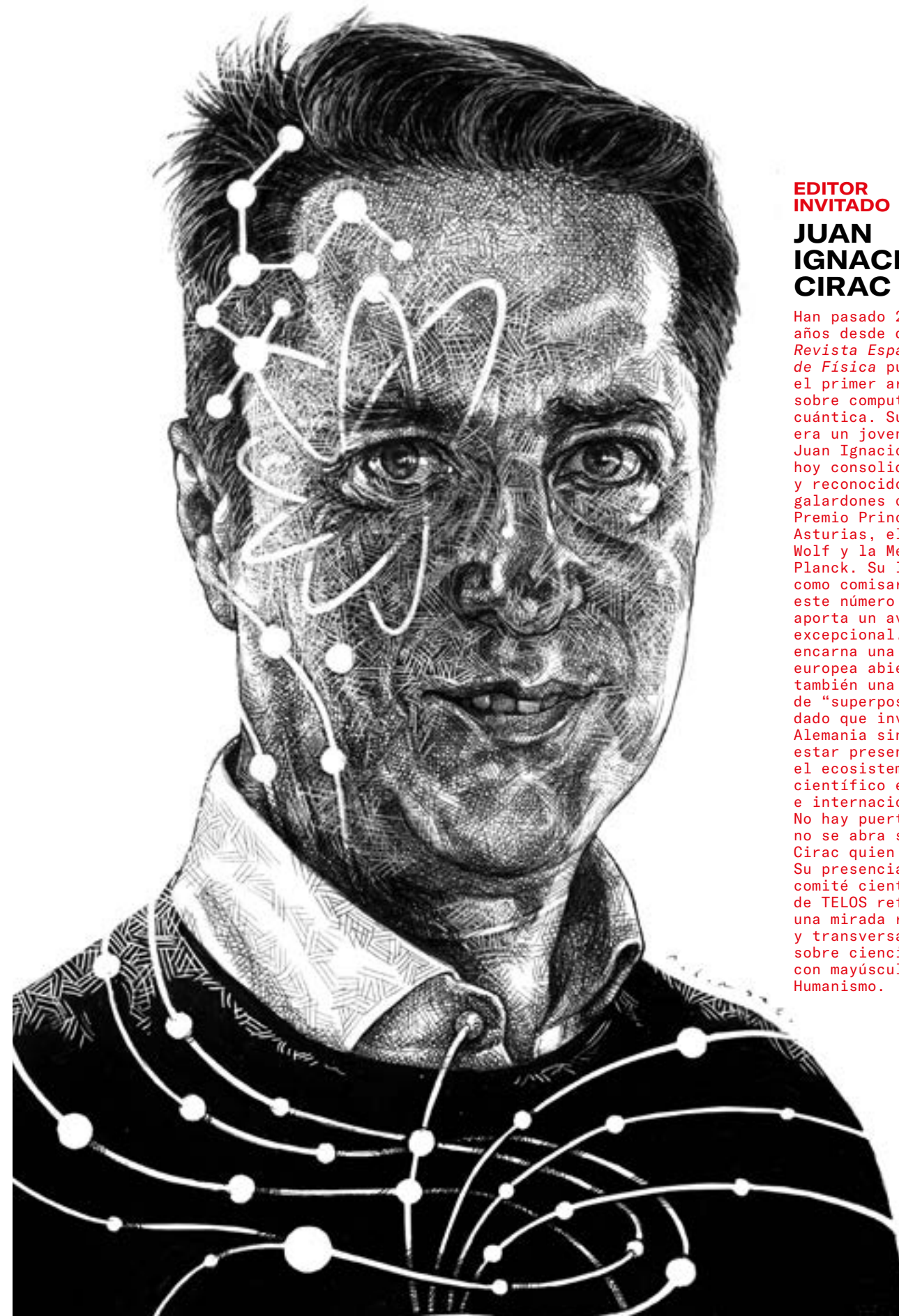


Estamos asistiendo a una auténtica **revolución científica y tecnológica.** En los últimos años hemos comenzado a dominar el mundo microscópico, regido por las leyes de la **física cuántica**, lo que nos permite realizar experimentos y observar fenómenos que hasta hace poco parecían sacados de películas de ciencia ficción. Pero, más allá de poder investigar comportamientos extraordinarios, el verdadero alcance de estos avances es mucho más profundo: **nos abren la puerta a una forma radicalmente distinta de procesar la información.** Esto está generando unas expectativas tan enormes como fascinantes sobre el futuro de las tecnologías de la información y, en particular, de la computación.

ILUSTRACIÓN: JUAN COLOMBATO



EDITOR INVITADO

JUAN IGNACIO CIRAC

Han pasado 26 años desde que la *Revista Española de Física* publicó el primer artículo sobre computación cuántica. Su autor era un joven pionero, Juan Ignacio Cirac, hoy consolidado y reconocido con galardones como el Premio Princesa de Asturias, el Premio Wolf y la Medalla Max Planck. Su liderazgo como comisario de este número de TELOS aporta un aval excepcional. Cirac encarna una ciencia europea abierta, y también una especie de "superposición", dado que investiga en Alemania sin dejar de estar presente en el ecosistema científico español e internacional. No hay puerta que no se abra si es Cirac quien llama. Su presencia en el comité científico de TELOS refuerza una mirada rigurosa y transversal sobre ciencia y, con mayúsculas, Humanismo.

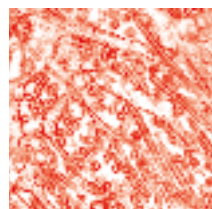


a física cuántica es una teoría con más de 100 años de historia. Nació a comienzos del siglo XX para explicar fenómenos que la física clásica no podía describir y, desde entonces, se ha convertido en uno de los pilares fundamentales de la ciencia moderna. Su ámbito de estudio es el mundo microscópico, un universo que no podemos observar directamente con nuestros sentidos: el mundo de los objetos diminutos como los átomos, los electrones o los fotones. A ese nivel, la realidad se comporta de una manera radicalmente distinta a la que experimentamos en nuestra vida cotidiana. Las leyes que rigen el mundo macroscópico, el de los objetos que podemos ver y tocar, dejan de ser válidas y son sustituidas por reglas que desafían nuestra intuición. Uno de los conceptos más sorprendentes en el universo cuántico es el principio de superposición. Según este principio, una partícula no tiene propiedades bien definidas mientras no es observada. Un átomo, por ejemplo, puede estar en varios lugares a la vez, como si coexistiera en múltiples realidades simultáneamente. Solo cuando alguien lo observa, su posición queda definida a un valor específico y, además, el resultado es puramente aleatorio.

Este universo cuántico resulta profundamente contraintuitivo. En él ocurren fenómenos que no pueden entenderse utilizando las leyes del mundo cotidiano. Durante los primeros años del desarrollo de la física cuántica, estas ideas dieron lugar a numerosas paradojas conceptuales. Los científicos intentaban trasladar estos comportamientos extraños a objetos macroscópicos, lo que generaba situaciones aparentemente absurdas, como la del celebrado gato de Schrödinger. Sin embargo, en aquel momento era imposible comprobar experimentalmente las sorprendentes predicciones de esa teoría, ya que no existía la tecnología necesaria para aislar y observar sistemas tan pequeños como un átomo.

Esta situación cambió radicalmente a partir de la década de 1970. Gracias al avance de varias tecnologías, se comenzaron a desarrollar herramientas capaces de acceder al mundo microscópico. Por primera vez fue posible aislar, ver y controlar uno o varios átomos, fotones o electrones, y realizar experimentos con ellos. Desde entonces, experimento tras experimento han confirmado las predicciones de la física cuántica con una precisión extraordinaria. Hoy en día, no solo podemos observar el mundo cuántico, sino también manipularlo y controlarlo. Somos capaces de preparar sistemas formados por esas partículas, crear superposiciones a voluntad, modificarlas y finalmente medir sus propiedades. En cierto sentido, hemos aprendido a “jugar” con las leyes del universo cuántico. Esto ha abierto la puerta a una nueva generación de tecnologías: las tecnologías cuánticas. Dado que las leyes que rigen el mundo microscópico son distintas de las del mundo macroscópico, estas permiten realizar tareas que serían imposibles con tecnologías tradicionales. Entre estas nuevas posibilidades, una de las más prometedoras se encuentra en el ámbito de la computación.

La computación cuántica no consiste simplemente en hacer más rápidos los ordenadores actuales, sino en cambiar radicalmente la forma en la que se almacena y procesa la información. Mientras que los ordenadores clásicos utilizan bits que solo pueden tomar valores de 0 o 1, los ordenadores cuánticos emplean bits cuánticos o cúbits. Gracias a la superposición, un cúbit puede estar en los



1970

Gracias al avance de varias tecnologías, se comenzaron a desarrollar herramientas capaces de acceder al mundo microscópico. Por primera vez fue posible aislar, ver y controlar uno o varios átomos, fotones o electrones, y realizar experimentos con ellos.

estados 0 y 1 al mismo tiempo. Esto permite almacenar y procesar información de una manera completamente diferente. Manipulando estos cúbits, los ordenadores cuánticos pueden crear y deshacer superposiciones de estados, lo que abre nuevas fronteras en el ámbito de la informática.

A través de estas nuevas leyes, los ordenadores cuánticos pueden resolver ciertos problemas mucho más rápidamente que los ordenadores tradicionales. Existen tareas que, en teoría, podrían resolverse en minutos con un ordenador cuántico, mientras que incluso con un superordenador clásico necesitarían millones de años. Aunque no todos los problemas presentan esta ventaja, ya se han identificado varios sectores en los que la computación cuántica promete avances significativos. Entre ellos destacan la descodificación de mensajes cifrados, la optimización de procesos complejos, el análisis de grandes volúmenes de datos y la simulación de materiales y compuestos químicos. Este último campo es especialmente importante, ya que los sistemas cuánticos (como los compuestos químicos) son extremadamente difíciles de analizar con ordenadores clásicos, pero pueden ser simulados de forma natural con tecnologías cuánticas.

Desde los primeros prototipos de ordenadores cuánticos, construidos a finales del siglo pasado y que apenas contaban con un par de cúbits, el avance ha sido sustancial. Hoy en día ya disponemos de pequeños ordenadores cuánticos con cientos o incluso miles de cúbits, y algunos de ellos han logrado demostrar su enorme potencial. Sin embargo, estas demostraciones se han realizado en problemas de carácter académico, diseñados específicamente para que los ordenadores cuánticos muestren una ventaja extraordinaria frente a los clásicos, pero que no tienen aplicaciones prácticas reales. Por ello, aunque el progreso es innegable, todavía queda un largo camino por recorrer hasta que esta tecnología pueda desplegar todo su potencial en el mundo real.

A pesar de los vertiginosos avances producidos en los últimos años, la computación cuántica todavía se enfrenta a numerosos retos que determinarán su desarrollo en los próximos años. En primer lugar, los ordenadores cuánticos actuales están lejos de ser perfectos. Por un lado, funcionan en condiciones extremadamente exigentes: en muchos casos, necesitan temperaturas cercanas al cero absoluto o entornos completamente aislados del exterior. Esto hace que los cúbits estén sometidos a interacciones incontroladas con su entorno. Además, las operaciones que se hacen sobre los cúbits no son suficientemente precisas. Todo esto se manifiesta en errores en los cálculos que se desean realizar. Para hacer frente a este problema, se están desarrollando protocolos de corrección de errores cuánticos. Estas técnicas permitirán compensar las imperfecciones y operar ordenadores completamente fiables. Sin embargo, implementar estos métodos constituye un desafío enorme, ya que requieren un gran número de cúbits adicionales. ►

“En el futuro, será necesario construir sistemas con millones de cúbits para poder alcanzar todo el potencial de la computación cuántica”

DIEZ HITOS MUY PERSONALES

DE JUAN IGNACIO CIRAC

1

Mi interés por la ciencia nació entre juegos matemáticos y las páginas de los libros de Isaac Asimov. En especial, la saga de la *Fundación* despertó en mí la fascinación por entender cómo podrían funcionar las civilizaciones del futuro.

2

Ese interés se convirtió en pasión cuando descubrí la física cuántica a través de autores como Bernard d'Espagnat, que exploraba sus implicaciones filosóficas, y Alberto Galindo y Pedro Pascual, que mostraban cómo comprenderla y aplicarla con rigor.

3

Recuerdo mi primer viaje a Estados Unidos como un punto de inflexión. En aquel vuelo me hice una promesa clara: aprovechar al máximo la oportunidad de aprender de quienes trabajaban en JILA, uno de los centros más punteros del mundo.

4

Pero mi vida no era solo ciencia. El deporte ocupaba un lugar esencial: fútbol, tenis, baloncesto o taekwondo eran mi forma de desconectar y, al mismo tiempo, de aprender disciplina, esfuerzo y trabajo en equipo.

5

Mi momento "eureka" llegó una noche de otoño de 1994 en Innsbruck, cuando comprendimos que el control del movimiento de los átomos podía ser la clave para construir ordenadores cuánticos.

6

Años después, ver confirmadas aquellas ideas experimentalmente fue una emoción difícil de describir, comparable a la que otras personas sienten cuando recuerdan el gol de Iniesta.

7

A lo largo del camino han llegado reconocimientos que, más allá del honor, me han brindado la oportunidad de conocer a personas extraordinarias como Paul Auster, Bill Gates o Jared Diamond. Al primero le ayudé a aprenderse el protocolo en el Premio Príncipe de Asturias.

8

Uno de los mayores orgullos de mi carrera ha sido ver crecer a jóvenes investigadores con los que he trabajado. Hoy muchos de ellos son líderes mundiales en sus campos.

9

Guardo un especial recuerdo de todos los lugares por los que he pasado: Manresa, la Universidad Complutense, la de Castilla-La Mancha...

10

Si algo ha hecho posible todo esto, ha sido el mayor legado que se puede recibir: una educación sólida y el amor por el conocimiento, valores que han guiado cada paso en mi camino.

Fotografía: Enrique Torralbo.

En el futuro, será necesario construir sistemas con millones de cúbits para poder alcanzar todo el potencial de la computación cuántica.

Esto nos lleva a un segundo reto fundamental: la escalabilidad. Aunque ya se han construido dispositivos con cientos o miles de cúbits, aumentar este número de forma controlada y manteniendo la calidad de las operaciones es muy complicado en las condiciones extremas en las que funcionan. Para poder escalar los dispositivos actuales, será necesario desarrollar nuevas tecnologías y arquitecturas que permitan ampliar los sistemas sin perder estabilidad ni precisión.

Un tercer desafío importante es la definición de las plataformas tecnológicas. Actualmente, existen varias aproximaciones para construir ordenadores cuánticos, y ninguna ha demostrado ser claramente superior en todos

los aspectos. Entre las más avanzadas se encuentran las basadas en superconductores, en iones atrapados y en átomos neutros. Cada una de estas tecnologías tiene ventajas y limitaciones. Algunas pueden alcanzar un gran número de cúbits, pero presentan mayores tasas de error; otras son más precisas, pero más difíciles de escalar. Es posible que algunas de estas plataformas queden estancadas, mientras que otras evolucionen con mayor éxito. También existe la posibilidad de que nuevas tecnologías, hoy todavía emergentes, se conviertan en protagonistas en el futuro de la computación cuántica.

Otro aspecto clave es el desarrollo de aplicaciones. A medida que se construyan ordenadores cuánticos más potentes, irán apareciendo nuevas aplicaciones. La historia de la computación clásica nos ofrece un paralelismo interesante: en sus inicios, apenas se conocían sus posibles usos, pero con

el tiempo se desarrollaron aplicaciones que hoy son esenciales en la industria, la ciencia, e incluso la vida cotidiana. Las nuevas generaciones de ordenadores cuánticos nos permitirán explorar nuevos algoritmos y descubrir casos de uso

que hoy resultan difíciles de imaginar. Se espera que surjan nuevas aplicaciones en ámbitos como la industria, la seguridad, la investigación científica o la inteligencia artificial. En particular, la combinación de computación cuántica e inteligencia artificial podría dar lugar a herramientas completamente nuevas, capaces de abordar problemas complejos de manera más eficiente.

A

demás, la computación cuántica no solo puede ofrecer ventajas en términos de tiempos de ejecución. Dado que funciona de manera distinta a los ordenadores clásicos, también podría permitir un uso más eficiente de los recursos. Por ejemplo, es posible que en ciertos casos un ordenador cuántico no sea más rápido, pero consuma mucha menos energía para realizar una tarea. En un mundo cada vez más dependiente de la capacidad de computación, esta reducción del consumo energético podría tener un impacto muy relevante.

En un mundo cada vez más dependiente de la capacidad de computación, esta reducción del consumo energético podría tener un impacto muy relevante.

A todo esto se suma un factor importante y que hay que tener en cuenta para abordar el futuro de las tecnologías cuánticas: las expectativas. En la actualidad, la computación cuántica está acaparando una enorme inversión, tanto pública como privada. Existe un gran interés por su desarrollo y muchas esperanzas puestas en sus posibilidades. Sin embargo, es probable que algunas de estas expectativas no se cumplan, al menos en el corto plazo. La computación cuántica es un campo complejo que requiere tiempo, investigación y avances tecnológicos sostenidos. No se trata de una revolución inmediata, sino de un proceso gradual. Aun así, esperamos que el camino en la construcción de ordenadores cuánticos mejores y con más cúbits esté repleto de descubrimientos inesperados. A medida que avancemos en la comprensión y el control del mundo cuántico, surgirán nuevas ideas, nuevas tecnologías y aplicaciones que hoy no podemos prever. Como ha ocurrido en otras revoluciones científicas, muchas de las innovaciones más importantes podrían aparecer de forma inesperada.

En definitiva, la computación cuántica representa una de las fronteras más fascinantes de la ciencia y la tecnología actuales. Nos obliga a replantearnos nuestra comprensión del mundo y abre la puerta a posibilidades que hace solo unas décadas parecían pura ciencia ficción. Aunque todavía quedan muchos retos por superar, el potencial de esta tecnología es enorme, y su desarrollo afectará, sin duda, al futuro de nuestra sociedad. ■

“Existe la posibilidad de que nuevas tecnologías, hoy emergentes, se conviertan en protagonistas en el futuro de la computación cuántica”