

Fotons: una extraordinària eina d'exploració científica

Discurs de presentació de Lluís Torner i Sabata com a membre numerari de la Secció de Ciències i Tecnologia, llegit el dia 15 de juny de 2020



Institut
d'Estudis
Catalans

SECCIÓ
DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA

Fotons: una extraordinària eina d'exploració científica

Fotons: una extraordinària eina d'exploració científica

Discurs de presentació de Lluís Torner i Sabata
com a membre numerari de la Secció de Ciències
i Tecnologia, llegit el dia 15 de juny de 2020

Barcelona, 2020



Institut
d'Estudis
Catalans

SECCIÓ
DE CIÈNCIES
I TECNOLOGIA

Biblioteca de Catalunya. Dades CIP

Torner i Sabata, Lluís, autor

Fotons : una extraordinària eina d'exploració científica. — Primera edició

Bibliografia

ISBN 9788499655239

I. Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia II. Títol

1. Fotons 2. Fotònica

539.122

535.14

© Lluís Torner i Sabata

© 2020, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: juny de 2020

Text revisat lingüísticament per la Unitat de Correcció del Servei Editorial de l'IEC

Disseny de la coberta: Azcunce | Ventura

Imatge de la coberta: © Schutterstock / Subbotina Anna

Compost per la Unitat de Producció del Servei Editorial de l'IEC

Imprès a Open Print, SL

ISBN: 978-84-9965-523-9

Dipòsit Legal: B 7520-2020

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del *copyright*, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment i suport, incloent-hi la reprografia i el tractament informàtic, la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec comercial, la inclusió total o parcial en bases de dades i la consulta a través de xarxa telemàtica o d'Internet. Les infraccions d'aquests drets estan sotmeses a les sancions establertes per les lleis.

La capacitat que té la humanitat d'explorar i de comprendre els fenòmens que tenen lloc al seu voltant en el sentit més ampli possible, per tant incloent a un extrem l'Univers observable en el seu conjunt i a l'altre extrem els elements més petits que el constitueixen, depèn críticament de les prestacions dels instruments de què disposa. Al seu torn, la comprensió de l'entorn, emprada de manera èticament responsable, obre les portes a la millora contínua de les condicions de vida; a la prevenció i guariment de malalties; al progrés sostenible, compatible amb la cura de la Terra i amb la preservació activa del medi ambient, i a la cada vegada més gran capacitat de realització personal i col·lectiva dels humans organitzats en societats diverses i inclusives.

Per explorar, estudiar i manipular les diferents parts i elements que constitueixen el món, sobretot el món microscòpic i l'interior del nostre propi cos i dels òrgans i cèl·lules que el constitueixen, calen instruments i eines adients, capaços de, segons que escaigui, veure, analitzar, agafar, tallar, enganxar, estirar, foradar, tapar, pintar, camuflar, polir, refredar, escalfar i un llarg etcètera. Idealment, moltes d'aquestes funcions s'han de fer sense destruir ni malmetre els objectes en observació, especialment si es tracta d'una part d'un ésser viu (les teràpies adreçades a suprimir teixits malignes són una excepció òbvia) o de processos que es volen analitzar repetidament. Junt amb altres tecnologies, els fotons són una de les eines més poderoses de què disposa actualment la humanitat en aquest camí d'exploració.

La fotònica és la part de la ciència i la tecnologia que empra els fotons com a eina de treball. En el camp científic, actualment s'aplica a una amplíssima varietat d'àmbits de coneixement, des de la física, la química, la majoria d'enginyeries, la

biologia, la medicina i les ciències mediambientals, fins a la història de l'art o l'arqueologia. Diversos elements essencials de la civilització actual són possibles gràcies a l'ús de les tecnologies fotòniques fent equip amb l'electrònica, la ciència de materials i la química.

Un exemple especialment important atès el seu impacte en la societat digital actual és la xarxa de comunicacions global, basada, entre d'altres, en sistemes de fibra òptica que mitjançant fotons de freqüència infraroja connecten persones, entitats i màquines situades a grans distàncies i a diferents continents amb velocitats de comunicació i capacitat de transmissió extraordinàries. Més del 99% del trànsit de dades de llarga distància, tant intercontinental a través d'enllaços submarins com dins d'un mateix territori mitjançant enllaços terrestres, circula per la xarxa de fibra òptica global. El sistema té dimensions literalment astronòmiques: si tots els trams de xarxa de fibra òptica instal·lada a la Terra actualment es poses-sin enganxats l'un darrere l'altre, el cable resultant arribaria des de la Terra fins a més lluny de Saturn. I no cal dir que els quilòmetres instal·lats segueixen creixent a bon ritme.

És clar, doncs, que la xarxa d'Internet actual en general i també les tecnologies de visualització d'informació mitjançant pantalles que fan possible les prestacions dels telèfons mòbils actuals, amb tot el que això representa en termes de relacions laborals, socials, culturals, econòmiques i de tota mena, no serien possibles tal com les coneixem sense l'existència de la xarxa fotònica global.

Altres exemples de l'impacte de tecnologies d'origen fotònic a les societats actuals són els múltiples estris que contenen tecnologies fotòniques que s'utilitzen a la medicina, tant a hospitals com a altres centres de salut, per a diagnosi, cirurgia i teràpia. Un exemple mèdic que molta gent ha experimentat directament són les cirurgies oculars basades en tècniques làser d'ultraprecisió, que no fa gaires anys eren ciència de frontera, però que actualment es realitzen amb seguretat i satisfacció de la gran majoria de pacients, fins al punt que durant la darrera dècada han esdevingut pràctica rutinària a moltes clíniques especialitzades.

Així mateix, altres exemples es troben a l'extensíssim nombre de processos industrials a múltiples sectors que utilitzen sistemes de visió digital, automatització i equips làser per realitzar tota mena de funcions.

La raó de la ubiqüitat i el poder de la fotònica és l'extraordinària versatilitat dels fotons per realitzar tota mena de funcions i alhora fer-ho amb una delicadesa i precisió que sovint cap altra tecnologia no pot oferir. En l'àmbit purament científic, aquesta extraordinària versatilitat, delicadesa i precisió proporcionen un instrument únic per a l'exploració de fenòmens que altrament serien inaccessibles a la nostra observació. En part conceptualment però en part literalment, la situació seria anàloga a observar objectes astronòmics sense disposar de telescopis o a conèixer del cert l'existència i la funció dels anomenats microbis sense disposar de

microscopis. De fet, aquesta és la situació en la qual la humanitat es trobava des de sempre fins fa relativament poc en termes històrics. En el primer cas, les coses es trobaven massa lluny per ser observables; en el segon, eren massa petites. En ambdós casos, els detalls de la seva presència eren inaccessibles als sentits humans. Per tant, l'existència i les propietats dels corresponents elements eren, en tot cas, assumpte de la branca de la filosofia anomenada metafísica.

En aquesta línia, hi ha una part del món que, malgrat ser molt propera, fins fa poc era només parcialment accessible a l'exploració humana. Es tracta de la que involucra elements extremament petits i fugissers, com ara els àtoms que formen la matèria; o elements petits i fràgils a la vegada, com ara el contingut de l'interior del nucli d'una cèl·lula viva o els anomenats motors moleculars, que són les màquines i els mitjans de transport del món biomolecular; o fenòmens localitzats en espais extremament petits que tenen lloc en temps extraordinàriament breus, com ara l'absorció de llum solar en la fotosíntesi en una sola molècula o el procés d'intercanvi d'electrons durant la formació d'enllaços químics entre dos àtoms; o fins i tot casos menys extrems, com ara els materials intrínsecament bidimensionals (el famós grafè és el cas més notori), l'estudi precís dels quals requereix les darreres tecnologies disponibles a escala nanomètrica.

Els materials rigorosament nanomètrics, degut a la seva naturalesa, presenten propietats extraordinàries que rarament s'observen en materials macroscòpics en condicions ambient. Similarment, els àtoms obeeixen unes lleis, les de la mecànica quàntica, radicalment diferents d'aquelles a què estem acostumats a escala humana. Són lleis que poden arribar a ser paradoxals si es parteix de la concepció que el món atòmic hauria de tenir un comportament semblant al que nosaltres estem acostumats. El fet, però, és que el que sembla equivocat és aquesta darrera expectativa: tots els experiments realitzats durant els darrers trenta anys, sovint amb un paper clau de la fòtonica, indiquen que la física quàntica descriu amb precisió extraordinària el món a escala atòmica. Sembla que l'expectativa equivocada era esperar que els àtoms, que sovint visualitzem com a petites pilotetes, seguissin unes lleis semblants a les que governen les boles que s'utilitzen per jugar a la petanca.

En aquest context, en alguns mitjans de comunicació sovint s'escriu que «Einstein no tenia raó» atès que tots els experiments que es van realitzant per posar a prova les prediccions més estranyes de la mecànica quàntica donen resultats consistents amb les prediccions d'aquesta. En rigor, però, els arguments d'Einstein que s'invoquen no qüestionaven la validesa de la mecànica quàntica entesa com a formalisme pràctic per predir el comportament de la natura a escala atòmica, sinó que preguntaven si la interpretació anomenada de Copenhaguen, que separa per principi el comportament del món atòmic del món macroscòpic a través de l'anomenat col·lapse de la funció d'ona que té lloc en el «procés de mesura», era

la darrera paraula. Efectivament, a efectes pràctics la pregunta no sembla tenir importància atès l'espectacular acord entre prediccions teòriques i mesures experimentals observat fins a l'actualitat —potser quan es descobreixi una manera de fer compatibles la relativitat general i la mecànica quàntica podrien aparèixer prediccions noves. Això no obstant, s'ha d'entendre que Einstein no estava preocupat per les implicacions pràctiques sinó pel significat profund de les coses. Durant els darrers anys s'han fet progressos importants per aprofundir en el tema però la qüestió no està encara tancada de manera totalment satisfactòria.

En qualsevol cas, ni per als científics més brillants i profunds i encara menys per als comuns dels mortals, no és gens fàcil fer-se una idea intuïtiva de l'escala del món atòmic i del que representa explorar-ne el funcionament. Els humans no estem preparats per copsar fàcilment l'extrema petitesa o brevetat de les coses quan es tracta d'escals molt allunyades d'aquelles a què estem acostumats a la vida quotidiana. L'evolució durant centenars de milers d'anys ha fet que el cervell dels homínids actuals estigui ben adaptat per processar la velocitat de carrera d'un lleó a la sabana africana o, modernament, per estimar el marge de temps que els *sapiens* conductors de vehicles tenen per evitar col·lisions amb altres congèneres en realitzar un avançament a poc més de 100 quilòmetres per hora.

En canvi, res en absolut no ens ha preparat per tenir una sensació intuïtiva del fet que a l'espai buit la llum viatgi a 299.792.458 metres per segon (que són una mica més de 1.000.000.000 de quilòmetres per hora); que els enllaços químics a nivell atòmic es facin i es desfacin en uns intervals de temps d'unes desenes de femtosegons (per definició, en un segon hi ha 1.000.000.000.000.000 de femtosegons); que els processos d'ionització en els quals un electró és excitat i reabsorbit pel mateix àtom triguin centèsimes d'atosegon (un atosegon és mil vegades més breu que un femtosegon; i en un sol segon hi ha tants atosegons com segons hi ha hagut des del big-bang fins ara); o que a uns pocs grams de la majoria de substàncies quotidianes hi hagi, uns quants trilions amunt o avall, 602.214.150.000.000.000.000 d'àtoms.

Aquestes xifres són tan allunyades de la nostra experiència quotidiana que no en podem apreciar fàcilment el significat. Per exemple, l'anomenat nombre d'Avogadro, tot just mencionat, és una conseqüència que els àtoms són, realment, inconcebiblement petits. Són tan petits que: *hi ha més àtoms a un got d'aigua que gots d'aigua a tots els oceans de la Terra junts*. El càlcul es fàcil de fer, atès que el volum total d'aigua continguda als oceans de la Terra és una quantitat coneguda amb un marge d'error petit. Si, imaginàriament, encarreguéssim a un amiga que omplís un got d'aigua àtom a àtom i que, per cada àtom que ella diposita al got, una altra amiga tragués un got d'aigua del mar, la segona hauria eixugat tots els oceans de la Terra quan la primera tot just hauria acumulat una quantitat d'aigua encara pràcticament invisible al fons del seu got. Convé relle-

gir aquesta frase un parell de vegades davant d'una platja per intentar apreciar la magnitud de la cosa.

Malgrat tot, i per increïble que sembli, avui en dia es disposa de sistemes fotogràfics que aïllen, observen i manipulen mitja dotzena d'àtoms a voluntat i, si s'escau, àtoms individuals (figura 1), o que fan imatges de l'interior de cèl·lules vives mentre s'observa la seva evolució, o que visualitzen els processos d'emissió i absorció d'electrons a un àtom que duren una fracció d'un femtosegon. Concretament, amb fotons làser es fan: pinces extremament delicades capaces d'atrapar de manera no invasiva des de material biològic viu fins a àtoms individuals; mecanismes per frenar i per tant refredar àtoms a temperatures properes al zero absolut (-273,15 °C); eines per controlar i manipular objectes quàntics individuals; flaixos de llum ultracurts que permeten monitoritzar el procés dinàmic d'ionització dels àtoms en què els electrons són excitats i posteriorment reabsorbits; feixos de llum ultraprecisos que actuen de nanobisturís; sistemes d'imatge de superresolució de detalls extremament petits en materials *in vivo*; fonts d'energia externa per a nanomotors o nanorobots, i un llarg etcètera.

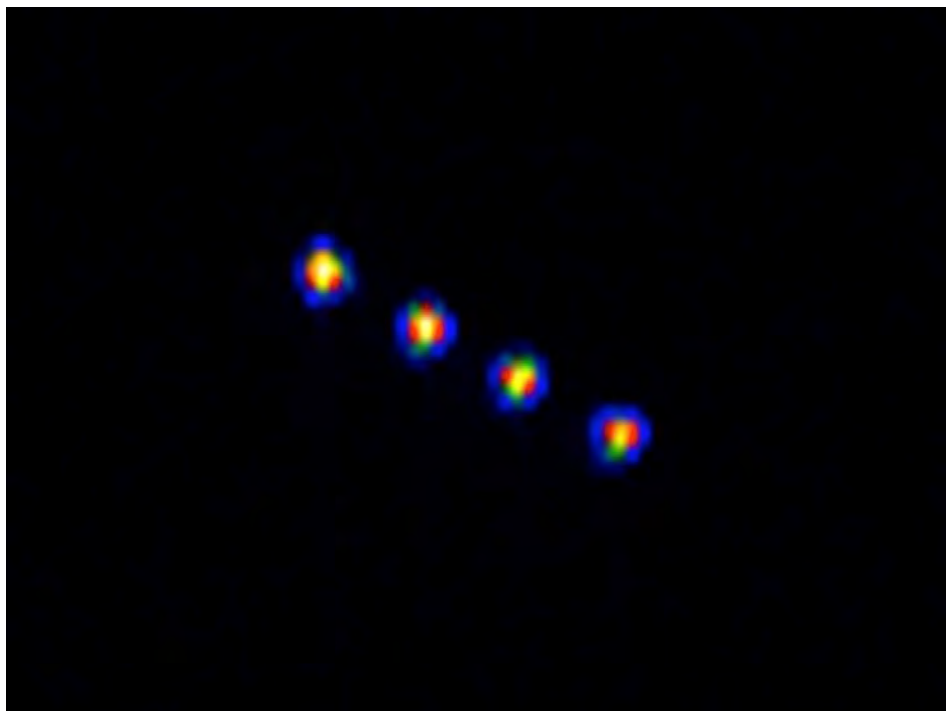


FIGURA 1. Foto (fals color) de 4 ions de calci 40 atrapats, gairebé quiets i controlats a temperatures ultrafredes. © ICFO.

Actualment, aquestes tecnologies es troben disponibles a molts laboratoris de recerca del món, però que per arribar a aquesta situació ha calgut avançar espectacularment la frontera del coneixement ho mostra el fet que els corresponents avenços han merescut un parell de dotzenes de premis Nobel de Física i de Química durant les darreres dècades.

Com és habitual, algunes de les funcions que es persegueixen, com ara les pinces de llum o l'anomenada teleportació (figura 2), les havien imaginat primer els creadors de ciència-ficció. Atrapar naus espacials amb llum o teleportar matèria no és possible amb les lleis conegudes de la física, però atrapar suaument cèl·lules vives individuals amb un delicat feix de llum o teleportar l'estat d'un sistema quàntic senzill, ja són una rutina als laboratoris de recerca especialitzats del món en l'actualitat.

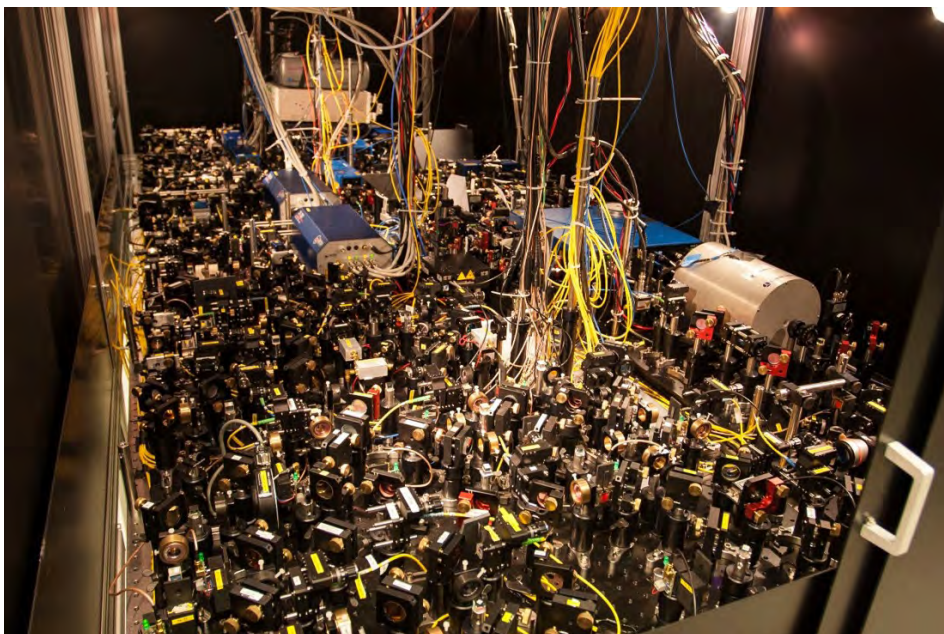


FIGURA 2. Detall d'un sistema fotònic preparat per realitzar teleportació d'estats quàntics. © ICFO.

En alguns casos, la tecnologia ha madurat tant que actualment s'utilitza per a diversos altres propòsits en indústries, hospitals i clíniques. Precisament, els làsers que mencionàvem més amunt per a aplicacions en oftalmologia fan flaixos de llum d'uns pocs femtosegons, cosa que els permet fer la seva funció en cirurgia ocular de manera espectacularment precisa i sense malmetre el teixit ocular sobre

el qual no es vol actuar. En altres casos, en canvi, la tecnologia necessària no existeix sinó que la seva creació i desenvolupament són frontera en ella mateixa, de manera que evoluciona en paral·lel a la ciència a la qual ajuda a treure l'entrellat.

Més enllà de l'interès dels científics, una persona no especialista es podria preguntar: per què és tan important explorar aquesta part del món?

La resposta és que, en darrer terme, és on conflueixen moltes de les grans preguntes científiques que té plantejades la humanitat. Per esmentar-ne només algunes: com comencen les malalties a nivell molecular i intracel·lular? Què els passa als components íntims de les cèl·lules quan aquestes emmalalteixen? Què els passa als elements constitutius de les neurones i de les seves xarxes sinàptiques quan envelleixen? Com es desenvolupen, exactament, els processos de la fotosíntesi? Es poden fabricar materials barats, no tòxics i abundants que capturin, de la forma que sigui, els fotons que venen del Sol de manera molt més eficient que els actualment coneguts? Com es poden obtenir, en termes generals, materials i sistemes sostenibles que permetin el futur desenvolupament de la civilització sense malmetre el medi ambient? Es poden obtenir materials, segurament «artificials» (en el sentit que no es donen de manera espontània a la natura) que siguin superconductors o superfluids o que tinguin altres superproprietats a temperatura ambient? Com ocorren els extraordinaris fenòmens que tenen lloc al món quàntic, com ara l'anomenada teleportació o la superposició en diversos estats possibles? En quines condicions a escala atòmica la realitat objectiva no està ben definida, tal com prediu la mecànica quàntica i que incomodava tant Einstein, com abans s'ha mencionat? Es poden aprofitar aquesta mena de fenòmens tan diferents dels que coneixem a la vida quotidiana per fer tecnologies pràctiques?

Parem-nos un moment en la darrera qüestió. El terme *tecnologies quàntiques* es refereix a la utilització de les propietats més genuïnes de les lleis de la mecànica quàntica, que són les que descriuen el món a escala atòmica, per tal de realitzar funcions impossibles d'assolir amb tecnologies dissenyades a partir de les lleis tradicionals que descriuen el món a escala macroscòpica. Les aplicacions que actualment s'estan desenvolupant se centren en la creació dels anomenats sistemes de comunicacions i criptografia quàntics, ordinadors i simuladors quàntics, i diversos sensors i aparells especialitzats de metrologia.

La mecànica quàntica es va descobrir i desenvolupar durant les primeres dècades del segle xx. Alguns dels seus conceptes i, sobretot, les seves implicacions en la interpretació de la realitat són fortament contraintuïtius des d'una perspectiva de la vida quotidiana. Això no obstant, ben aviat es van obtenir èxits espectaculars a l'hora d'explicar l'estructura íntima de la matèria. De fet, l'aplicació de les lleis de la física quàntica va fer possible el que actualment s'anomena la primera revolució quàntica, que entre altres coses va permetre la comprensió i utilització dels materials semiconductors i per tant l'aparició del transistor i de l'electrònica en la

forma que la coneixem avui. Un altre producte de la primera revolució quàntica és el mateix làser i totes les seves aplicacions. El transistor i el làser, cor de l'electrònica i la fotònica respectivament, han fet possible les tecnologies de la computació i les comunicacions que coneixem, i per tant la societat digital, connectivitat arreu i Internet global que es mencionava més amunt. Així mateix, diversos dels aparells d'imatge avançada i de diagnosi utilitzats rutinàriament en els hospitals, com ara els aparells de ressonància magnètica i els de tomografia (per exemple, els TAC i els PET), així com instrumental quirúrgic o algunes teràpies per a oncologia, són producte de la utilització de les tècniques derivades de la primera revolució quàntica.

En aquests moments s'està incubant l'anomenada segona revolució quàntica, que es troba en plena ebullició als laboratoris científics de tot el món desenvolupat. Aquesta revolució es basa a emprar les parts més íntimes de les lleis quàntiques, aquelles que fan possible els anomenats gats de Schrödinger, en els quals la matèria es troba en la superposició simultània de múltiples estats o la realització pràctica de la teleportació d'informació (encara que no de matèria).

El potencial dels conceptes quàntics es basa en les propietats més delicades de la matèria a escala atòmica, delicadesa que al mateix temps constitueix el desafiament més important per desenvolupar les tecnologies associades a escala industrial. Diversos dels científics que van descobrir la mecànica quàntica van expressar dubtes que la humanitat pogués mai controlar la matèria amb el grau de precisió que requereix la segona revolució quàntica, degut a l'extrema petitesse dels àtoms il·lustrada més amunt. Això no obstant, durant les últimes dècades s'han fet avenços inimaginables a mitjans del segle passat que fan que avui als laboratoris d'investigació es pugui treballar de manera quotidiana amb uns pocs sistemes atòmics individuals i fer que evolucionin de manera controlada seguint les lleis de la mecànica quàntica. Aquesta capacitat, que ha donat una dotzena de premis Nobel durant els últims anys, és la que permet abordar el desafiament de portar les tecnologies quàntiques a la indústria i a la societat durant el segle XXI.

Constatada aquesta realitat, a l'abril de l'any 2016, la Comissió Europea va anunciar la creació d'un Quantum Technologies Flagship (QTF) com a part del seu programa Future and Emerging Technologies. El QTF pretén mobilitzar més de 1.000 milions d'euros, 500 dels quals seran aportats per la Comissió Europea durant deu anys (els primers fons es van atorgar durant el 2019), i la resta provindran dels estats i regions membres i de les indústries. Tot plegat té unes aspiracions generals semblants als altres dos *flagships* ja existents, dedicats a les aplicacions dels materials del tipus grafè i a la comprensió del cervell humà.

El QTF té com a objectiu mantenir Europa a la primera línia de les tecnologies quàntiques, en col·laboració quan es pugui i en competició quan calgui amb iniciatives igualment ambicioses que s'havien iniciat prèviament al Regne Unit, amb

inversions comparables a les que ara ha compromès la Comissió Europea, i amb altres que s'han iniciat als EUA i, amb un volum deu vegades superior, a la Xina. Aquesta darrera ha fet diverses apostes estratègiques, concretament una d'adreçada a la implementació d'una xarxa de comunicacions entre satèl·lits amb protecció quàntica que ja ha donat resultats de gran visibilitat. El programa de comunicacions quàntiques entre satèl·lits s'havia iniciat a l'Agència Europea de l'Espai, que va realitzar diverses demostracions preliminars, algunes de les quals a les illes Canàries. Ara els avenços xinesos han posat de manifest que Europa i els EUA han de reprendre el programa amb vigor si no volen quedar enrere.

El QTF estarà organitzat en quatre pilars verticals, dedicats a comunicacions, computació, simuladors i sensors i metrologia, i un pilar horitzontal de ciència bàsica adreçat a explorar contínuament noves idees i conceptes que puguin impactar en els pilars verticals. A més a més, els pilars verticals, que tindran objectius específics i ben quantificables, estaran lligats entre si i també amb els eixos d'enginyeria, desenvolupament de *software*, divulgació a la societat i a les empreses i formació de personal. Aquest darrer element és particularment important ja que quan les tecnologies quàntiques que es desenvoluparan en el marc del QTF arribin a les empreses es generaran nous llocs de treball per a professionals d'enginyeria, gestió de dades i proveïment de serveis, entre d'altres, que requeriran personal format amb eines i conceptes diferents dels actuals.

Un dels objectius generals del QTF a mitjà termini, amb fases que s'aniran implementant ja a partir del 2020, és la creació d'una anomenada Internet quàntica, formada per xarxes de comunicacions que gaudiran d'una capa addicional de protecció de la privacitat basada en alguns elements quàntics. La seguretat i la privacitat en les comunicacions i transaccions són d'una importància capital tant pel que fa als ciutadans com als clients, empreses o governs, sobretot en el context de les societats massivament digitals, interconnectades i hipercomunicades actuals i futures. Un objectiu específic del QTF és desenvolupar tecnologies que a mitjans de la propera dècada estiguin disponibles en l'àmbit de les xarxes metropolitananes i que a final de la dècada el concepte d'Internet quàntica es pugui començar a implementar.

Diferents tipus de sensors quàntics i aparells de metrologia ultraprecisos es troben també ja disponibles en fase de prova de concepte als laboratoris d'investigació. Els primers detecten minúsculs senyals elèctrics i magnètics o proporcionen nous sistemes d'extracció d'informació de l'entorn i d'obtenció imatges. Els segons permeten, per exemple, la construcció de sistemes de sincronització cada vegada més precisos. Cap al final de la propera dècada s'espera que el desenvolupament d'aquesta àrea impacti sobre l'anàlisi de materials, els sistemes de navegació o els de sincronització de xarxes de comunicacions i financeres, entre d'altres.

A més llarg termini s'espera desenvolupar ordinadors i simuladors quàntics. Actualment ja hi ha prototips i sistemes de lliure accés (per exemple, el que gestiona IBM) que es basen en uns pocs elements quàntics que realitzen operacions simples. Fa uns mesos, Google va anunciar un pas important en la demostració de l'anomenada supremacia quàntica, és a dir, que una màquina quàntica realitzi càlculs que cap màquina clàssica actual pugui mai realitzar. Això no obstant, encara romandran enormes desafiaments pràctics per resoldre fins a arribar a construir màquines, que necessiten alguns milers d'elements quàntics, capaces de realitzar computacions d'interès pràctic real.

La computació quàntica és un paradigma diferent de la computació digital convencional. Els ordinadors quàntics aprofiten la capacitat dels sistemes quàntics d'evolucionar en diversos estats simultàniament. En lloc d'utilitzar bits que tenen el valor 0 o 1, es basen en qbits (bits quàntics), que consisteixen en la superposició d'ambdós estats. Processant simultàniament aquests estats, un ordinador quàntic pot fer algunes operacions de manera exponencialment més ràpida que un de clàssic, per tant els ordinadors quàntics de suficient capacitat serien capaços de fer càlculs de complexitat intractable per a un ordinador convencional. Això no obstant, els fenòmens físics en què es basen són extremament delicats i per tant construir aquestes màquines en una mida gran és un repte formidable. S'espera que els anomenats simuladors quàntics arribaran primer, potser al final de la propera dècada. Els simuladors són màquines quàntiques analògiques que imiten el comportament d'un sistema quàntic concret. En el marc del QTF, s'intentarà desenvolupar simuladors del comportament de molècules complexes d'interès per dissenyar nous fàrmacs o simuladors de la possible existència de materials superconductors en condicions properes a temperatura ambient.

Les extraordinàries característiques dels fotons produïts pels làsers —pel que fa a coherència, amplada espectral, estabilitat, etc.— els fan especialment adients com a regla de mesura en els aparells que operen al límit de la precisió. Els exemples són molt nombrosos i es troben arreu en els àmbits de la ciència, des dels sistemes de detecció de molècules individuals i tota classe de dispositius nanooptoelectrònics fins a les nanobalances amb les quals es mesura directament la massa d'un virus individual. Potser l'exemple més extrem és el paper dels fotons làsers en la detecció directa d'ones gravitatòries.

Efectivament, l'interferòmetre làser és una de les peces clau del sistema LIGO que el mes de setembre de 2015 va permetre l'espectacular primera detecció directa d'ones gravitatòries, l'origen de les quals s'atribueix a la col·lisió de dos forats negres d'unes 36 i 29 masses solars cadascun. Les mesures són consistents amb una col·lisió que va alliberar més de tres masses solars en forma d'ones gravitatòries, produïda a una distància de més de mil milions d'anys llum de la Terra. Mal-

grat la immensa magnitud d'energia alliberada, el seu efecte en la posició de la Terra és extraordinàriament petit.

Per intentar mesurar l'efecte, s'utilitzen interferòmetres làser. A LIGO (figura 3), cada branca de l'interferòmetre té 4 km de llargària i permet que un feix làser dividit en dos il·lumini i sigui reflectit per dos miralls penjats de les masses de prova. Quan una ona gravitatòria passa per l'interferòmetre, la deformació de l'espai-temps fa que les branques de l'interferòmetre s'estirin i s'arronsin alternativament, de manera que els feixos de llum que es propaguen per les dues branques es desplacen distàncies lleugerament diferents, diferència que produeix un efecte d'interferència quan els dos feixos reflectits pels miralls se superposen. La interferència és, en principi, mesurable. Això no obstant, atès que la diferència de camí òptic és proporcional a l'amplitud de l'ona gravitatòria, en el millor dels casos, la diferència per mesurar és una petita fracció del diàmetre de la densitat de probabilitat d'un protó. Només les extraordinàries propietats dels fotons produïts per un làser poden donar, en principi, alguna possibilitat d'arribar al grau de precisió que es requereix.

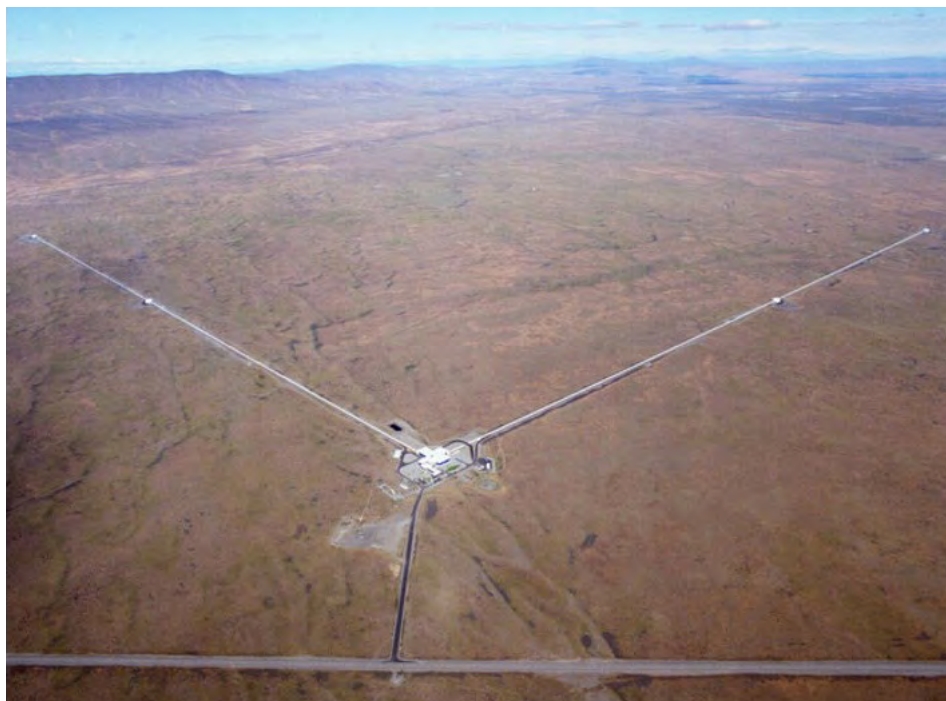


FIGURA 3. Braços de l'interferòmetre làser del sistema LIGO a Hanford, estat de Washington, Estats Units. © Caltech/MIT/LIGO Lab.

Malgrat que, en principi, la detecció sigui possible, a la pràctica posà extraordinaris desafiaments a tots els nivells, també a les característiques mecàniques i d'estabilitat de l'interferòmetre i del làser. Al portal web de LIGO al Caltech, es pot trobar una discussió detallada de les solucions adoptades per fer que les branques de l'interferòmetre fossin suficientment llargues, que la potència del làser fos prou gran i que tota l'òptica complís les especificacions requerides.

Per al que aquí ens interessa, la qüestió és que, sense l'absolutament extraordinària precisió que els fotons làsers i les tecnologies associades proporcionen, els experiments LIGO serien impossibles, potser impensables. Les evolucions, com ara els sistemes LISA, basats en interferòmetres làser entre satèl·lits, donaran resultats encara més impressionants que els experiments pioners fets a la superfície de la Terra. Tot plegat obre una finestra radicalment nova a l'observació de l'Univers.

Canviant d'àmbit, podríem ara seguir amb exemples de sistemes totalment o parcialment fotònics que s'utilitzen per avançar fronteres molt importants de la medicina, com ara l'anomenada nanomedicina o l'optogenètica. Aquestes són àrees on el desafiament tecnològic no està tan associat a la petitesa de les coses — malgrat que els objectes a tractar són molt petits! — sinó al fet que l'objectiu és actuar sobre elements d'un ésser viu, i fer-ho de manera que no en comprometi l'existència o el desenvolupament de manera no desitjada. Els desafiaments que presenten aquestes àrees d'aplicació són també formidables, sobretot degut a la seva intrínseca multidisciplinarietat i a la complexitat dels sistemes vius, i els seus avenços poden produir millores directes en la salut i qualitat de vida.

Com a conclusió, direm que hem volgut il·lustrar breument el paper insubstituïble dels làsers i les tècniques fotòniques per abordar fronteres fonamentals de la ciència que interroguen els límits espacials i temporals —en sentit ampli— de fenòmens naturals, incloent-hi els corresponents processos de localització, detecció, mesura i control, possibles a partir de les tecnologies disponibles. La motivació ha estat il·lustrar que el fet de superar els límits permet explorar fenòmens desconeguts i inaccessibles fins aleshores. Els nous territoris de coneixement als quals avançar la frontera dona accés són el lloc on, amb gran probabilitat, es dirimirà una llarga llista de preguntes que actualment no tenen resposta i que són de capital importància per a la humanitat.

Per als científics, no hi ha cap conjuntura millor que la que es presenta quan s'inicia l'exploració d'un nou territori intel·lectual. Pel camí es faran troballes que tothom considerarà importants a primer cop d'ull. A vegades, però, es trobaran coses aparentment insignificants o de dubtosa utilitat pràctica immediata degut a la seva petitesa o a la llunyania de les tecnologies quotidianes, però que el temps transformarà en pilars de la civilització.

Un exemple l'il·lustra la preciosa reflexió de J. J. Thomson sobre el seu descobriment de l'electró: «Could anything at first sight seem more impractical than a

body which is so small that its mass is an insignificant fraction of the mass of an atom of hydrogen? —which itself is so small that a crowd of these atoms equal in number to the population of the whole world would be too small to have been detected by any means then known to science». No cal ni mencionar com de diferent seria el nostre món actual sense les tecnologies basades en els electrons.

Charles H. Townes (figura 4) —qui va compartir el Premi Nobel de Física l'any 1964 amb Nikolai Bassov i Aleksandr Prokhorov pel desenvolupament del màser i, d'aquesta manera, va obrir les portes a la creació precisament dels làsers—, explica que durant els primers anys d'existència del làser tothom li deia que aquest era «the perfect solution looking for a problem», afirmació que a la vista de les extraordinàries aplicacions que ha acabat tenint ha esdevingut un clàssic en l'argumentari dels exploradors de les fronteres del coneixement quan són preguntats per la utilitat de la seva recerca. En aquesta mateixa línia, en el context de la utilitat de l'estudi dels àtoms, molècules i objectes de l'escala nanomètrica, acabarem amb la celebrada frase de Richard Feynman: «There is plenty of room at the bottom». *Plenty indeed*, i la fotònica és una de les eines fonamentals per a la seva exploració. El viatge tot just ha començat i ens depara sorpreses i aplicacions que en aquest moment no podem ni imaginar. Com deia el famós escriptor de ciència-ficció Arthur Clarke, coautor del guió de la meravellosa pel·lícula *2001: una odissea de l'espai*, «tota tecnologia suficientment avançada és indistingible de la màgia».



FIGURA 4. Charles H. Townes.
© Nobelprize.org.

AGRAÏMENTS

És un goig per a mi presentar el discurs d'ingrés a l'Institut d'Estudis Catalans, una institució ja centenària dedicada a conrear tots els elements de la cultura catalana, entre els quals em plau molt que s'inclougui la recerca científica. Els principis de rigor científic, catalanitat i obertura a l'exterior que inspiren la institució sintonitzen amb els valors que personalment miro de contribuir a promocionar.

Vull expressar el meu agraïment a tots els membres de l'Institut, particularment als de la Secció de Ciències i Tecnologia, per acceptar-me entre elles i ells. És un immens honor ser membre d'una institució que ha tingut i té entre els seus integrants les personalitats acadèmiques més destacades de Catalunya. Iniciao la participació a l'Institut amb il·lusió i amb ganes de contribuir amb tot el que pugui.

Durant la meva trajectòria acadèmica he tingut la fortuna d'aprendre de grans professors i de magnífics estudiants de doctorat i múltiples companys i col·laboradors nacionals i internacionals. Desitjo agrair-los a tots i totes els moments que ja hem viscut junts i els que viurem en el futur.

Una part central de la meua vida durant els darrers quinze anys ha estat al costat dels membres de l'Institut de Ciències Fotòniques (ICFO). Els més de mil icfonians i icfonianes m'han donat incomptables moments d'alegria i de satisfacció, que he mirat de correspondre tant com he pogut. Fer de l'ICFO un niu que nodreixi els anhels dels joves investigadors ha estat un dels meus principals objectius des de la creació de l'entitat.

Capítol específic mereix la llarga llista de persones que han donat suport de manera decisiva a les meves iniciatives, sovint pensant-les i somiant-les plegats. La llista de noms és massa llarga per incloure-la aquí. Només vull destacar el professor George Stegeman, que em va donar l'oportunitat d'iniciar-me de veritat en la recerca; el conseller Andreu Mas-Colell, qui va creure en el projecte de l'ICFO; els extraordinaris Pere Mir i Jordi Segarra, que estimo com els membres de la meua família; els altres membres del Patronat de les fundacions Cellex i Mir-Puig, Agustí Jausàs, Josep Esteve i Josep Taberner, i les seves famílies, pel seu suport i encoratjament; els rectors de la Universitat Politècnica de Catalunya Jaume Pagès, Josep Ferrer, Antoni Giró, Enric Fossas i Xicu Torres; Joaquim Boixareu, que m'ha ajudat en diversos moments importants, i l'extraordinari científic i gran amic Ignacio Cirac, els consells del qual han estat sempre de gran valor.

Dedico aquest discurs a totes aquestes persones i a la meua família. Sobretot al pare i a la mare, que trobo molt a faltar; als altres pares, Lluís i Palmira, i a la Maria Àngels, el Miquel i la Paula, que són tot amor.

BIBLIOGRAFIA

- FEYNMAN, R. P. (1960). «There's plenty of room at the bottom». *Engineering and Science* [en línia], vol. 23, p. 22-36. <[https://resolver.caltech.edu/ CaltechES:23.5.1960Bottom](https://resolver.caltech.edu/CaltechES:23.5.1960Bottom)>.
- FRANKEL, F. C.; WHITESIDES, G. M. (2009). *No small matter: Science on the nanoscale*. Cambridge, Mass.: The Belknap Press of Harvard University Press. ISBN 978-0-674-03566-9.
- GARCÍA-MATOS, M.; TORNER, L. (2015). *The wonders of light*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-47741-4.
- LIGO. *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* [en línia]. <www.ligo.caltech.edu/page/ligos-ifo>. [Portal web amb informació actualitzada dels experiments LIGO i successors, amb tota mena de detalls tècnics dels aparells i de les mesures experimentals realitzades]
- TOWNES, C. H. (1995). *Making waves*. Nova York: AIP Press. ISBN 1-56396-334.5.

