

## La teoría cuántica necesita números complejos

Las predicciones de la teoría cuántica estándar no se formalizan bien con los números reales, sino que requieren de números complejos, aquellos que tienen una parte real y otra imaginaria. Investigadores de los institutos ICFO, IQOQI y otros centros europeos lo han demostrado con un experimento teórico.

SINC

16/12/2021 08:00 CEST

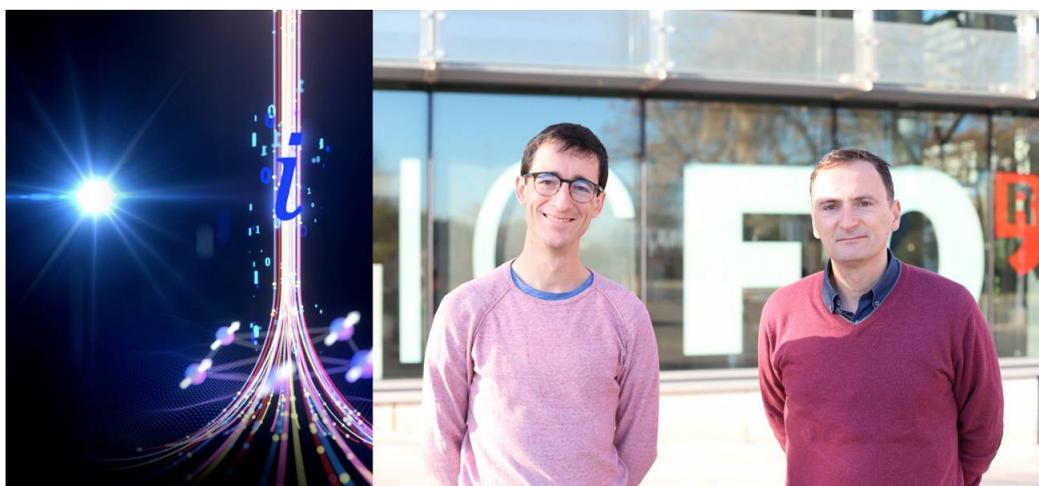


Ilustración artística del estudio sobre física cuántica y números complejos, y dos de los autores del ICFO (Marc Olivier Renou y Antonio Acín). /Georgy Ermakov y Sergey Lebedyanskiy/ICFO

La **física** elabora teorías para describir la naturaleza. Una analogía sería, por ejemplo, un mapa con el que representamos las montañas, caminos, ríos, etc. y que nos ayuda a orientarnos. El mapa no es la montaña, sino que constituye la teoría que usamos para representar la realidad.

De igual forma, las teorías sobre la física se expresan en términos de objetos matemáticos, como ecuaciones, integrales o derivadas. Entre ellas figura la **teoría cuántica**, introducida a principios del siglo XX y la primera formulada en términos de **números complejos**.

Estos números fueron creados por matemáticos hace siglos, y están constituidos por **una parte real y otra imaginaria** (como raíces cuadradas de números negativos). Fue Descartes, el célebre filósofo considerado el padre

de las ciencias racionales, quien acuñó el término “imaginario”, para poder contrastarlo de manera rotunda con lo que él llamó números “reales”.

---

Los autores demuestran que si los postulados cuánticos se expresan en términos de números reales en lugar de números complejos, entonces algunas predicciones sobre las redes cuánticas difieren necesariamente

A pesar de su papel fundamental en las matemáticas, no se esperaba que los números complejos tuvieran un papel similar en la física debido a esta parte imaginaria. De hecho, antes de la teoría cuántica, la **mecánica de Newton o el electromagnetismo de Maxwell** usaban números reales para describir fenómenos como el movimiento de objetos, o cómo se propagan los campos electromagnéticos. En este caso, las teorías ocasionalmente emplean números complejos para simplificar algunos cálculos, pero sus axiomas solo utilizan números reales.

Sin embargo, la teoría cuántica logró desafiar radicalmente el campo debido a que sus postulados estaban contruidos con números complejos. Aunque era muy útil para predecir los resultados de los experimentos como, por ejemplo, una perfecta explicación de los niveles de energía del átomo de hidrógeno, iba en contra de la intuición que favorecía a los números reales.

## El desconcierto de Schrödinger

Buscando una descripción para los electrones, el físico austriaco **Erwin Schrödinger** fue el primero en introducir números complejos en la teoría cuántica a través de su famosa ecuación, pero no podía concebir que estos pudieran ser realmente necesarios en física a ese nivel fundamental. Era como si hubiera encontrado un mapa para representar las montañas, pero este mapa en realidad estaba creado con dibujos abstractos y totalmente anti intuitivos.

Tal fue su desconcierto que en 1926 escribió una carta a su colega H. A. Lorentz en la que decía: “**Lo que es desagradable** aquí, y de hecho, hay que

objetar de manera directa, es el uso de números complejos.  $\Psi$  es sin duda fundamentalmente una función real”.

Décadas después, en 1960, el profesor **E.C.G. Stueckelberg** de la Universidad de Ginebra (Suiza), demostró que todas las predicciones de la teoría cuántica para experimentos de partículas individuales podrían derivarse igualmente utilizando solo números reales. Desde entonces, el consenso fue que los números complejos en la teoría cuántica eran solo una herramienta conveniente.

---

El artículo lleva un título revelador: ‘La teoría cuántica basada en números reales puede ser falsificada experimentalmente’

Sin embargo, investigadores de varios centros europeos, como el **Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)** en España y el Instituto de Óptica Cuántica e Información Cuántica (**IQOQI**) en Austria, publican esta semana un estudio en *Nature* donde demuestran que, si los postulados cuánticos se expresan en términos de números reales en lugar de números complejos, entonces algunas predicciones sobre las **redes cuánticas** necesariamente difieren.

El equipo presenta una propuesta experimental concreta, en la cual incluyen a tres partes conectadas entre sí y dos fuentes de partículas, donde la predicción de la teoría cuántica compleja estándar no puede ser expresada por su contraparte real. De hecho, el artículo lleva un título revelador: *La teoría cuántica basada en números reales puede ser falsificada experimentalmente*.

## Experimento teórico cuántico

Para realizar el experimento teórico, idearon un escenario muy específico de una **red cuántica elemental** que incluía **dos fuentes independientes** (S y R), colocadas entre **tres nodos de medición** (A, B y C). La fuente S emite dos partículas, digamos fotones, uno a A y el segundo a B. Los dos fotones se preparan en un estado entrelazado, como por ejemplo en polarización.

---

El punto clave fue encontrar la forma de medir cuatro fotones en tres nodos para obtener predicciones que no se pueden explicar cuando la teoría cuántica se restringe únicamente a los números reales

Es decir, correlacionaron o prepararon la **polarización de las partículas** de una manera que está permitida por la teoría cuántica (tanto compleja como real), pero no por la teoría clásica. La fuente R hace exactamente lo mismo, emite otros dos fotones preparados en un estado entrelazado y los envía a B y C, respectivamente.

El punto clave de este estudio fue encontrar la forma adecuada de medir estos cuatro fotones en los nodos A, B, C para obtener predicciones que no se pueden explicar cuando la teoría cuántica se restringe únicamente a los números reales.

## Colaboración con China

Como comenta el coautor e investigador del ICFO **Marc-Olivier Renou**, “cuando encontramos este resultado, el desafío era ver si el experimento que habíamos ideado podía realizarse con las tecnologías actuales. Después de discutir con colegas de la **Universidad de Ciencia y Tecnología del Sur en Shenzhen (China)**, encontramos una manera de adaptar nuestro protocolo para hacerlo factible con sus dispositivos de última generación. Y, como era de esperar, ¡los resultados experimentales –publicados en *Physical Review Letters*– coinciden con las predicciones!”.

El estudio de *Nature* puede verse como una generalización del [teorema de Bell](#), que proporciona un experimento cuántico que no puede ser explicado por ningún formalismo local cuántico. El experimento de Bell involucra una fuente cuántica S que emite dos fotones entrelazados, uno a A y el segundo a B, preparados en un estado entrelazado. Aquí, por el contrario, se necesitan dos **fuentes independientes** cuidadosamente diseñadas.

El trabajo también muestra lo excelentes que pueden ser las predicciones

cuando se combina el concepto de una **red cuántica con las ideas de Bell**. Según los autores, las herramientas desarrolladas y utilizadas para obtener este primer resultado permitirán a los físicos lograr una mejor comprensión de la teoría cuántica, y un día desencadenarán la realización y materialización de aplicaciones hasta ahora impensables para el **internet cuántico**.

**Referencia:**

Marc-Olivier Renou et al. "Quantum theory based on real numbers can be experimentally falsified". [Nature](#), 2021

Equipo formado por los investigadores del ICFO Marc-Olivier Renou y el profesor ICREA Antonio Acín, en colaboración con el profesor Nicolas Gisin de la Universidad de Ginebra y el Instituto de Tecnología Schaffhausen (Suiza), Armin Tavakoli de la Universidad de Tecnología de Viena, y David Trillo, Mirjam Weilenmann y Thanh P. Le, dirigidos por el profesor Miguel Navascués del Instituto de Óptica Cuántica e Información Cuántica (IQOQI) en Viena (Austria).

Derechos: **Creative Commons**.

TAGS

FÍSICA CUÁNTICA | NÚMEROS |

**Creative Commons 4.0**

Puedes copiar, difundir y transformar los contenidos de SINC. [Lee las condiciones de nuestra licencia](#)

