

Simuladores cuánticos analógicos: Una herramienta para entender la materia que nos rodea

Javier Argüello Luengo y Alejandro González Tudela*

La mecánica cuántica exige grandes recursos computacionales para describir problemas de muchas partículas que interaccionan entre sí. Nuevos dispositivos experimentales, conocidos como simuladores cuánticos, permiten estudiar estos sistemas sin las limitaciones de los métodos de cálculo convencionales.

Numerosos problemas, tanto prácticos como fundamentales, requieren comprender cómo se comportan los electrones que forman un material o participan en una reacción química. Al estar descritos por leyes cuánticas, los métodos numéricos clásicos se encuentran muy limitados para describir su comportamiento. El desarrollo de simuladores cuánticos capaces de reproducir las leyes físicas de estos sistemas ofrecen una alternativa para estudiar estos fenómenos, ayudando con ello a entender la materia que nos rodea.

¿De qué está hecha la materia y cómo surgen sus propiedades?

Entender cómo y de qué está compuesto el mundo que nos rodea —yo incluso nosotros mismos!— ha despertado la curiosidad de filósofos y científicos desde tiempos remotos. Ya en la antigua Grecia, Demócrito, Leucipo y Epicuro postularon que la materia estaba formada por un conjunto de partículas indivisibles (en griego *átomon*) que se diferenciaban entre sí en forma y tamaño, y que se agruparían para formar los distintos materiales que conocemos. Esta hipótesis atomística fue muy avanzada a su tiempo, ya que hubo que esperar hasta finales del siglo XVIII para que se sentaran las bases científicas de la teoría atómica que se ha ido perfeccionando hasta nuestros días a través de experimentación y el desarrollo de nuevas teorías, como la mecánica cuántica.

Hoy en día, sabemos a ciencia cierta que la materia está formada efectivamente por átomos, aunque estos están compuestos a su vez por partículas más elementales: protones y neutrones, que forman el núcleo del átomo, y los electrones, que se encuentran deslocalizados alrededor del mismo. También sabemos que es la configuración de estos electrones, y la interacción entre ellos, lo que determina cómo los átomos se agrupan para formar entidades más complejas, las moléculas, que se unen a su vez para formar la materia tal y como la conocemos. Además, gracias al desarrollo de la mecánica

cuántica, podemos escribir de manera muy precisa las leyes que gobiernan la formación de moléculas y sus propiedades, estudiadas por el campo que se conoce como *química cuántica*. Podría parecer, por tanto, que ya no existen grandes misterios y preguntas abiertas a la hora de descifrar y entender las propiedades de la materia, pero ¿es realmente así?

Como imaginará el lector, si estamos escribiendo este artículo es porque la realidad dista mucho de ser tan simple.

El gran reto de la química cuántica

El problema central de la química cuántica consiste en descubrir cuál es la nueva estructura electrónica de equilibrio cuando varios átomos se juntan para formar una nueva molécula, ya que esta configuración determinará en última instancia sus propiedades. El interés de esta cuestión se expande más allá del mundo académico, ya que estos problemas aparecen de manera recurrente en la industria química, p. ej., para acelerar la búsqueda de nuevos fármacos, o desarrollar mejores fertilizantes. Se trata por tanto de un problema extremadamente importante tanto a nivel teórico como práctico.

¿Cómo se resuelven estos problemas? Como los núcleos de los átomos son mucho más pesados que los electrones, una primera aproximación consiste en asumir que estos están fijos al calcular la estructura electrónica. La formulación del problema es por tanto simple: tenemos que calcular el estado de equilibrio (o estado fundamental) de los electrones teniendo en cuenta su energía cinética, el potencial de Coulomb atractivo generado por los núcleos fijados a una posición y, por supuesto, la interacción de Coulomb repulsiva entre electrones. Sin embargo, su resolución es extremadamente difícil incluso para moléculas de un tamaño moderado.

La complicación principal es que los problemas de muchos cuerpos en mecánica cuántica exigen unos recursos computacionales que aumentan exponencialmente con el número de partículas que queremos describir. Esta *explosión exponencial* de recursos es muchas veces descrita como la *maldición exponencial* de la mecánica cuántica, por las dificultades de cálculo que impone para entender los fe-

* Premio Investigador Novel en Física Teórica 2018. RSEF y FBBVA.

Fig. 1. (a) Arco natural en el parque nacional del Glen Canyon, Utah. (b) Arcos de entrada al Palau Güell, Barcelona. (c) Reconstrucción de la maqueta funicular utilizada por Gaudí para diseñar la cripta de la colonia Güell, expuesta en el museo de la Sagrada Familia, Barcelona [1].



nómenos emergentes en problemas con muchas partículas involucradas. En muchos casos, las correlaciones entre esas partículas son débiles, lo que permite realizar aproximaciones y describirlos eficientemente con métodos numéricos. Desafortunadamente, esto no es fácil en el caso de los problemas de química, ya que las interacciones entre electrones son de largo alcance y generan fuertes correlaciones entre ellos. Es por ello que una de las principales líneas de trabajo dentro de la química cuántica consiste precisamente en encontrar mejores aproximaciones y descripciones efectivas del problema para poder resolverlo numéricamente. A pesar de los increíbles avances teóricos, como la teoría del funcional de la densidad, la resolución de este tipo de problemas es la que más volumen de cálculo ocupa en los superordenadores actuales, siendo uno de los principales cuellos de botella en el desarrollo de muchos procesos industriales relevantes, así como de otras muchas preguntas fundamentales. Nos encontramos por tanto en una situación muy paradójica: conocemos con precisión las leyes que gobiernan estos procesos, pero no podemos predecirlos con las herramientas que tenemos. ¿Podemos hacer algo para evitar esa maldición?

Echando la vista atrás: Simuladores analógicos “clásicos”

Si uno reflexiona, la falta de recursos computacionales para resolver problemas complejos ha sido la norma, y no la excepción, a lo largo de la historia; y eso no ha impedido la realización de grandes avances en la humanidad.

Un ejemplo muy claro de esto es el campo de la arquitectura: ¿acaso los antiguos romanos necesi-

taban ordenadores para calcular la estabilidad de los acueductos que han llegado a nuestros días? ¿O los egipcios para construir sus pirámides?

Para ilustrar mejor los métodos alternativos que se usaban vayámonos a una época más cercana, y pongámonos por un momento en la piel del arquitecto Antoni Gaudí. Siguiendo las corrientes modernistas de su época, para él, la verdadera originalidad consistía en regresar a lo natural. Para ello, deseaba plasmar en su obra la geometría de los arcos que observaba en la naturaleza donde, talladas en la roca por la acción del viento y el agua, únicamente aquellas formas que fuesen estables y funcionales permanecerían en pie para ser observadas (Figura 1(a)). Las buenas propiedades estructurales de estos arcos naturales ya eran conocidas desde hacía tiempo, y es que, traduciendo las presiones estructurales en tensiones, la forma más estable para un arco que soporta su propio peso es la curva descrita por una cadena que cuelga sus extremos, denominada *catenaria*. Siendo la curva más estable y funcional, Gaudí deseaba convertirla en la base de estructuras más complejas (Figura 1(b)). Se planteó así el desafío de diseñar la Cripta de la Colonia Güell de manera que sus columnas, muros y cubiertas siguiesen los principios estructurales de las catenarias. Si bien comprender las leyes que describen un arco catenario es relativamente sencillo, encontrar la configuración más estable para una serie de arcos acoplados entre sí es una tarea ardua, mucho más compleja que lo que la capacidad de cálculo de comienzos del siglo XX permitía.

Como uno comprueba hoy visitando Barcelona, esta limitación computacional no sería un

obstáculo para el ingenio de Gaudí. Su solución: simular aquello que aún no podía calcular. Para ello, exploraría al límite la conexión entre el arco catenario y una cuerda que cuelga de sus extremos. Asistido por sus ayudantes, levantaría una maqueta invertida donde cientos de cordeles simulaban los arcos y columnas de su construcción, y pequeños saquitos llenos de perdigones representaban las cargas estructurales que el edificio debía soportar (Figura 1(c)). Al estar sometida a la misma configuración de fuerzas que la construcción final, Gaudí podía trasladar las formas de esta maqueta directamente al plano, sin necesidad de realizar ningún cálculo intermedio. Había encontrado un simulador mecánico para su problema mecánico, con lo que la naturaleza que tanto admiraba le proporcionaba directamente una solución a su problema estructural. Esta es la belleza y la fortaleza de la simulación “analógica”.

Simulación analógica de problemas cuánticos
 Sabiendo del éxito que esta estrategia ofreció a Gaudí y otros tantos arquitectos, ¿por qué no buscar también nosotros simuladores para nuestros problemas cuánticos? Esta es una idea que ha rondado la cabeza de varias generaciones de físicos. En una conferencia pronunciada en Caltech en 1981 [2], Richard Feynman postuló que, si fuera posible diseñar un sistema cuántico que *simulara* las interacciones del problema de muchos cuerpos que uno quiere estudiar, los recursos computacionales, tales como su tamaño o tiempo de cálculo, no explotarían exponencialmente. Esta intuición fue formalizada por Seth Lloyd en 1996, cuando demostró que era posible construir un simulador cuántico universal para resolver eficientemente problemas de muchos cuerpos [3]. El funcionamiento del simulador que propuso es parecido al de un ordenador: se divide el tiempo de ejecución en intervalos cortos, durante los que se ejecutan sucesivamente puertas lógicas entre bits (cuánticos) hasta conseguir simular el proceso deseado. Por este motivo se conoce a este tipo de sistemas como *simuladores cuánticos digitales* u *ordenadores cuánticos*. Gracias a los grandes avances tecnológicos en el campo, se ha conseguido ya construir los primeros prototipos que demuestran su funcionamiento, incluso para el estudio de problemas químicos [4]. Sin embargo, la principal limitación de estos simuladores cuánticos digitales es que, si no se dispone de protocolos de corrección de errores —y estos no estarán disponibles en un futuro cercano—, los errores se van acumulando en la simulación, restringiendo mucho la capacidad actual de cálculo de los mismos [5]. Llegados a este punto, la pregunta lógica es: ¿qué podemos hacer mientras llegan estos ordenadores cuánticos?

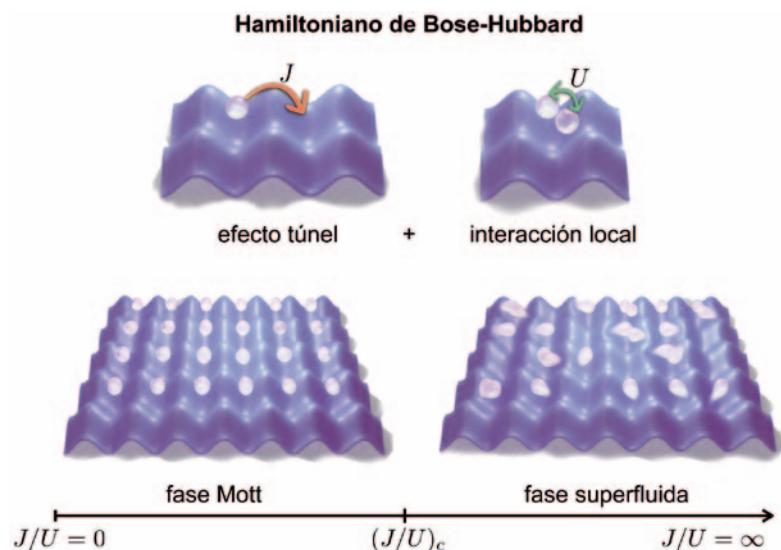
Recogiendo el espíritu de Gaudí, una idea sería intentar construir “maquetas” analógicas en las

que simular el problema de manera global y simultánea, en lugar de romperlo en piezas y ejecutarlo de manera digital. Estas “maquetas” cuánticas es lo que se conoce como *simuladores cuánticos analógicos*. A diferencia de sus equivalentes digitales, suelen estar diseñados para resolver sólo un tipo de problema, p.ej., química o transporte electrónico. Sin embargo, gracias a eso, son mucho más resilientes al ruido, permitiendo obtener resultados impresionantes ya con la tecnología actual. Esto les ha llevado a convertirse en una de las áreas más activas dentro del campo de las tecnologías cuánticas. En los siguientes párrafos explicaremos al lector cómo se construyen estas “maquetas” en el mundo cuántico, tomando como ejemplo la plataforma con la que nació el campo: átomos fríos atrapados en redes ópticas.

Simulación cuántica analógica con átomos fríos en redes ópticas

A finales del siglo xx se produjeron grandes avances en el control cuántico de los sistemas atómicos. Por un lado, se desarrollaron técnicas para enfriar y atrapar átomos usando láseres (Premio Nobel 1997 a Chu, Philips y Cohen-Tannoudji). La idea consistía en que la interacción del láser con las transiciones ópticas de los átomos ejercía fuerzas sobre ellos que podían llegar a disminuir su movimiento (y con ello su temperatura), e incluso atraparlos en ciertas regiones del espacio. Además, usando esas técnicas se consiguió por primera vez condensar átomos alcalinos en su estado fundamental (condensado de Bose-Einstein, Premio Nobel 2001 a Ketterle, Cornell y Wieman). Motivados por esos avances experimentales, un equipo de investigadores de la Universidad de Innsbruck se dio cuenta en 1998 de que si, en lugar de atrapar átomos en potenciales ópticos homogéneos, se hacía en potenciales periódicos, como los que aparecen al hacer interferir un láser con su reflejo en un espejo, el movimiento de estos átomos

Fig. 2. El modelo de Bose-Hubbard describe bosones sin espín que saltan en la red a primeros vecinos con ratio J , y experimentan una energía extra U cuando dos bosones coinciden en un mismo sitio de la red. Cuando esta interacción domina sobre el efecto túnel, el sistema se encuentra en una fase de Mott, en la que los átomos se localizan, siendo cada sitio ocupado por un número fijo de átomos. A medida que el efecto túnel domina, el sistema transiciona a una fase superfluida en la cual los átomos se deslocalizan y la ocupación sigue fluctuaciones de Poisson.



reproducía la dinámica de un modelo de muchos cuerpos denominado modelo de Bose-Hubbard [6]. Este modelo está definido por dos términos: la energía cinética de los átomos al saltar de un sitio a otro de la red (J), y la interacción que aparece cuando dos de ellos *colisionan* en el mismo sitio de la red (U) (Figura 2). La competición entre estos dos términos da lugar a una transición de fase cuántica entre una fase superfluida donde la energía cinética es la dominante a una segunda fase en la que cada sitio es ocupado por exactamente un sólo átomo, conocida como aislante de Mott, donde ahora es la energía de colisión la dominante. Lo interesante del simulador propuesto por el equipo de Innsbruck es que, sin más que cambiar la intensidad de los láseres, uno podría hacer que los átomos pasaran de una fase a otra de manera dinámica. Sería cuatro años más tarde cuando un grupo del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica liderado por Immanuel Bloch observó experimentalmente esa transición de fase cuántica usando átomos de rubidio, dando el pistoletazo de salida al campo de la simulación cuántica analógica con átomos fríos [7].

Estos sistemas basados en átomos fríos atrapados en redes ópticas tienen características que los hacen muy interesantes como simuladores cuánticos analógicos. Por un lado, permiten observar la física de manera muy distinta a la del sistema real que queremos estudiar, ya que las escalas de tiempo de estos simuladores son en general mucho más lentas que las del sistema real (del orden de milisegundos, frente a procesos con tiempos característicos de femtosegundos). Por otro lado, se han desarrollado herramientas, como el microscopio de gas atómico, que permiten observar y controlar cada átomo individualmente. La combinación de ambas posibilidades hace de los átomos fríos atrapados en redes ópticas un sistema muy útil a la hora de explorar física fuera del equilibrio, en general muy difícil de caracterizar numéricamente, y donde estos simuladores han comenzado a dar muestras de su capacidad para superar los mejores métodos numéricos actuales [8].

Otra característica importante es que se trata de sistemas muy *versátiles* que permiten simular problemas relevantes más allá del considerado en la propuesta original:

- Por ejemplo, basta atrapar un isótopo distinto del átomo que tenga carácter fermiónico (p.ej., K^{40}) para simular modelos de Fermi-Hubbard [9]. Estos pueden describir el movimiento de los electrones en sólidos sujetos al potencial periódico de los iones, así como a interacciones entre ellos. Este modelo es muy difícil de simular numéricamente, debido a su carácter fermiónico, y además despierta mucho interés, pues se cree que guarda relación con la física de los superconductores de alta temperatura, cuyo mecanismo está aún por descubrir.

- Además, cuando los átomos se encuentran en el régimen de aislante de Mott, se pueden estudiar problemas de magnetismo cuántico definiendo un pseudo-spin en base a la presencia/ausencia de un átomo en un sitio de la red [10]. Estos pseudo-espines pueden saltar de un sitio a otro debido a fluctuaciones cuánticas en la energía cinética, dando lugar a interacciones de canje entre los mismos.
- Cambiando la configuración de los láseres, pasando por ejemplo de redes cúbicas a hexagonales, uno puede simular fermiones de Dirac [11], como en grafeno; o incluso obtener campos Gauge efectivos que describan modelos con transiciones de fase topológicas, como el modelo de Haldane [12] o el de Harper-Hofstadter [13].
- Atrapando mezclas de átomos fermiónicos y bosónicos [14], es posible simular modelos de altas energías en regímenes donde los efectos no perturbativos dificultan hacer predicciones numéricas.

Como habrá notado el lector en este punto, la química cuántica no aparece aún en esa lista de campos donde la simulación cuántica analógica se ha empezado a aplicar. Dada la relevancia del campo, debe de haber un motivo que haya ralentizado su exploración. ¿Cuál?

El reto de usar átomos fríos para simular química cuántica

Siguiendo el ejemplo de los primeros simuladores cuánticos, una idea natural es utilizar átomos fermiónicos ultrafríos para jugar el papel de los electrones. A diferencia de los electrones de una molécula, que pueden ocupar cualquier posición deseada, estos átomos a bajas temperaturas están atrapados en una red óptica. Esto impone un discretizado en las posiciones posibles que, a medida que se toma una red suficientemente grande, se aproximan cada vez más a la dinámica original en el continuo. Es por ello que el salto de los átomos de un sitio a otro de la red debido al efecto túnel simula la energía cinética de los electrones de manera bastante natural (Figura 3).

Una vez establecido su movimiento, el segundo ingrediente necesario en la simulación es lograr que estos átomos se vean atraídos a ciertas posiciones de la red. Esto reproduce el potencial atractivo de los núcleos de una molécula que, siguiendo la aproximación que introdujimos al principio del artículo, pueden considerarse fijos durante la evolución de los electrones simulados. Explotando el mismo mecanismo que usamos para atrapar los átomos en redes periódicas, ahora uno puede modular la intensidad de un láser para que tenga la forma de la atracción nuclear y así inducir el potencial deseado en cada sitio de la red (Figura 3).

El último ingrediente de la simulación es ahora el más complejo: lograr que estos áto-

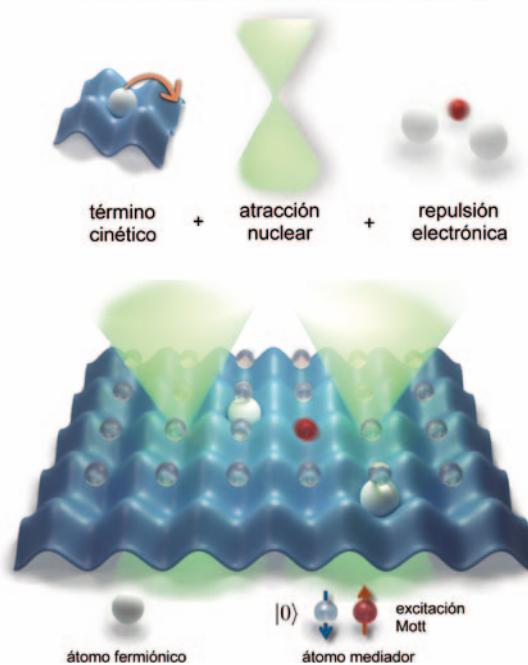
mos neutros, que se desplazan por la red óptica, sientan entre sí una repulsión que dependa de la distancia que los separa en cada momento. Como hemos visto, esta repulsión entre los electrones simulados no es nada natural en estos sistemas, ya que los átomos sólo interactúan cuando colisionan en el mismo sitio de la red. Esta es una interacción extraordinariamente local, a diferencia de la repulsión a largo alcance que necesitamos inducir. ¿Cómo lograr entonces que átomos neutros en distintos puntos de la red se repelan entre sí siguiendo un potencial de Coulomb?

En estos momentos uno puede regresar al espíritu creativo de Gaudí, y buscar soluciones en la naturaleza. Echando un vistazo a los libros de física, uno recuerda que el mecanismo por el que dos electrones se repelen entre sí tiene su origen en un fotón que virtualmente “viaja” rápidamente desde un electrón al otro. Cuanto más alejados estén los electrones, menos probable es que ocurra esta propagación virtual, con lo que el potencial resultante decae con la distancia que los separa. Siguiendo con esta idea, ¿por qué no buscar un “mensajero” que, desplazándose por la red de uno de nuestros átomos neutros a otro, induzca entre ellos una repulsión efectiva?

En unas recientes propuestas [15, 16] los autores de este artículo, junto con otros colaboradores: T. Shi (Chinese Academy of Sciences, Beijing), P. Zoller (Institute of Quantum Optics and Information, Innsbruck), y J. I. Cirac (Max Planck Institute of Quantum Optics), han propuesto varios candidatos para conseguir ese objetivo. Por ejemplo, uno puede pensar en otra especie atómica, que se mueve por la red con una dinámica más rápida que los electrones simulados, y que colisiona con ellos cuando ocupan el mismo sitio de la red [16]. Si bien este esquema experimental sencillo es capaz de inducir una repulsión efectiva entre los átomos fermiónicos, esta tiene una forma diferente al potencial de Coulomb que aparece en la naturaleza. Aún así, esta configuración puede ser ya interesante como un primer paso experimental que permitiría simular modelos simplificados de química con los que contrastar y optimizar métodos numéricos, lo que, para unas pocas decenas de átomos simulados, ya supone un gran desafío computacional.

Para poder conseguir simular la química que observamos en la naturaleza, en la que la repulsión electrónica sigue un potencial de Coulomb, es necesario diseñar por tanto un esquema experimental más complejo para nuestro átomo “mensajero”. En nuestra reciente propuesta [15] vimos de manera teórica que una manera de conseguirlo es que ese átomo “mensajero” esté en su fase de Mott, y que lo que viaje de un sitio a otro sean las excitaciones de espín de sus niveles internos y no el átomo directamente. Serán

Hamiltoniano electrónico en una molécula



estas excitaciones de espín las que jugarán un papel muy similar al de los fotones virtuales que median la repulsión de Coulomb entre electrones. Así, eligiendo apropiadamente las energías de estos niveles, se logra inducir una repulsión efectiva entre los átomos que en una red tridimensional escala como $1/r$, tal y como ocurre en el mundo que nos rodea (Figura 3).

Si bien este último ejemplo es experimentalmente mucho más complejo de construir, se trata de la primera propuesta de un sistema cuántico, experimentalmente accesible y controlable, cuyas fuerzas e interacciones reproducen las de los electrones dentro de una molécula. Al igual que Gaudí podía medir ángulos y distancias en su simulador para aprender sobre su problema arquitectónico original, las energías de este simulador cuántico corresponden a los niveles de energía de la molécula simulada. Pensando en uno de los casos más sencillos, si uno induce el potencial nuclear asociado a dos núcleos y mide la energía del simulador a medida que aleja sus posiciones, el resultado que obtiene es la curva de disociación de esta especie biamérica. La fortaleza de esta propuesta es que, al igual que ocurría en arquitectura, esta curva no ha requerido ningún cálculo, sino que es la naturaleza quien ofrece directamente la solución a nuestro problema. Dado el discretizado inherente al simulador, los primeros simuladores previsiblemente atacarán moléculas pequeñas, no demasiado afectadas por el tamaño finito de la red. Estas primeras pruebas de concepto posiblemente den lugar a simulaciones más complejas, para las que será necesario continuar con el desarrollo experimental actual y poner en práctica estrategias que mitiguen los efectos de tamaño finito y ruido.

Fig. 3. Átomos fermiónicos atrapados en una red óptica juegan el papel de los electrones de una molécula. Su salto a sitios vecinos simula su energía cinética, la modulación en intensidad de un láser externo induce la atracción nuclear a ciertos puntos de la red. Una especie atómica adicional media una repulsión efectiva entre los electrones simulados, que decae con la distancia entre ellos. Ilustración del esquema experimental asociado a la simulación de H_2 (dos núcleos de hidrógeno), donde excitaciones de una especie atómica en fase Mott inducen una repulsión efectiva de Coulomb [15].

Conclusión

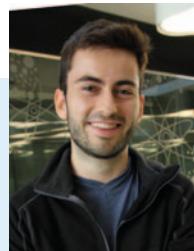
Tal y como hemos ilustrado a lo largo de este artículo, los simuladores cuánticos analógicos son una herramienta muy potente para el estudio de problemas de muchos cuerpos con la tecnología con la que disponemos hoy en día. Con las recientes propuestas para simular interacciones de Coulomb entre átomos fríos, se abre —¡por fin! — la puerta a enfrentar con ellos problemas propios de la química. Al igual que las torres que Gaudí proyectara para la Sagrada Familia con cuerdas y sacos de perdigones son hoy levantadas bajo la guía del más avanzado *software* 3D, los ordenadores cuánticos a buen seguro tomarán el relevo de los simuladores analógicos en el futuro (aún lejano) en que admitan corrección de errores y un desarrollo a gran escala. Mientras tanto, estas “maquetas” nos seguirán permitiendo explorar el mundo cuántico y realizar descubrimientos que, también seguro, sobrevivirán más allá de los nuevos paradigmas en computación aún por llegar.

Referencias

- [1] Wikimedia. (a) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rainbow_Bridge_Natural_Arch_Utah_USA.jpg
(b) fotografía del autor, (c) https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Maqueta_funicular.jpg.
- [2] R. P. FEYNMAN, “Simulating Physics with Computers,” *International Journal of Theoretical Physics* 217 (1982).
- [3] S. LLOYD, “Universal quantum simulators,” *Science* 273, 1073-1078 (1996).
- [4] F. ARUTE *et al.*, *Science* 369, 1084-1089 (2020).
- [5] J. I. CIRAC, “Quantum Computing and Simulation: Where We Stand and What Awaits Us,” *Nanophotonics* (2020), 10.1515/nanoph-2020-0351.
- [6] D. JAKSCH, C. BRUDER, J. I. CIRAC, C. W. GARDINER y P. ZOLLER, “Cold Bosonic Atoms in Optical Lattices,” *Physical Review Letters* 81, 3108-3111 (1998).
- [7] M. GREINER, O. MANDEL, T. ESSLINGER, T. W. HANSCH e I. BLOCH, “Quantum Phase Transition from a Superfluid to a Mott Insulator in a Gas of Ultracold Atoms,” *Nature* 415, 39-44 (2002).
- [8] S. TROTZKY *et al.*, “Probing the Relaxation Towards Equilibrium in an Isolated Strongly Correlated One-Dimensional Bose Gas,” *Nature Physics* 8, 325-330 (2012).
- [9] T. ESSLINGER, “Fermi-Hubbard Physics with Atoms in an Optical Lattice,” *Annual Review of Condensed Matter Physics* 1, 129-152 (2010).
- [10] S. TROTZKY *et al.*, “Time-resolved Observation and Control of Superexchange Interactions with Ultracold Atoms in Optical Lattices,” *Science* 319, 295-299 (2008).
- [11] L. TARRUELL, D. GREIF, T. UEHLINGER, G. JOTZU y T. ESSLINGER, “Creating, Moving and Merging Dirac Points with a Fermi Gas in a Tunable Honeycomb Lattice,” *Nature* 483, 302-305 (2012).
- [12] G. JOTZU *et al.*, “Experimental Realization of the Topological Haldane Model with Ultracold Fermions,” *Nature* 515, 237-240 (2014).
- [13] M. AIDELSBURGER *et al.*, “Measuring the Chern Number of Hofstadter Bands with Ultracold Bosonic Atoms,” *Nature Physics* 11, 162-166 (2015).
- [14] E. ZOHAR, J. I. CIRAC y B. REZNIK, “Quantum Simulations of Lattice Gauge Theories Using Ultracold Atoms in Optical Lattices,” *Reports on Progress in Physics* 79 (2015).
- [15] J. ARGÜELLO-LUENGO, ALEJANDRO GONZÁLEZ-TUDELA, TAO SHI, PETER ZOLLER y J. IGNACIO CIRAC, “Analogue Quantum Chemistry Simulation,” *Nature* 574, 215-218 (2019).
- [16] J. ARGÜELLO-LUENGO, A. GONZÁLEZ-TUDELA, TAO SHI, P. ZOLLER y J. I. CIRAC, “Quantum Simulation of 2D Quantum Chemistry in Optical Lattices,” *Physical Review Research* 2, 042013(R) (2020).

Javier Argüello Luengo

Instituto de Ciencias Fotónicas
(ICFO)



Alejandro González Tudela

Instituto de Física Fundamental
(IFF-CSIC)



EDICIÓN DE LOS PREMIOS FOTÓN
DE COMUNICACIÓN CIENTÍFICA Y DE
DOCENCIA EN LA ESCUELA

INSTITUTO DE ÓPTICA 'DAZA DE VALDÉS'
DEL CSIC

<https://www.io.csic.es/premiosfoton/>