



# VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

## *Lectio*

Discurso del prof. Dr. Juan Ignacio Cirac en el  
Solemne Acto de su Investidura como Doctor  
“Honoris Causa” por la Universitat de València

Valencia, 30 de enero de 2015

Excmo. Sr. Rector Magnífico  
Excmas. e Ilmas. autoridades  
Ilustrísimos Señores Doctores  
Miembros del Claustro Universitario  
Señoras, señores y compañeros

Es un gran honor recibir el doctorado honoris causa por la Universitat de València, una institución con más de cinco siglos de historia, que ha jugado y juega un lugar predominante en la vida académica y científica española. Por ello, en primer lugar me gustaría dar mi más cordial agradecimiento a la Facultad de Física de esta universidad por proponer mi candidatura, y al Consejo de Gobierno por haberla apoyado. También deseo agradecer a mis colaboradores el trabajo que han llevado a cabo durante los últimos veinte años, y que ahora se ve reconocido con esta alta distinción. Muy especialmente, me gustaría mencionar a la Doctora Mari Carmen Bañuls, quien desempeña desde hace diez años una labor fundamental en nuestro grupo de investigación en el Instituto Max-Planck de Óptica Cuántica, así como al Doctor Carlos Navarrete Belloch, quien está realizando su estancia postdoctoral muy exitosa en nuestro grupo. Ambos provienen de la Universitat de València y colaboran muy estrechamente con los profesores Armando Pérez, Eugenio Roldán, y Germán Valcárcel.

Siempre he desarrollado mi labor investigadora alrededor del campo de la Física Cuántica. Esta es una teoría que describe con una precisión exquisita el comportamiento de los objetos microscópicos, desde los más elementales, hasta los más complejos. Explica, también, como las partículas se combinan para formar el mundo del que estamos hechos, incluyendo la materia, así como la mayoría de las fuerzas que se ejercen entre ellas. Gracias a su desarrollo entendemos hoy en día la composición de los núcleos atómicos, cómo éstos se combinan con electrones para formar los átomos, cómo estos reaccionan generando moléculas, y cómo átomos y moléculas dan lugar a todas las fases de la materia. Este conocimiento, que se fraguó en la primera mitad del siglo pasado, dio lugar a la gran revolución tecnológica de la que hoy en día disfrutamos. Los ordenadores, la electrónica, los láseres, la tecnología nuclear, y otros muchos dispositivos que forman una parte fundamental de nuestra vida están basados en las leyes de la Física Cuántica y, por tanto, su descubrimiento y desarrollo nos abrió la puerta a todos ellos.

Además de todo esto, la Física Cuántica contiene nuevos aspectos que han cambiado de una forma radical nuestra visión sobre la naturaleza. Estos aspectos están relacionados con la realidad de todo lo que nos rodea; en particular, con la existencia y definición de las propiedades físicas de los objetos, tales como su posición, su velocidad, su color, o su magnetismo. Según esta teoría, es posible tener un objeto sin que alguna de sus propiedades esté bien definida. Sólo cuando lo observamos, ésta queda definida y, lo que es

más sorprendente, de una manera completamente aleatoria. La Física Cuántica, por tanto, no es una teoría realista, en la que todas las propiedades de los objetos existen y están bien definidas independientemente de si los observamos o no. Esta característica de la Física Cuántica dio quebraderos de cabeza a muchos de sus fundadores, como Einstein o Schrödinger, a los que les costaba aceptar su visión no-realista de la naturaleza. Einstein, en particular, pensaba que la Física Cuántica era una teoría estadística, que se aplicaba a conjuntos de objetos y nos permitía caracterizar sus propiedades globales. Sin embargo, si nos tomábamos al pie de la letra sus fórmulas y las queríamos aplicar a un solo objeto, llegábamos a conclusiones aparentemente paradójicas que llevaban inexorablemente, como he mencionado anteriormente, a una colisión con la visión realista que se tenía por aquel entonces.

La verificación experimental de estos aspectos más extraordinarios de la Física Cuántica no ha sido posible hasta los últimos treinta años. La razón fundamental es que estos experimentos requieren tener acceso a uno o unos pocos objetos microscópicos, bien controlados, y completamente aislados del exterior. Afortunadamente, los avances científicos y tecnológicos nos permiten, hoy en día, aislar un solo átomo, un fotón, una molécula, o un electrón. Con estas partículas podemos verificar que la Física Cuántica no sólo se puede aplicar a conjuntos de objetos, sino también a cada uno de ellos. También podemos comprobar todas las predicciones relacionadas con su interpretación no-realista.

Una vez aceptado esto, podemos darle la vuelta a la tortilla y plantearnos cómo lograr sacar provecho a este aspecto tan extraordinario de la Física Cuántica. Gracias al avance experimental del que hemos sido testigos en los últimos años, hoy en día tenemos acceso a las nuevas leyes de esta teoría que tanto perturbaron a generaciones de físicos ilustres. Podemos hacer experimentos con unos pocos átomos, fotones, o electrones, y hacerlos comportarse tal y como predice esta teoría, dando lugar a fenómenos realmente sorprendentes. La historia y la experiencia nos muestran que cada vez que tenemos acceso a nuevas leyes de la naturaleza, surgen nuevas aplicaciones que revolucionan nuestra sociedad. Por tanto, ¿qué nuevas aplicaciones pueden surgir? Bien, pues tanto el estudio y la formalización de los aspectos más chocantes de la Física Cuántica, así como la búsqueda de nuevas aplicaciones han sido el objetivo fundamental de mi investigación durante los últimos veinte años. ¿Cómo he llegado aquí?

Descubrí mi vocación por la Física Cuántica al cursar el tercer año de la licenciatura de Ciencias Físicas en la Universidad Complutense de Madrid. Hasta entonces, no sabía con certeza a qué me quería dedicar profesionalmente. A mí me gustaban las ciencias más básicas, especialmente las Matemáticas; pero también me divertía estudiando en los ratos libres Ingeniería Industrial por la Universidad Nacional de Educación a Distancia. Aconsejado por la gente más cercana, yo creo que tenía en mente acabar las dos carreras y terminar trabajando en alguna empresa tecnológica. Sin embargo, en ese tercer año descubrí que la Física Cuántica combinaba todo lo que me gustaba. En primer lugar, describía lo que nos rodea, desde las partículas más elementales, a los átomos, las moléculas, y los materiales. En

segundo lugar, este conocimiento había dado lugar a una revolución tecnológica. En tercer lugar, esta teoría de la Física nos da una nueva y sorprendente visión sobre la naturaleza, con implicaciones filosóficas profundas. Y, finalmente, está basada en una teoría matemática elegante y compleja. Decidí especializarme en Física Fundamental y hacer el doctorado en el campo de la Óptica Cuántica en el Departamento de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid. Este campo utiliza la Física Cuántica para describir los fenómenos fundamentales que ocurren cuando la luz interacciona con la materia.

Un momento muy importante de mi vida científica tuvo lugar a finales del año 1990. La beca con la que estaba financiando mi tesis doctoral me permitió realizar una visita de tres meses al Instituto de Física Teórica de la Universidad de Innsbruck, en Austria. Allí trabajaba el profesor Peter Zoller, un experto en Óptica Cuántica, quien me puso a trabajar en dos problemas: uno relacionado con mi tesis, y el otro, con la descripción de un experimento que estaba teniendo lugar en la Universidad de Stanford en aquellos momentos. Este último consistía en la construcción de un interferómetro atómico; esto es, un aparato que utiliza átomos en vez de luz para medir propiedades físicas con extrema precisión. El trabajo que realicé durante aquella estancia me entusiasmó, así que decidí obtener el grado de doctor lo antes posible e irme de postdoc con Peter Zoller. Ahí empezó una colaboración muy estrecha que ha llegado hasta la actualidad.

Compaginé mi tiempo de postdoc con una plaza de profesor titular en la Universidad de Castilla-La Mancha. Peter Zoller acababa de ser nombrado profesor en la Universidad de Colorado en Boulder, a dónde fui por primera vez en el verano del 91. Durante los siguientes años, pasé un total de 16 meses en esa universidad, aprovechando la generosidad de mis compañeros en Castilla-La Mancha, que me permitían elegir la docencia para compaginarla con mis estancias postdoctorales. En Boulder comencé a trabajar en un tema que era nuevo para mí: la manipulación de átomos con láseres, con el objetivo de observar fenómenos cuánticos relacionados con esos aspectos extraordinarios de la teoría cuántica. En particular trabajé en el enfriamiento de átomos, las nuevas fases de la materia que aparecen a bajas temperaturas, y en la creación de estados de superposición en el movimiento de iones atrapados. La verdad es que fui realmente afortunado. El lugar donde trabajaba estaba rodeado de los mayores expertos en estos temas, así que no sólo estuve expuesto a las técnicas más avanzadas, sino también aprendí a reconocer y apreciar los problemas más relevantes. Una muestra de la atmósfera que había en Boulder en aquellos tiempos es que en el año 2001, dos de los científicos que trabajaban allí obtuvieron el Premio Nobel por la condensación de Bose-Einstein de átomos enfriados con láseres, y en el 2013, David Wineland, otro científico que trabajaba en Boulder, también lo obtuvo por sus experimentos con iones atrapados.

Otro momento clave de mi carrera se produjo en el verano del 94. En Boulder se celebraba la conferencia internacional de Física Atómica, y habían invitado a Artur Ekert (de la Universidad de Oxford) a dar una conferencia sobre un tema distinto al motivo del evento. El tema era la computación cuántica; esto es, la posibilidad de utilizar las leyes extraordinarias

de la Física Cuántica para construir ordenadores capaces de realizar cálculos de una manera distinta, y mucho más rápida, de como lo hacen los ordenadores usuales. La charla fue excepcional, y terminó con la siguiente frase: “si tuviésemos uno de estos ordenadores, podríamos hacer cálculos que de otra forma nunca podremos hacer; sin embargo, no sabemos cómo construir un ordenador cuántico, ni siquiera si esto es posible”. Yo estaba sentado junto a Peter Zoller y nuestra reacción tras la charla fue investigar esta cuestión. Tras un par de semanas de trabajo, Peter Zoller volvió a Innsbruck, en donde había aceptado una plaza de profesor. Yo me fui a Harvard, a proseguir una investigación que estaba realizando en un tema distinto. Al cabo de tres meses, fui a visitar a Peter Zoller a Innsbruck y allí se nos ocurrió la idea de cómo construir un ordenador cuántico usando iones atrapados. Para ello, sugerimos que la información se podía almacenar en dos configuraciones electrónicas (u órbitas) de cada ion, lo que hoy en día llamamos un bit cuántico (o qubit). Para procesar esa información se podían utilizar láseres, que modificaran tanto el estado electrónico de un ion, como su movimiento. Gracias a la fuerza de Coulomb, dado que los iones están cargados eléctricamente, otros iones sentirían el movimiento del primero y, con ello, podrían interactuar de la manera requerida. El trabajo lo publicamos en principios del 95, y fue inmediatamente seguido por un experimento en el grupo de David Wineland, que confirmó nuestras predicciones. A partir de entonces, mi trabajo se concentró en el campo de la Información Cuántica, que consiste en utilizar las leyes de la Física Cuántica para procesar y transmitir información de una manera mucho más eficiente y segura de lo que se hace con los dispositivos actuales.

Desde de mi incorporación al Instituto de Física Teórica de la Universidad de Innsbruck en 1996, y luego en al Instituto Max-Planck de Óptica Cuántica, he continuado trabajando en este campo de investigación, desarrollando y analizando nuevas formas de enviar mensajes secretos utilizando repetidores cuánticos, de estudiar sistemas complejos a través de simuladores cuánticos, o de teletransportar información de un lugar a otro usando átomos y fotones. Todo este trabajo lo he realizado en colaboración con muchos científicos, tanto teóricos como experimentales, en varios centros de investigación. He tenido también la gran fortuna de poder trabajar con los mejores estudiantes de doctorado y postdocs que he conocido, y de disfrutar con mi trabajo como si fuera mi hobby.

Hoy por hoy, el campo de la Información Cuántica es uno de los más activos y multidisciplinarios que existen. En él trabajan físicos teóricos y experimentales, provenientes de distintas áreas, como la Física Atómica, la Física de la Materia Condensada, o la Óptica. Trabajan también en este campo matemáticos, informáticos, ingenieros y químicos. El objetivo fundamental es dominar y controlar el mundo microscópico, de tal forma que podamos construir aparatos que exploten esas leyes extraordinarias de la Física Cuántica. También se buscan nuevas aplicaciones, en donde estas leyes nos permitan realizar tareas que en nuestro mundo macroscópico son difíciles o imposibles. Por otro lado, la vertiente más teórica y conceptual de la Información Cuántica está dando lugar a nuevos paradigmas en otros campos de investigación, algo que nadie anticipó cuando se empezó a desarrollar esta disciplina. El concepto llamado “entrelazamiento cuántico” que surge de una manera

natural en la Física Cuántica y en la que está enraizado el formalismo de la Información Cuántica, permite que dos objetos situados en dos lugares distintos posean correlaciones extraordinarias. Esto es, si medimos una propiedad en uno de ellos, obtenemos un resultado aleatorio; pero si la medimos también en el otro, obtenemos el mismo resultado. Estas correlaciones no son como las que se dan en el mundo cotidiano, ya que no ocurren por un intercambio de señales entre los objetos, ni por un mecanismo que los determine de antemano a dar un resultado específico. Las aplicaciones de la Información Cuántica están relacionadas con esta propiedad tan misteriosa de la teoría cuántica. La descripción, caracterización, y cuantificación del entrelazamiento ha sido, pues, uno de los campos de investigación más activos en el desarrollo de la teoría de la Información Cuántica. Esta investigación ha dado lugar a un formalismo matemático que hoy está teniendo una repercusión muy significativa en otros campos de investigación. Por un lado, en la descripción de sistemas de muchas partículas, tal y como aparecen cuando queremos describir sólidos complejos o gases atómicos. De hecho, los algoritmos numéricos más potentes para resolver alguno de estos problemas han surgido directamente de los estudios del entrelazamiento cuántico realizados en el campo de la Información Cuántica. Por otro lado, las mismas ideas se están aplicando para intentar entender mejor los problemas que surgen al intentar combinar la Física Cuántica con la Teoría General de la Relatividad, las dos teorías de la Física más influyentes del siglo pasado que, hoy por hoy, son irreconciliables.

Tenemos ante nosotros un gran desafío que puede llevar a una segunda revolución cuántica, dando lugar a nuevas tecnologías en el campo de la informática y la comunicación. Para ello, todavía nos queda un gran camino por recorrer, ya que tenemos que ser capaces de dominar el mundo microscópico con un grado de control mucho mayor que el que tenemos hoy en día. Durante los últimos años el avance científico en este campo ha sido excepcional, y día a día aparecen nuevos resultados, muchos de ellos sorprendentes. Esto nos hace optimistas en cuanto al futuro de la Información Cuántica y atrae cada vez a más científicos a esta área.

Para mí es un gran privilegio poder contribuir, junto a mi equipo de investigación, al progreso dentro de este campo. Y es, además, una gran satisfacción que este trabajo se vea recompensado con el gran honor de recibir el Doctorado Honoris Causa por la Universitat de València. Por todo ello, reitero mi agradecimiento a esta magnífica universidad, y en especial a las personas responsables de mi nominación. Finalmente, deseo dar mi agradecimiento también a mis padres por el apoyo que me han dado siempre, y a mi familia, por su paciencia y resignación cuando, debido al trabajo, no les he podido dar la atención que se merecían.



VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

