



VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

Lectio

Discurs del prof. Dr. Juan Ignacio Cirac en el
Solemne Acte de la seua Investidura com a Doctor
“Honoris Causa” per la Universitat de València

València, 30 de gener de 2015

Excm. Sr. Rector Magnífic
Excel·lentíssimes i il·lustríssimes autoritats
Il·lustríssims senyors doctors
Membres del Claustre universitari
Senyores, senyors i companys

És un gran honor rebre el doctorat honoris causa per la Universitat de València, una institució amb més de cinc segles d'història, que ha tingut i té un lloc predominant en la vida acadèmica i científica espanyola. Per això, en primer lloc m'agradaria donar el meu agraïment més cordial a la Facultat de Física d'aquesta Universitat per proposar la meua candidatura, i al Consell de Govern per haver-hi donat suport. També vull agrair als meus col·laboradors el treball que han dut a terme durant els últims vint anys, i que ara es veu reconegut amb aquesta alta distinció. Molt especialment, m'agradaria esmentar la doctora Mari Carmen Bañuls, qui exerceix des de fa deu anys una tasca fonamental en el nostre grup de recerca a l'Institut Max-Planck d'Òptica Quàntica, així com al doctor Carlos Navarrete Belloch, qui a hores d'ara realitza una estada postdoctoral molt reeixida en el nostre grup. Tots dos provenen de la Universitat de València i col·laboren molt estretament amb els professors Armant Pérez, Eugenio Roldán i Germán Valcárcel.

Sempre he desenvolupat la meua tasca investigadora sobre el camp de la física quàntica. Aquesta és una teoria que descriu amb una precisió exquisida el comportament dels objectes microscòpics, des dels més elementals, fins als més complexos. Explica, també, com les partícules es combinen per formar el món de què estem fets, inclosa la matèria, així com la majoria de les forces que s'exerceixen entre aquelles. Gràcies al seu desenvolupament, entenem avui dia la composició dels nuclis atòmics, com aquests es combinen amb electrons per formar els àtoms, com aquests reaccionen generant molècules, i com àtoms i molècules donen lloc a totes les fases de la matèria. Aquest coneixement, que es va forjar en la primera meitat del segle passat, va donar lloc a la gran revolució tecnològica de què gaudim avui dia. Els ordinadors, l'electrònica, els làsers, la tecnologia nuclear i molts altres dispositius que formen una part fonamental de la nostra vida estan basats en les lleis de la física quàntica, i per tant el seu descobriment i desenvolupament ens hi va obrir la porta.

A més de tot això, la física quàntica conté nous aspectes que han canviat de forma radical la nostra visió sobre la natura. Aquests aspectes estan relacionats amb la realitat de tot el que ens envolta; en particular, amb l'existència i la definició de les propietats físiques dels objectes, com ara la seua posició, la seua velocitat, el seu color o el seu magnetisme. Segons aquesta teoria, és possible tenir un objecte sense que cap de les seues propietats estiga ben definida. Només quan l'observem, aquestes queden definides i, cosa encara més sorprenent, d'una manera completament aleatòria. La física quàntica, per tant, no és una teoria realista, segons la qual totes les propietats dels objectes existeixen i estan ben definides independentment de si els observem o no. Aquesta característica de la física quàntica va

donar maldecaps a molts dels seus fundadors, com Einstein o Schrödinger, als quals costava acceptar la seua visió no-realista de la natura. Einstein, en particular, pensava que la física quàntica era una teoria estadística, que s'aplicava a conjunts d'objectes i que ens permetia caracteritzar-ne les propietats globals. Tanmateix, si ens preniem al peu de la lletra les seues fórmules i les volíem aplicar a un sol objecte, arribàvem a conclusions aparentment paradoxals que portaven inexorablement, com he esmentat adés, a una col·lisió amb la visió realista que es tenia aleshores.

La verificació experimental d'aquests aspectes més extraordinaris de la física quàntica no ha estat possible fins als últims trenta anys. La raó fonamental és que aquests experiments requereixen tenir accés a un o uns pocs objectes microscòpics, ben controlats, i completament aïllats de l'exterior. Afortunadament, els avanços científics i tecnològics ens permeten, avui dia, aïllar un sol àtom, un fotó, una molècula o un electró. Amb aquestes partícules podem verificar que la física quàntica no només es pot aplicar a conjunts d'objectes, sinó també a cadascun d'ells. També podem comprovar totes les prediccions relacionades amb la seua interpretació no-realista.

Una vegada acceptat això, podem girar la truita i plantejar-nos com traure profit d'aquest aspecte tan extraordinari de la física quàntica. Gràcies a l'avanç experimental de què hem estat testimonis els darrers anys, avui dia tenim accés a les noves lleis d'aquesta teoria que tant van pertorbar generacions de físics il·lustres. Podem fer experiments amb uns pocs àtoms, fotons o electrons, i fer-los comportar-se tal com prediu aquesta teoria, i això dóna lloc a fenòmens realment sorprenents. La història i l'experiència ens mostren que cada vegada que tenim accés a noves lleis de la natura, sorgeixen noves aplicacions que revolucionen la nostra societat. Per tant, quines noves aplicacions poden sorgir? Bé, doncs tant l'estudi i la formalització dels aspectes més xocants de la física quàntica, així com la cerca de noves aplicacions, han estat l'objectiu fonamental de la meua recerca durant els últims vint anys. Com hi he arribat, ací?

Vaig descobrir la meua vocació per la física quàntica en cursar el tercer any de la llicenciatura en Ciències Físiques a la Universitat Complutense de Madrid. Fins llavors, no sabia amb certesa a què em volia dedicar professionalment. A mi, m'agradaven les ciències més bàsiques, especialment les matemàtiques; però també em divertia estudiant en el temps lliure Enginyeria Industrial per la Universitat Nacional d'Educació a Distància. Aconsellat per la gent més propera, jo crec que tenia en ment acabar les dues carreres i treballar en alguna empresa tecnològica. Tanmateix, en aquest tercer any vaig descobrir que la física quàntica combinava tot el que m'agradava. En primer lloc, descriu el que ens envolta, des de les partícules més elementals, fins als àtoms, les molècules i els materials. En segon lloc, aquest coneixement havia donat lloc a una revolució tecnològica. En tercer lloc, aquesta teoria de la física ens dóna una nova i sorprenent visió sobre la natura, amb implicacions filosòfiques profundes. I, finalment, es basa en una teoria matemàtica elegant i complexa. Vaig decidir especialitzar-me en Física Fonamental i fer el doctorat en el camp de l'Òptica Quàntica al Departament d'Òptica de la Universitat Complutense de Madrid. Aquest camp fa servir la

física quàntica per descriure els fenòmens fonamentals que ocorren quan la llum interacciona amb la matèria.

Un moment molt important de la meua vida científica va tenir lloc a la fi de l'any 1990. La beca amb què finançava la meua tesi doctoral em va permetre realitzar una visita de tres mesos a l'Institut de Física Teòrica de la Universitat d'Innsbruck, a Àustria. Allí, hi treballava el professor Peter Zoller, un expert en òptica quàntica, qui em va posar a treballar en dos problemes: un, relacionat amb la meua tesi, i l'altre, amb la descripció d'un experiment que estava tenint lloc a la Universitat de Stanford en aquells moments. Aquest últim consistia a construir un interferòmetre atòmic; això és, un aparell que utilitza àtoms en comptes de llum per mesurar propietats físiques amb extrema precisió. El treball que vaig realitzar durant aquella estada em va entusiasmar, i així vaig decidir obtenir el grau de doctor al més aviat possible i anar-me'n de postdoc amb Peter Zoller. Va començar així una col·laboració molt estreta que ha arribat fins a l'actualitat.

Vaig compaginar el meu temps de postdoc amb una plaça de professor titular a la Universitat de Castella-La Manxa. Peter Zoller acabava de ser nomenat professor a la Universitat de Colorado, a Boulder, on vaig anar per primera vegada a l'estiu del 91. Durant els anys següents, vaig passar un total de 16 mesos en aquesta universitat, aprofitant la generositat dels meus companys a Castella-La Manxa, que em permetien triar la docència per compaginar-la amb les meues estades postdoctorals. A Boulder vaig començar a treballar en un tema que era nou per a mi: la manipulació d'àtoms amb làsers, amb l'objectiu d'observar fenòmens quàntics relacionats amb aquests aspectes extraordinaris de la teoria quàntica. En particular, vaig treballar en el refredament d'àtoms, les noves fases de la matèria que apareixen a baixes temperatures i en la creació d'estats de superposició en el moviment d'ions atrapats. La veritat és que vaig ser realment afortunat. Al lloc on treballava estava envoltat dels majors experts en aquests temes, i així no solament vaig estar exposat a les tècniques més avançades, sinó també vaig aprendre a reconèixer i apreciar els problemes més rellevants. Una mostra de l'atmosfera que hi havia a Boulder en aquells temps és que, l'any 2001, dos dels científics que hi treballaven van obtenir el premi Nobel per la condensació de Bose-Einstein d'àtoms refredats amb làsers, i el 2013 David Wineland, un altre científic que treballava a Boulder, també el va obtenir pels seus experiments amb ions atrapats.

Un altre moment clau de la meua carrera es va produir a l'estiu del 94. A Boulder se celebrava la conferència internacional de física atòmica, i havien convidat a Artur Ekert (de la Universitat d'Oxford) per donar una conferència sobre un tema diferent al motiu de l'esdeveniment. El tema era la computació quàntica; això és, la possibilitat d'utilitzar les lleis extraordinàries de la física quàntica per construir ordinadors capaços de realitzar càlculs d'una manera diferent, i molt més ràpida, de com ho fan els ordinadors usuals. La xarrada va ser excepcional, i va acabar amb la frase següent: "si tinguérem un d'aquests ordinadors, podríem fer càlculs que d'una altra manera mai no podem fer; tanmateix, no sabem com construir un ordinador quàntic, ni tan sols si això és possible". Jo estava assegut al costat de

Peter Zoller i la nostra reacció després de la xarrada va ser investigar aquesta qüestió. Després d'un parell de setmanes de treball, Peter Zoller va tornar a Innsbruck, on havia acceptat una plaça de professor. Jo vaig marxar a Harvard, a prosseguir una recerca que estava realitzant sobre un tema diferent. Al cap de tres mesos, vaig visitar Peter Zoller a Innsbruck i allí se'ns va ocórrer la idea de com construir un ordinador quàntic usant ions atrapats. Per fer-ho, vam suggerir que la informació es podia emmagatzemar en dues configuracions electròniques (o òrbites) de cada ió, la qual cosa avui dia anomenem un bit quàntic (o qubit). Per processar aquesta informació es podien utilitzar làsers, que modificaren tant l'estat electrònic d'un ió, com el seu moviment. Gràcies a la força de Coulomb, atès que els ions estan carregats elèctricament, altres ions sentirien el moviment del primer i, amb això, podrien interaccionar de la manera requerida. El treball, el vam publicar a principi del 95, i va anar immediatament seguit per un experiment en el grup de David Wineland, que va confirmar les nostres prediccions. A partir de llavors, el meu treball es va concentrar en el camp de la informació quàntica, que consisteix a utilitzar les lleis de la física quàntica per processar i transmetre informació d'una manera molt més eficient i segura del que es fa amb els dispositius actuals.

Des de de la meua incorporació a l'Institut de Física Teòrica de la Universitat d'Innsbruck el 1996, i després a l'Institut Max-Planck d'Òptica Quàntica, he continuat treballant en aquest camp de recerca, desenvolupant i analitzant noves formes d'enviar missatges secrets utilitzant repetidors quàntics, d'estudiar sistemes complexos a través de simuladors quàntics, o de teletransportar informació d'un lloc a un altre usant àtoms i fotons. Tot aquest treball, l'he realitzat en col·laboració amb molts científics, tant teòrics com experimentals, a diversos centres de recerca. He tingut també la gran fortuna de poder treballar amb els millors estudiants de doctorat i postdocs que he conegut, i de gaudir amb el meu treball com si fóra el meu hobby.

Ara com ara, el camp de la informació quàntica és un dels més actius i multidisciplinaris que hi ha. Hi treballen físics teòrics i experimentals, provinents de diferents àrees, com la física atòmica, la física de la matèria condensada o l'òptica. Hi treballen també matemàtics, informàtics, enginyers i químics. L'objectiu fonamental és dominar i controlar el món microscòpic, de tal forma que puguem construir aparells que exploten aquestes lleis extraordinàries de la física quàntica. També es busquen noves aplicacions, on aquestes lleis ens permeten realitzar tasques que al nostre món macroscòpic són difícils o impossibles. D'altra banda, el vessant més teòric i conceptual de la informació quàntica està donant lloc a nous paradigmes en altres camps de recerca, una cosa que ningú va anticipar quan es va començar a desenvolupar aquesta disciplina. El concepte anomenat "entrellaçament quàntic", que sorgeix de manera natural en la física quàntica i en la qual està arrelat el formalisme de la informació quàntica, permet que dos objectes situats en dos llocs diferents posseïsquen correlacions extraordinàries. Això és, si mesurem una propietat en un d'ells, obtenim un resultat aleatori; però si la mesurem també en l'altre, obtenim el mateix resultat. Aquestes correlacions no són com les que es donen en el món quotidià, ja que no ocorren per un intercanvi de senyals entre els objectes, ni per un mecanisme que els

determine per endavant a donar un resultat específic. Les aplicacions de la informació quàntica estan relacionades amb aquesta propietat tan misteriosa de la teoria quàntica. La descripció, caracterització i quantificació de l'entrellaçament ha estat, doncs, un dels camps de recerca més actius en el desenvolupament de la teoria de la informació quàntica. Aquesta recerca ha donat lloc a un formalisme matemàtic que avui està tenint una repercussió molt significant en altres camps de recerca. D'una banda, en la descripció de sistemes de moltes partícules, tal com apareixen quan volem descriure sòlids complexos o gasos atòmics. De fet, els algorismes numèrics més potents per resoldre algun d'aquests problemes han sorgit directament dels estudis de l'entrellaçament quàntic realitzats en el camp de la informació quàntica. D'altra banda, les mateixes idees s'estan aplicant per intentar entendre millor els problemes que sorgeixen en intentar combinar la física quàntica amb la teoria general de la relativitat, les dues teories de la física més influents del segle passat que, ara com ara, són irreconciliables.

Tenim davant nostre un gran desafiament que pot portar a una segona revolució quàntica, que done lloc a noves tecnologies en el camp de la informàtica i la comunicació. Perquè això passe, encara ens queda un gran camí per recórrer, ja que hem de ser capaços de dominar el món microscòpic amb un grau de control molt major que el que tenim avui dia. Durant els últims anys, l'avanç científic en aquest camp ha estat excepcional, i dia a dia apareixen nous resultats, molts dels quals són sorprenents. Això ens fa ser optimistes quant al futur de la informació quàntica i atrau com més va més científics a aquesta àrea.

Per a mi, és un gran privilegi poder contribuir, al costat del meu equip de recerca, al progrés dins d'aquest camp. I és, a més, una gran satisfacció que aquest treball es veja recompensat amb el gran honor de rebre el doctorat honoris causa per la Universitat de València. Per tot això, reitere el meu agraïment a aquesta magnífica Universitat, i especialment a les persones responsables de la meua nominació. Finalment, desitge donar el meu agraïment també als meus pares pel suport que m'han donat sempre, i a la meua família, per la seua paciència i resignació quan, a causa de la feina, no els he pogut donar l'atenció que es mereixien.



VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

