación en mecánica cuántica que defiende la llamada función de onda óptica. Esta corriente dice que la función de onda existe *de facto*. No es una triquiñuela matemática que porte la información del sistema. Es real. Sin embargo, esta es una de las discusiones del ágora de la ciudad de Cuántica que no afecta a su comercio con el mundo de las predicciones. Si un médico nos trata un ojo con un láser, el resultado no depende de nuestras disquisiciones por tratar de incorporar la ontología dentro del marco de la mecánica cuántica.

La formulación comúnmente aceptada de la mecánica cuántica recibe el nombre de *interpretación de Copenhague* en honor a la incesante labor del físico danés Niels Bohr para lograr comprender las leyes del mundo microscópico. Según esta interpretación, la mecánica cuántica es una teoría sobre el conocimiento científico del mundo. Podrá no ser la mejor teoría, podrá ser superada, podrá ser una descripción parcial o incompleta de la naturaleza. Pero, a día de hoy, no hay ninguna evidencia que refute la mecánica cuántica. Todas sus predicciones son, de momento, acordes a los experimentos. La mecánica cuántica sí describe todos los fenómenos que observamos. A día de hoy, las ecuaciones cuánticas describen con precisión increíble el resultado de cualquier medida.

Sabemos predecir, pero no comprendemos los porqués más profundos.

## **Física *versus* matemáticas**

¿Es sorprendente que el postulado I nos dicte cómo hemos de representar matemáticamente la información de la realidad? Hay dos respuestas posibles: *sí* y *no*.

*Sí*. Sí es sorprendente que postulemos la representación de la naturaleza a través de la información del sistema y no de la esencia del sistema. Lo dije anteriormente: la mecánica cuántica es una teoría humilde.

*No*. No es sorprendente que postulemos el aparato matemático que necesitamos para formular la teoría. Si no fuera así, jamás estableceríamos la conexión entre lo que observamos y nuestras ecuaciones que lo describen. Esta conexión es indemostrable y, en consecuencia, requiere un axioma. Ese axioma es el postulado I que introducimos al inicio del capítulo.

## **¿Por qué el universo es comprensible?**

No deja de intrigar a todo científico la perfección que logra el lenguaje matemático para describir la naturaleza. En palabras de Albert Einstein:

Lo eternamente incomprensible es la comprensibilidad del mundo.

Otro notable científico, Eugene Wigner, escribió en 1960 un artículo con un título sugerente: *La irrazonable eficacia de las matemáticas en las ciencias naturales*. En ese texto dice:

La enorme utilidad de las matemáticas en las ciencias naturales es algo que linda con lo misterioso, y no hay una explicación racional para ello.

El célebre Erwin Schrödinger se suma al asombro de que el hombre pueda descubrir las leyes que rigen el universo como

... un milagro que seguramente va más allá de la comprensión humana.

No sabemos por qué las matemáticas se adecúan perfectamente a la naturaleza. No entendemos por qué la función de onda es un vector (de un espacio de Hilbert) o por qué obedece a ecuaciones diferenciales. Pero toda esta parafernalia matemática nos sirve para comprender, o al menos experimentar la ilusión de comprender.