

La física quàntica, paradigma científic del segle xx¹

JOSÉ LUIS SÁNCHEZ GÓMEZ
Universitat Autònoma de Madrid

1. Introducció. Apareixen els quanta

El concepte de quantum es va introduir fa poc més d'un segle, el 14 de desembre de 1900, quan Max Planck va presentar davant de la Societat Alemanya de Física una comunicació on incloïa una fórmula que explicava la distribució en freqüències de l'energia emesa (radiada) per un "cos negre". En aquest problema s'havia capficat un bon nombre de científics de l'època, entre els quals hi havia brillants físics alemanys. En l'esmentada comunicació es postula per primera vegada que l'absorció i l'emissió de radiació electromagnètica, en particular de llum, per un cos es realitza en quantitats discretes. De manera gràfica, podríem dir que en comptes de fer-ho de manera contínua, com s'havia cregut fins llavors, els àtoms i les molècules absorbeixen i emeten la radiació "a salts" (quanta de radiació).

Aquestes primeres idees de Planck van ser elaborades i ampliades posteriorment per Einstein, Bohr i altres científics que van culminar en la creació d'una nova branca de la física, la mecànica quàntica, a mitjan dècada dels anys vint, després dels treballs fonamentals de diversos investigadors, entre els quals destaquen l'alemany Werner Heisenberg, l'austriac Erwin Schrödinger i el britànic Paul Dirac.

No insistirem en l'evolució de les idees quàntiques durant aquest període ni en l'aplicació a la descripció atòmica i molecular de la matèria (això es tracta en una altra part d'aquest *Anuari*). En aquest article, tractem de presentar primer, en la mesura del que és possible sense tecnicismes, una breu exposició d'alguns problemes fonamentals de la física quàntica que involucren aspectes filosòfics i epistemològics de la realitat física descrita per aquesta teoria. Després, intentarem descriure succintament les implicacions de la teoria quàntica en dues àrees en la frontera del coneixement actual: la física de partícules elementals, especialment en relació amb la cosmologia, i la teoria de la informació.

La mecànica quàntica i la teoria de la relativitat són els dos autèntics paradigmes de la física del segle xx. La teoria de la relativitat és més popular, per la personalitat d'Einstein i per la relació que usualment s'estableix entre la seua famosa fórmula $E = mc^2$ i la bomba atòmica; tanmateix, la mecànica quàntica és, de bon tros, la teoria més representativa de la física moderna i la que s'aplica més en diverses branques de la ciència, d'enorme interès pràctic i de notable incidència socioeconòmica. Per citar-ne uns exemples, no cal més que pensem en els làsers, els dispositius superconductors o la

¹ Traducció del castellà d'Andreu Beltran.

RMN (ressonància magnètica nuclear). Evidentment, no podem donar ni tan sols una mínima idea de totes aquestes aplicacions; per això ens limitarem, com apuntàvem més amunt, a presentar un esbós del que hom considera que seran molt probablement els dos temes capdavanters de la investigació en el camp de la física fonamental en les primeres dècades d'aquest nou segle: *a)* el món quàntic més petit, les partícules elementals, i la seua relació, fins fa pocs anys insospitada, amb el més gran dels móns, l'univers; *b)* les aplicacions i les implicacions quàntiques en el camp de la teoria de la informació, en concret l'aparició d'una nova branca d'investigació, que molt probablement, prompte adquirirà caràcter interdisciplinari, coneguda com la "teoria de la informació quàntica". Abans, però, hem d'introduir, encara que siga amb l'obligada brevetat, els conceptes quàntics bàsics i analitzar algunes de les qüestions epistemològiques més dificultoses que plantegen aquests conceptes.

2. La mecànica quàntica, una teoria fructífera però estranya

La física del nostre temps no seria el que és sense la mecànica quàntica, una teoria que ens permet adquirir una comprensió del microcosmos, del món de les molècules, dels àtoms, de les partícules elementals de la matèria; coses impensables fa tan sols vuitanta anys. De fet, la mecànica quàntica va nàixer com una teoria per explicar el món atòmic, però avui dia la majoria dels físics pensen que és més: una teoria *universal*, amb uns principis que comprenen la natura a totes les escales, del *quark* al *cosmos*. I és aquesta grandesa la que d'alguna manera li ocasiona una certa "misèria" en forma de serioses dificultats epistemològiques. (Abans de seguir, cal advertir que un bon nombre d'investigadors pensen que aquestes dificultats no es poden atribuir pròpiament a la teoria quàntica, perquè com a teoria està estructurada perfectament, des dels punts de vista lògic i matemàtic. S'han de considerar més aviat dificultats de la nostra intuïció, com a ens "clàssics" incapaçs d'aprehendre el món quàntic. Confiem que aquest modest assaig servirà d'alguna manera al lector per tal de formar-s'hi una opinió).

Quina és la raó de l'estranyesa de la mecànica quàntica?, què fa que aquesta teoria es trobe tan lluny de la intuïció humana? En poques paraules, és estranya perquè els conceptes quàntics fonamentals, en general, no tenen referents en la nostra percepció sensorial del món.

L'element central de la teoria quàntica és el "vector d'estat", un "objecte" d'un espai matemàtic, l'espai de Hilbert, que no té connexió directa amb l'espai-temps de les nostres percepcions. El vector d'estat, una de les possibles representacions del qual és l'anomenada "funció d'ona", acumula tota la informació possible sobre un sistema físic determinat. És pot accedir a part d'aquesta informació mitjançant mesures sobre el sistema en qüestió, però tot el que *a priori* podem saber, en general, sobre l'esmentat sistema és donat en termes de probabilitats. Aquestes probabilitats són *irreductibles*, és a dir, hi ha una absoluta impossibilitat, que va més enllà dels naturals errors pràctics, de conèixer amb exactitud totes les propietats imaginables de sistema. És el contrari del que ocorre amb la física clàssica, on les esmentades propietats (posició i velocitat d'una partícula, per exemple) es podrien arribar a conèixer, almenys en teoria, per mitjà de mesures suficientment precises. Aquesta és una de les limitacions fonamentals que imposa la

teoria quàntica sobre el nostre coneixement de la natura, limitació que apareix de manera explícita en el famós *principi d'incertesa* (o *indeterminació*) de Heisenberg, el qual en sentit estricte no és un principi sinó un teorema matemàtic demostrable a partir dels postulats de l'esmentada teoria.

El principi de Heisenberg, que estableix la impossibilitat *absoluta* de conèixer amb exactitud els valors simultanis de certes magnituds (magnituds conjugades), per exemple, la posició i la velocitat d'una partícula, no és més que una conseqüència particular d'una llei més general, que es deu a un dels fundadors de la teoria quàntica, Niels Bohr, i que és coneguda com el "principi de complementarietat". Segons aquest principi, descripcions que permeten la màxima informació sobre les propietats d'un sistema, possibles en la física clàssica, no ho són en el domini quàntic. Aquestes descripcions són "complementàries", i el fet d'usar-ne una o una altra depèn del tipus de mesura o d'observació que es realitzi sobre el sistema. En conseqüència, la descripció més precisa que pot proporcionar la teoria quàntica de la realitat mai no serà completa en el sentit "clàssic". És a dir, no totes les magnituds físiques que, almenys en principi, són susceptibles de coneixement precis segons la física clàssica ho són en la teoria quàntica i això es deu a la complementarietat (no cal pas pensar que això represente cap superioritat real de la física clàssica, ja que la natura es regeix al nivell més profund per les lleis quàntiques).

Bohr creia que en el principi de complementarietat es resumien totes les peculiaritats de la teoria quàntica. Encara més: creia que aquest principi era d'aplicació universal, més enllà de les fronteres de la física, fins arribar a la biologia i fins i tot a la psicologia. Les seues idees es troben ben reflectides en les paraules següents, aparegudes en un article de l'any 1931 titulat «Light and Life» (llum i vida) publicat a la revista britànica *Nature*.

Si tractem d'investigar els òrgans d'un animal fins al punt de poder arribar a descriure el paper que juguen els àtoms en funcions vitals, indubtablement hem de matar aquest animal... Segons aquest punt de vista, l'existència de vida es pot considerar un fet elemental que no es pot explicar, sinó que s'ha de prendre com un punt de partida en biologia, de manera similar a la manera en què el quantum d'acció, que apareix com un element irracional des del punt de vista de la física clàssica, constitueix, juntament amb l'existència de partícules elementals, el fonament de la física atòmica.

Cal que resumim el sentit de la complementarietat que, com ja s'ha dit, constitueix una de les característiques essencials de la teoria quàntica. En general, no és possible conèixer simultàniament totes les propietats d'un sistema físic que, segons la física clàssica (i la intuïció humana), en proporcionen una descripció completa, perquè entre aquestes propietats n'existeixen algunes d'associades a magnituds físiques conjugades (en llenguatge tècnic, a operadors que no commuten entre si), les quals no es poden determinar simultàniament amb exactitud *ni tan sols en teoria*. Les possibles descripcions del sistema, en termes d'un conjunt o altre d'aquest tipus de magnituds són *complementàries* (terme emprat per Bohr; cal notar, però, que aquesta no n'és l'accepció usual) i poder usar una descripció o una altra dependrà del tipus de "qüestions" que es formulen sobre el sistema; en darrera instància, del tipus d'observació que es faça sobre el sistema.

L'experiment conegut com "de la doble esclletxa" il·lustra amb prou claredat la complementarietat quàntica. Vegem-ne breument una versió idealitzada (els dispositius usats a la pràctica són, és clar, tècnicament més complicats):

Es tracta d'un "canó" que emet electrons en direcció a una pantalla en la qual s'han fet dues esclletxes per on aquests la poden travessar. Els electrons són detectats, després de travessada la pantalla, per mitjà de les espurnes que produeixen en una altra pantalla paral·lela a l'anterior i dissenyada a l'efecte; vegeu la figura 1.1, presa d'*El universo quàntic* (obra citada a la bibliografia).

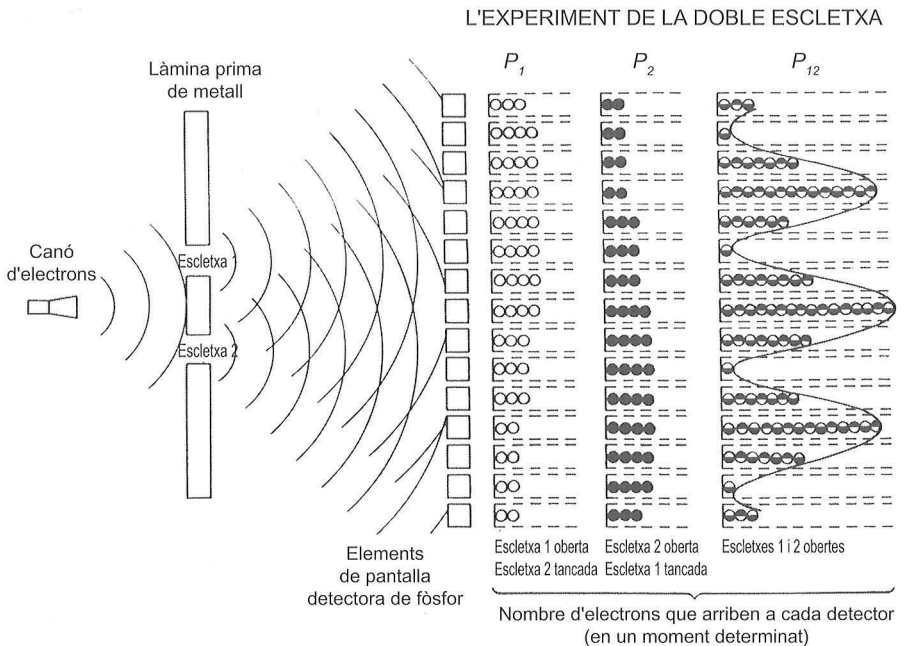


Figura 1.1. Esquema de l'experiment de la doble esclletxa

Cal que remarquem que els electrons produeixen espurnes perfectament localitzades, és a dir, en el moment de la detecció es comporten realment com a partícules, cada un arriba a un punt determinat; a més, si es redueix la intensitat del canó d'electrons, igualment s'observen espurnes quasi puntuals, però amb un ritme menor. Ara bé, si es mantenen obertes les dues esclletxes, la distribució d'electrons detectats presenta característiques típiques de la interferència ondulatoria, de manera que els electrons, en el viatge del canó a la pantalla detectora, sembla que es comporten com ones, passen pels dos forats *alhora*. Per tant, si es vol analitzar la propagació espaciotemporal dels electrons s'ha d'utilitzar una descripció ondulatoria, mentre que si es tracta d'entendre com es detecten s'ha d'usar una descripció corpuscular. (*Dedució*: l'electró no és un corpuscle ni una ona; en algun sentit, és les dues coses alhora o, més bé, és una o l'altra, i això depèn del tipus de qüestió que s'hi formule, és a dir, depèn de l'aspecte experimental que es considere). En

conseqüència, qualsevol cosa aparentment objectiva i intrínseca de l'entitat microscòpica que s'analitza no ho és en realitat, ja que depèn del tipus d'observació que es realitzi.

Encara més, si mantenim tancada una de les dues esclatxes, la distribució d'electrons a la pantalla no presenta cap tipus d'interferència, és a dir, l'aspecte ondulatori de la propagació que apareixia en el cas anterior desapareix. És així perquè en tancar una esclatxa sols queda una manera per la qual l'electró pot aplegar a la pantalla detectora, de forma que desapareix la possibilitat d'interferència entre les dues possibilitats, que és el que donava lloc al comportament ondulatori en la seua propagació. Sorgeix, doncs, de nou una de les més (si no la més) misterioses característiques de la teoria quàntica, sobre la qual, insistir-hi no és ocios: les propietats "intrínseques" d'una entitat física, en aquest cas de l'electró, depenen en general del tipus d'experiment o d'observació que s'hi duga a terme, de manera que, al nivell més profund, la realitat física no és tan objectiva com ho seria d'acord amb els principis de la física clàssica (i, d'alguna manera, del "sentit comú").

3. Un aspecte essencial de la teoria quàntica: mesura i observació

Del que s'acaba de dir es dedueix que el procés de mesura o, més generalment, d'observació té una funció decisiva en la teoria quàntica; els "pares fundadors" d'aquesta teoria ja se'n van adonar. Von Neumann va elaborar el 1932 la primera teoria quàntica de la mesura. El fet que la mecànica quàntica necessite una "teoria de la mesura", almenys en la seua interpretació més estesa, l'anomenada "interpretació ortodoxa" o "interpretació de Copenhaguen" (lloc on es va fonamentar, sota els auspicis de Niels Bohr), és quelcom sense parangó a la física clàssica. La raó d'això és que mentre en la física clàssica el procés de mesura no representa res essencialment diferent de qualsevol altre procés físic, en la mecànica quàntica (almenys segons l'esmentada interpretació de Copenhaguen, que segueixen la majoria dels físics) la mesura o l'observació d'un sistema és un procés molt diferent del de la seua evolució entre dues observacions realitzades sobre aquest sistema. Tractarem d'explicar els punts essencials d'aquesta qüestió de la manera més senzilla que es puga (sense emprar-hi les matemàtiques resulta una mica difícil). Sempre ens referirem a mesures ideals, perquè totes les dificultats apareixen ja en aquest tipus de mesures, i d'aquesta manera evitarem aspectes tècnics irrellevants des del punt de vista que es considera ací.

Imagineu-vos un sistema quàntic (un àtom, per exemple) i que volem determinar, mitjançant una mesura, el valor d'una de les seues variables. Imagineu també que aquesta variable presenta caràcter dicotòmic. Hi ha, per tant, almenys dos estats quàntics possibles: els que corresponen als dos valors de l'esmentada magnitud. Ara bé, és característic de la mecànica quàntica que un estat igualment possible, i tan "legal" com els dos anteriors, seria el que resultaria d'una superposició, combinació lineal d'aquests. Si l'àtom es trobava en tal estat, en interactuar amb l'aparell de mesura, aquest darrer que, recordeu, és un sistema ordinari —quelcom de dimensions a la nostra escala—, es trobaria, pels inexorables principis quàntics, també en una superposició d'estats. Per exemple, si l'essencial de l'aparell de mesura fóra una agulla que es mou cap a la dreta o cap a l'esquerra quan aquest aparell interactua amb l'àtom en un o l'altre dels estats citats al principi (indicant

així el valor de la magnitud atòmica en qüestió), l'estat de l'agulla després de la corresponent interacció amb l'àtom, quan aquest es troba en l'estat "superposat", no tindria cap referent sensorial, ja que, per dir-ho d'alguna manera, representaria una agulla que es troba *ahora* a la dreta i a l'esquerra, o, expressat amb propietat, no estaria enlloc, perquè en realitat no podria definir-se la seua posició. No obstant això, *en observar* l'agulla, aquest estat quàntic tan estrany "desapareixeria", i el que es veuria (o, més apropiadament, s'enregistraria) és que l'agulla es troba a l'esquerra o a la dreta, segons siga el cas; de manera que la probabilitat d'una situació o l'altra, que s'obtidria amb la realització d'un nombre adequadament elevat d'experiments d'aquest tipus (contant les vegades que l'agulla es mou cap al costat corresponent), quedaria determinada per l'estat "superposat" inicial d'acord amb les lleis quàntiques, lleis que han estat verificades experimentalment de manera incontestable.

És convenient advertir a l'exemple anterior els següents aspectes: primer, la mecànica quàntica en un cas individual concret no pot predir cap a on es desviarà l'agulla, sinó sols la probabilitat d'aquest fet (recordeu que s'afirma que açò no és una limitació de la teoria sinó quelcom consubstancial a la naturalesa de la realitat); i segon —i ben important—, la mecànica quàntica no explica l'existència d'*esdeveniments individuals*, com ara que l'agulla estiga decididament a la dreta o a l'esquerra, ja que, com s'ha comentat més amunt, l'estricta estat quàntic sistema-aparell després de la interacció no permet assignar cap posició definida a l'agulla. Això mateix ocorre a l'experiment de la doble esclatxa: al final només és possible calcular la probabilitat que l'electró arribe a un punt determinat de la pantalla detectora. A més, el fet que cada electró acabe produint un esclat en aqueixa pantalla, perfectament localitzat, és una cosa que, en el fons, no es pot "explicar" a partir de les lleis quàntiques.

No obstant això, és un fet que els electrons espurnegen individualment en ser detectats a la pantalla, de la mateixa forma que les agulles de mesura (els objectes en general) es troben en posicions definides. Per explicar aquests fets, els "pares fundadors" de la teoria —en particular l'esmentat von Neumann— van introduir l'anomenat "col·lapse de l'estat quàntic" o de la funció d'ones (un fenomen més enllà de la llei quàntica fonamental de l'evolució dels estats, l'equació de Schrödinger). Aquest fenomen és el responsable de que després de la mesura, que sempre comporta finalment una observació, la superposició d'estats es resolga donant lloc a un d'entre els estats de la superposició (agulla a la dreta o a l'esquerra en l'exemple anterior). La probabilitat de cadascuna de les possibles situacions finals és calculable a partir de les lleis quàntiques, com s'ha apuntat anteriorment. La paradoxal situació que açò comporta va ser posada de manifest per Schrödinger mitjançant un famós experiment ideal (o "mental") que es coneix com l'experiment "del gat de Schrödinger", que, encara que ha estat descrit en uns quants llibres i articles, potser convé comentar, si més no breument. Vet ací una transcripció d'una part de l'article de Schrödinger (1935) de la revista alemanya *Die Naturwissenschaften* (vegeu una recreació artística de l'experiment a la figura 1.2):

Un gat està tancat a una cambra blindada on es troba el següent dispositiu experimental (el qual s'ha de protegir de la intervenció del gat): en un comptador de Geiger hi ha un trosset de substància radioactiva, tan petit que en el transcurs

d'una hora potser es desintegrarà un dels seus àtoms, però, tal vegada, amb la mateixa probabilitat, no se'n desintegrarà cap. Si ocorre la primera circumstància, es produeix una descàrrega al tub del comptador i per mitjà d'un relè s'allibera un martell que trenca una ampolla d'àcid cianhídric. Si es deixa que aquest sistema opere durant una hora, es podria assegurar que el gat viu si en aquest interval no s'ha desintegrat cap àtom; la primera desintegració atòmica li produiria la mort per enverinament [...].

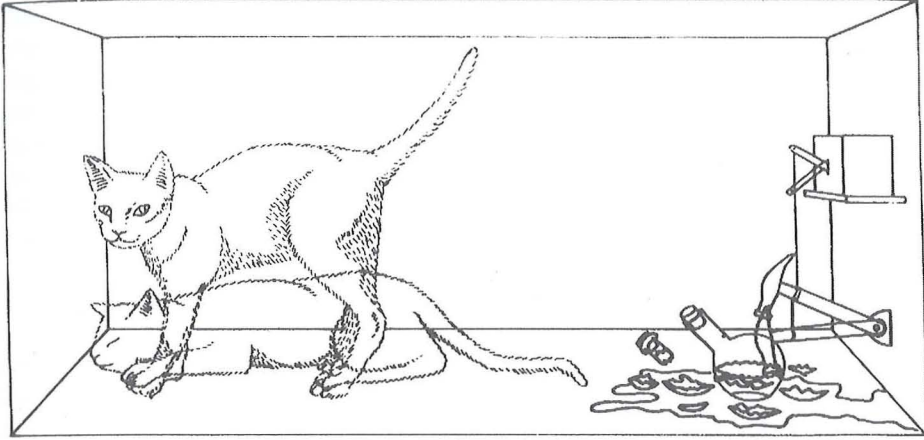


Figura 1.2. El gat de Schrödinger, ni viu ni mort

A tothom deu resultar evident que el gat ha d'estar viu o mort quan, una hora després d'haver començat, acaba l'experiment. Tanmateix, segons les regles quàntiques el sistema que roman dins de la cambra es troba en una superposició de dos estats: un dels quals conté el subestat "gat viu" (més àtom sense desintegrar, martell fix, ampolla d'àcid cianhídric intacta, etc.), mentre que l'altre conté el subestat "gat mort" (més àtom desintegrat, martell alliberat, ampolla d'àcid trencada, etc.). Ací, la paraula clau és superposició, ja que significa que l'estat total del sistema no conté res com "gat viu" o "gat mort". Dit d'una altra manera, l'infeliç animal ha d'estar, segons la interpretació ortodoxa de la teoria quàntica, en un estat, desconegut al nostre món, així com "de levitació" entre la vida i la mort. I, si seguïrem la interpretació ortodoxa, en sotmetre el sistema a l'observació, aquest estrany estat es reduiria a un dels dos reals al nostre món, "viu" o "mort". En un llenguatge no molt rigorós però expressiu, diríem que en observar-lo matem el gat o li donem la vida definitivament. Paradoxal de veres!

L'experiment del gat de Schrödinger és d'alguna manera per a la teoria quàntica allò que les paradoxes de Zenó d'Elea són per a la geometria euclidiana i la cinemàtica: no afecta l'aplicació pràctica de la teoria, però indica que hi ha quelcom que no és clar del tot en els seus fonaments epistemològics i, tal com ocorre amb aquestes paradoxes, el que s'hi planteja no s'ha resolt satisfactòriament des del punt de vista conceptual, encara que, repetim, l'estructura lògicomatemàtica de la teoria quàntica i la capacitat d'aplicació al coneixement "pràctic" del món físic romanen completament inalterades.

Les dificultats que s'acaben d'esmentar es troben d'alguna manera a la base de l'oposició que la interpretació ortodoxa de la teoria quàntica va suscitar de bell antuvi en una minoria d'il·lustres científics com ara Einstein i Schrödinger i de filòsofs com Karl Popper. En aquest sentit cal destacar Einstein, per la seua immensa talla científica i també perquè va manifestar l'oposició més sistemàtica i clara a la interpretació ortodoxa de la teoria quàntica. Aquesta oposició einsteiniana es va plasmar en un llarg debat amb Niels Bohr, que s'ha considerat un dels debats més profunds i aclaridors de tota la història de la ciència. Encara que s'ha citat *ad nauseam* la frase d'Einstein "Déu no juga als daus amb l'univers", no és en realitat l'indeterminisme de la mecànica quàntica el que originava principalment les reserves d'aquest sobre l'esmentada teoria, sinó el paper decisiu que s'hi atribueix a l'observador, la qual cosa topava frontalment amb les seues idees sobre l'objectivitat de la ciència i de l'existència d'una realitat física independent de l'acte de mesura o d'observació. En aquest sentit, Einstein admetia que la teoria quàntica era útil i important a l'hora de desxifrar les lleis del microcosmos, però afirmava que no podia ser la teoria física final, sinó sols una aproximació de tipus estadístic a una teoria objectiva i determinista més profunda. Açò es pot entendre millor si es recorre una vegada més a l'experiment del gat.

El punt essencial consisteix a saber què representa realment l'estat quàntic (la funció d'ones, si voleu). Segons la interpretació estàndard o ortodoxa de la teoria quàntica, aquest representa la màxima informació possible sobre un sistema *individual*; d'acord amb la interpretació que Einstein recolzaria, proporciona només informació estadística sobre un conjunt molt gran (en teoria, infinit) de sistemes idèntics. De manera que, si seguim aquest punt de vista, l'explicació de l'experiment citat seria que l'estat quàntic es refereix realment a una gran quantitat de cambres amb els corresponents gats, i que les lleis quàntiques simplement ens diuen quants hi són vius i quants morts al final d'un gran nombre d'experiments idèntics (un per cambra) o, si voleu, d'un experiment que involucre *totes* les cambres. Cal advertir-hi que des d'un punt de vista estrictament pragmàtic o operacional les dues interpretacions són equivalents, ja que és cert que tots els experiments reals sobre el món atòmic i subatòmic són en la pràctica de naturalesa estadística i, per consegüent, involucren necessàriament un conjunt molt nombrós d'entitats microscòpiques (molècules, àtoms, partícules elementals, etc.); tanmateix, des d'un punt de vista més profund la diferència entre aquestes és fonamental, perquè es tracta precisament de saber si la teoria quàntica proporciona o no una descripció *completa* de la realitat física.

La posició d'Einstein de defensar que la mecànica quàntica no podia ser una teoria completa ha fet de suport a la majoria dels "inventors" de teories o models de variables ocultes, encara que cal advertir que Einstein no va parlar mai en aquests termes. No ens podem estendre sobre la qüestió de les variables ocultes, que d'altra banda es pot considerar resolta en sentit negatiu; és a dir: no hi ha cap alternativa a la teoria quàntica en termes de variables ocultes *locals* que passe el sedàs de l'experiment. Per ser precisos, cal dir que de fet existeix una teoria de variables ocultes que dóna lloc als mateixos resultats que la mecànica quàntica, almenys a nivell no relativista: la teoria del potencial quàntic de David Bohm; però és una teoria *no local*, i quan s'analitza en profunditat es veu que encara que resol en part els problemes epistemològics citats, ho fa a costa de

crear-ne d'altres encara de més grans, com la introducció d'accions no locals entre parts separades d'un sistema físic. Per aquesta raó, i també degut a les dificultats d'estendre-la al domini relativista, és a dir de compaginar-la amb la teoria de la relativitat, aquesta teoria no es considera una alternativa vàlida a la quàntica. En qualsevol cas, s'ha de reconèixer que l'anàlisi crítica de la mecànica quàntica duta a terme per alguns defensors d'aquest tipus de teories ha servit per entendre aquella prou millor, gràcies a l'estímul per aprofundir en els seus fonaments, i de manera indirecta ha ajudat a progressar en dominis de la investigació científica i tecnològica tan importants com l'òptica i l'electrònica quàntiques, per citar-ne només un parell d'exemples. Encara més, les crítiques a la interpretació ortodoxa que han realitzat els que defenen que la teoria quàntica no és completa han permès, en part, la construcció recent —de fet, encara és en la fase de construcció— d'una nova visió d'aquesta teoria anomenada la formulació d'històries consistents (no podem entrar-hi), que sembla que pot resoldre moltes de les dificultats que hem exposat.

Cal que acabem el tema dels principis de la teoria quàntica. Certament, han quedat moltes coses sense tractar per raons evidents d'espai; tanmateix, esperem que almenys s'hagen reflectit els problemes principals —sobretot els epistemològics— que sorgeixen en tractar d'interpretar els conceptes essencials d'aquesta teoria. Als paràgrafs següents, analitzarem breument els dos camps d'investigació en les fronteres del coneixement actual de la física, probablement els més apassionants des d'un punt de vista bàsic: l'aplicació de la teoria quàntica al món de les partícules elementals, i algunes de les sorprenents implicacions cosmològiques, i les aplicacions quàntiques en el camp de la teoria de la informació.

4. De les partícules elementals a la cosmologia

La teoria quàntica ha aconseguit èxits espectaculars en l'aplicació a l'anàlisi de l'estructura profunda de la matèria. Encara que la primera partícula elemental descoberta experimentalment va ser l'electró, fa poc més d'un segle, es pot dir que l'estudi sistemàtic de les partícules elementals comença a partir de l'equació de Dirac el 1928. El físic teòric britànic Paul Dirac pretenia unir les dues grans teories de la física, mecànica quàntica i relativitat, i va proposar-hi una equació que descriu la dinàmica dels electrons (i altres partícules) quan la seua velocitat és comparable amb la de la llum, situació en què els efectes de la relativitat són molt importants i que la mecànica quàntica de llavors no podia tractar.

La conseqüència potser més important de l'equació de Dirac és la predicció de l'existència d'antipartícules. Així, per exemple, s'arriba a la conclusió que ha d'existir una partícula idèntica a l'electró però carregada positivament (la càrrega de l'electró és negativa). Aquesta *antipartícula*, anomenada positró, es va descobrir (Anderson, 1932) en analitzar la composició de raigs còsmics mitjançant detectors als observatoris d'alta muntanya. De fet, aquesta troballa fou l'inici d'una plèthora de troballes del mateix tipus: antiprotó, antineutró, etc., de manera que actualment es produeixen quasi rutinàriament en el laboratori un gran nombre d'antipartícules les quals s'empren per estudiar les interaccions fonamentals. I no només això, els positrons s'empren també per a tasques

més aplicades: per exemple, en física de materials (estudi de superfícies) i medicina (tomografia d'emissió de positrons). El propi Dirac, junt amb l'austríac Pauli, l'italià Fermi i alguns altres físics i matemàtics van crear a començament dels anys trenta l'anomenada "teoria quàntica de camps", una extensió de la mecànica quàntica relativista de Dirac, que incorpora els aspectes de partícula i ona de les partícules fonamentals de la matèria i que constitueix fins ara l'instrument teòric per a l'estudi d'aquestes (molt recentment s'ha introduït un concepte que va més enllà del de camp quàntic, les "supercordes", però per ara és una cosa merament especulativa —encara que interessant, sens dubte— sobre la qual no direm res).

S'ha constatat l'existència de quatre interaccions "fonamentals". Aquesta darrera paraula va entre cometes perquè hi ha raons prou fundades per suposar que es tracta de quatre manifestacions a la nostra escala (millor dit, en les condicions actuals de l'univers) d'una sola interacció, aquesta sí *fonamental*. Aquestes interaccions són: la gravitacional (o gravitatòria), l'electromagnètica, la forta i la feble.

Les dues primeres ja apareixen a la física clàssica, i les seues propietats més importants les va establir Newton (segle XVII) i Maxwell (segle XIX) respectivament. Les altres dues interaccions es van descobrir més tard, al segle XX, i la seua comprensió requereix des del principi la teoria quàntica. La interacció forta és la responsable de l'estructura nuclear, és la que manté units els protons i els neutrons en el nucli atòmic. Per altra banda, la interacció electromagnètica és la que fa que els electrons "orbiten" al voltant del nucli i d'aquesta manera donen lloc a la formació dels àtoms, i també fa que aquests s'unesquen d'alguna manera per a constituir les molècules. La interacció forta és unes cent vegades més intensa que l'electromagnètica, per això s'anomena així. La interacció feble, per contra, és molt menys intensa, com fa suposar el nom, i és la que origina la manera de desintegració nuclear per emissió de raigs beta (electrons o positrons). Una de les fites més espectaculars de la física contemporània ha estat descobrir que les interaccions electromagnètica i feble són en realitat dos aspectes d'una sola interacció, coneguda com electrofeble. Les dues semblen diferents quan les energies que actuen són les típiques dels nostres laboratoris, però a energies molt més grans les dues interaccions estan unificades. Aquestes energies hi eren de manera natural a l'univers primitiu, aproximadament una bilionèsima de segon després del "Big Bang", per això en aquella època la interacció que hi havia (a part de la gravitatòria i la forta) era l'electrofeble.

Amb la mateixa línia de raonament, actualment s'intenta construir una teoria unificada que incorpore també la interacció forta. Encara que hi ha alguns resultats prometedors, aquesta unificació no s'ha obtingut fins ara de manera satisfactòria, i en l'actualitat, aconseguir-la és un dels objectius principals de la física de partícules elementals. Una teoria "superunificada", que incloguera també la gravitació, és un afer molt més complex, ja que per a tal fi caldria una teoria quàntica d'aquesta interacció, i això comportaria quantitzar l'espai-temps, la qual cosa va més enllà del nostre coneixement actual de la física.

Després de l'esbós de les interaccions fonamentals, passarem a una breu descripció del que avui dia se sap sobre els constituents més profunds de la matèria: les partícules elementals. A continuació hi ha un compendi breu de la descripció que proporciona el conegut "model estàndard", d'inqüestionable èxit en la classificació de les partícules

fonamentals de la natura i en l'anàlisi de les seues interaccions.

Les partícules elementals es classifiquen primerament en fermions i bosons. Els primers constitueixen pròpiament la matèria, mentre que la missió dels segons és transmetre les interaccions fonamentals. Al seu torn, els fermions se subdivideixen en leptons, els quals no són afectats per la interacció forta, i quarks, que sí que són afectats. Tots aquests s'agrupen en tres "famílies" o "generacions", cadascuna de les quals constituïda per dos quarks i dos leptons. La primera, que és la rellevant per a la física "normal" (molecular, atòmica i fins i tot nuclear), està formada pels quarks *u* ("up") i *d* ("down") i els leptons e^- (electró) i ν_e (neutrí electrònic). A més, com s'ha apuntat més amunt, hi ha les seues antipartícules corresponents. La matèria ordinària està formada per àtoms, els quals al seu torn estan formats per electrons, protons i neutrons (els dos darrers constitueixen el nucli atòmic). Fins fa uns quaranta anys, es creia que el protó i el neutró eren partícules elementals, però actualment sabem que estan composts de tres quarks: el protó es "uud" i el neutró "udd". A més de la família esmentada n'hi ha —com s'ha dit— altres dues, les quals no desenvolupen pràcticament cap funció a escala atòmica o nuclear, però sí que les fan a un nivell molt més profund o, anàlogament, a energies molt altes (per això tenen importància en la cosmologia dels primeríssims instants de l'univers). Per tal de no sobrecarregar massa aquest assaig, no en parlarem. El lector que hi estiga interessat pot consultar el llibre de Steven Weinberg citat a la bibliografia.

Finalment, pel que fa a les partícules, comentarem alguna cosa sobre els bosons, que com també s'ha dit són els portadors de les interaccions. Els que s'han establert amb tota certesa experimental són el fotó, o quantum de la radiació, que transmet la interacció electromagnètica, els (8) gluons, portadors de la interacció forta, i els bosons vectorials (W^+ , W^- , Z^0), portadors de la feble. Els tres darrers i el fotó són els transmissors de la interacció unificada electrofeble. El model requereix també l'existència de l'anomenat bosó de Higgs, ja que sense aquest no és possible entendre quin és el mecanisme que fa que la interacció electromagnètica i la feble siguin tan diferents a la nostra escala, i que al seu torn està relacionat amb l'origen de la massa de partícules. Trobar aquesta hipotètica partícula és motiu de recerca en l'actualitat, i tot i que els resultats prou recents (novembre de 2000) del CERN (Centre Europeu d'Investigació Nuclear, Ginebra) semblen indicar la possible detecció, no pareix que aquests resultats puguen considerar-se concloents.

Encara que a primera vista sembla estrany, el coneixement sobre les partícules elementals comporta implicacions cosmològiques molt profundes. La raó fonamental d'aquest fet és que l'univers va començar amb el Big Bang —la "Gran Explosió"— fa uns quinze mil milions d'anys, i en els primeríssims instants (molt abans d'un segon) era d'una extensió molt petita i es componia realment de partícules elementals "soltes", incloent els fotons; és a dir, ni tan sols s'havien format encara els nuclis atòmics, ja que aquesta formació va començar a ocórrer prou segons després del Big Bang. Des de —diguem-ne— una trilionèsima de segon després del Big Bang fins al moment de la nucleosíntesi, l'evolució de l'univers es descriu raonablement bé mitjançant el coneixement actual de la física de les partícules elementals, la qual, com s'ha vist abans, es basa en els principis quàntics. La nucleosíntesi primordial, és a dir, la formació dels nuclis lleugers (hidrogen, heli i liti) a l'univers primitiu, així com la formació dels nuclis més pesants a l'interior de les estrelles, s'explica adequadament per les lleis de la física

nuclear, també en gran part producte de la teoria quàntica. Respecte del que va passar abans d'aquesta trilionèsima (més o menys) de segon, no tenim encara una teoria física fiable que ens descriga l'evolució de l'univers en aquest petit interval de temps, pot ser caldrà cercar la resposta en les teories unificades esmentades més amunt.

Però la relació de partícules elementals-cosmologia és encara més íntima —i intrigant— en altres situacions lligades estretament a l'origen i l'estructura de l'univers. En particular, les qüestions fonamentals que requereixen un coneixement profund de la física de partícules són:

1. La relació entre la quantitat de matèria visible (nombre de protons i neutrons) i de radiació (fotons) a l'univers. Per què hi ha uns mil milions de fotons per cada protó? (*explicat satisfactòriament a l'actualitat*).

2. L'existència de matèria obscura exòtica, és a dir, no constituïda per protons, neutrons i electrons, indiscutible tant des d'un punt de vista teòric com observacional (*encara no hi ha una explicació satisfactòria*).

3. Per què l'univers és tan homogeni a gran escala, és a dir, a distàncies més grans que les distàncies intergalàctiques? (*no s'entén del tot, encara que hi ha idees interessants al respecte*).

4. Quin és l'origen de les pertorbacions responsables del desenvolupament de les inhomogeneïtats a “petita” escala que van donar lloc a la formació de les galàxies? (*tampoc s'ha resolt satisfactòriament*).

Les dues primeres qüestions pertanyen quasi exclusivament al domini de la física de partícules, la qual també està involucrada en les dues darreres, encara que en aquestes tinga igualment molt a dir la teoria de la relativitat general i, en l'última, fins i tot la física de fluids. La clau de les respostes a aquestes dues darreres qüestions podria estar en l'anomenat “model inflacionari” de l'univers. Segons aquest model, proposat inicialment pel físic americà Alan Guth i elaborat en particular pel rus Andrei Linde, un instant infinitesimal (aproximadament 10^{-35} s!) després del Big Bang es va produir una enorme expansió de l'univers, absolutament inconcebible a la nostra escala, ja que aquest va augmentar exponencialment la seua grandària en una minúscula fracció de temps. Aquesta gegantina expansió, per a la qual és necessària l'existència d'un camp quàntic fonamental, va produir un “aplanament còsmic” que explicaria l'homogeneïtat de l'univers a gran escala; per altra banda, les fluctuacions quàntiques inicials d'aquest camp donarien origen a les “petites” pertorbacions necessàries per a la formació posterior de les galàxies.

No podem estendre'ns més sobre aquest tema apassionant. Hem pretès il·lustrar que la física quàntica, sobretot en l'aplicació a l'estudi de les partícules elementals, té una funció clau en cosmologia. Passem ara a un altre camp molt diferent, encara més relacionat amb la mecànica quàntica: les seues aplicacions a la teoria de la informació.

5. La informació quàntica, un món per descobrir

La moderna teoria de la informació va sorgir essencialment a partir dels treballs de Claude Shannon a finals de la dècada dels anys quaranta. Un poc abans, els físics nordamericans Bardeen, Brattain i Shockley (als laboratoris Bell) havien inventat el transistor, en gran part aplicació de la mecànica quàntica, i quasi al mateix temps John von Neumann elaborava la seua teoria dels autòmats, origen de la robòtica moderna. Sens dubte, els dos descobriments van ser decisius per al desenvolupament de les aplicacions pràctiques de la teoria de la informació (els ordinadors, per exemple). És innegable que la mecànica quàntica fa una important funció en la comprensió de quasi totes les aplicacions relacionades amb la teoria de la informació, ja que aquestes són en general producte de la física de l'estat sòlid i de la microelectrònica, el progrés dels quals es deu en gran part a la física quàntica; ara bé, cal distingir el paper d'aquesta en el desenvolupament de la instrumentació relacionada amb la informació d'allò que és realment la *informació quàntica*; la qual posseeix algunes característiques pròpies radicalment diferents de la informació "clàssica" (la usual, per entendre'ns).

La unitat estructural de la informació clàssica és el *bit* (terme derivat de *binary digit*), que representa una elecció entre dues possibilitats a les quals se'ls assigna el valor u o zero, respectivament. Les anomenades "portes lògiques", sobre les quals s'estructura la informació, es construeixen a partir d'aquest element fonamental, el bit. Doncs bé, el que distingeix essencialment la informació quàntica de la clàssica o usual és l'existència en la primera d'una unitat d'informació nova i sense possible imatge a la segona, el *qubit* (*quantum bit*). Un qubit és una combinació lineal (superposició) de les possibilitats (0,1) anteriors. Aquest tipus d'estat és purament quàntic, ja que, com s'ha comentat, tal superposició no es pot realitzar en el món clàssic. Un exemple d'aquesta classe d'estats quàntics es pot trobar de nou a l'experiment de la doble escletxa (no en va Richard Feynman, premi Nobel de Física i un dels més grans físics teòrics del nostre temps, afirmava que en aquest experiment es troben resumides pràcticament totes les peculiaritats de la física quàntica). En efecte, l'estat de l'electró quan les dues escletxes són obertes és una superposició dels estats corresponents a "travessar l'escletxa superior" i "travessar l'escletxa inferior", que representen les possibilitats clàssiques corresponents. Repetim una altra vegada que tal superposició no té cap anàleg clàssic, ja que un electró "clàssic" hauria de passar necessàriament a través d'una de les escletxes (en altres paraules, no existeix al nostre món una "escletxa" que siga combinació lineal o superposició de dues escletxes).

L'existència de qubits, junt al fet que aquests puguen combinar-se per tal de donar lloc a estats "enredats" (*entangled*, en anglès), sobre els quals, lamentablement, no ens queda espai per parlar-ne, obri un ventall de possibilitats en el domini de la informació absolutament desconegudes fins ara. Les dues més importants potser són la criptografia i la computació quàntiques.

Mitjançant la criptografia quàntica es poden enviar i rebre missatges xifrats amb l'absoluta *seguretat* d'una clau indesxifrable. Actualment hi ha un procediment per generar una clau *quasi totalment* indesxifrable que serveix per a molts missatges (això és un detall fonamental, perquè hi ha claus que si s'empren *només una vegada* són

absolutament indesxifrables, però no són pràctiques, ja que cada vegada s'han de substituir).

Aquest procediment —“clàssic”— es basa en la impossibilitat material de descompondre un número molt gran (més gran de cent xifres, per dir-ho d'alguna manera) en els seus factors primers per mitjà dels ordinadors actuals. No obstant això, la seguretat del procediment quedaria amenaçada si es disposara d'ordinadors molt més potents. A més, si s'arribaren a construir ordinadors quàntics, aquest tipus de claus es desxifririen fàcilment, per això es fa interessant la criptografia quàntica.

Sense entrar-hi en detalls, direm que el procediment “quàntic” es basa en la impossibilitat de saber amb certesa l'estat de polarització, diguem-ne “vertical” o “horitzontal” d'un fotó, abans de mesurar-lo, si aquest fotó s'ha preparat en un estat de “superposició” (del tipus dels que s'han introduït al principi), que en aquest cas seria de polarització circular, per exemple. De qualsevol manera, els principis de la mecànica quàntica garanteixen que una clau basada en aquest fet siga impossible de desxifrar. I no sols això, una possible intromissió d'un tercer en la transmissió corresponent es podria detectar encara que s'hi prengueren totes les precaucions.

La criptografia quàntica no pertany pas a la ciència ficció, ja que actualment es fa servir a diversos laboratoris. Concretament, fa uns dos anys, Nicolas Gisin i els seus col·laboradors van aconseguir transmetre un missatge xifrat quànticament per mitjà de fibra òptica fins a una distància de més de vint quilòmetres entre dos punts de dues vores oposades del llac de Ginebra. L'aplicació pràctica —“industrial”— és qüestió d'uns quants anys.

L'altra gran aplicació d'aquesta nova branca de la informació es concreta en la possibilitat de construir un ordinador quàntic. Abans que res cal advertir que la realització d'aquest fet és encara molt llunyana, ara com ara. Això no obstant, és interessant analitzar què és i què podria fer aquest ordinador, encara que siga de manera molt superficial.

Primer direm què és, i això no és fàcil d'explicar si no es recorre als tecnicismes; tanmateix, sense massa precisió, es podria dir que un ordinador quàntic és quelcom que usa la “lògica quàntica” en comptes de la lògica ordinària. En la lògica ordinària és fonamental el “principi del terç exclòs”, és a dir que una proposició (ben construïda) ha de ser veritable o falsa. En la mecànica quàntica això no és sempre així. Per exemple, i tornem (és clar!) al nostre conegut i vell experiment de la doble escletxa: l'electró passa per una o l'altra escletxa? La pregunta no té resposta definida, ja que quan estan les dues escletxes obertes no es pot afirmar l'una o l'altra possibilitat. En resum, la mecànica quàntica permet una gran varietat de situacions relacionades amb la superposició d'estats inimaginables en el context de la física clàssica; concretament el qubit, que constitueix l'element primari de la computació quàntica, és un exemple d'aquestes situacions.

Pel que fa a la segona qüestió, el punt central es concreta a la pregunta: qué podria fer un ordinador quàntic que no puga fer un ordinador convencional o que li resulte enormement costós? Doncs bé, de moment se sap que hi ha dues tasques que un ordinador quàntic faria més eficientment que no un convencional: extraure els factors primers de nombres molt grans —quasi d'un nombre de xifres qualsevol—, que com ja s'ha dit és molt interessant en el camp de la criptografia, i obtenir elements determinats de llistes no ordenades arbitràriament grans. Constitueix un apassionant problema matemàtic la tasca

d'inventar nous algorismes per a un altre tipus d'aplicacions quàntiques.

Respecte a la possibilitat de construir un ordinador d'aquest tipus, no hi ha cap principi físic que ho impedisca, però resulta difícil pels efectes de l'anomenada "decoherència", que és l'acció del medi físic circumdant sobre el sistema quàntic, que destrueix les superposicions d'estats i n'impossibilita la computació quàntica. És ben cert que actualment es fa un gran esforç per tal de minimitzar tant com siga possible aquests efectes nocius i es pot afirmar que hi ha resultats esperançadors.

En conclusió, a pesar de la seua "joventut" (menys de trenta anys), la informació quàntica ha atès un desenvolupament notable i ha esdevingut un camp d'investigació que sens dubte obtindrà consecucions interessants i sorprenents en els pròxims anys.

BIBLIOGRAFIA²

a) Física quàntica:

HEY, T. i P. WALTERS (1989): *El universo cuántico*, Madrid, Alianza Editorial.³

DAVIES, P. C. i J. R. BROWN (1989): *El espíritu del átomo. Una discusión sobre los misterios de la física cuántica*, Madrid, Alianza Editorial.⁴

b) Partícules elementals i cosmologia:

WEINBERG, S. (1992): *Partículas elementales*, Barcelona, Libros de Investigación y Ciencia.⁵

GUTH, A. H. (1999): *El Universo inflacionario*, Madrid, Debate.⁶

² Es citen només uns quants llibres d'un nivell tècnic accessible per a no especialistes.

³ Un llibre molt ben documentat i il·lustrat sobre les idees fonamentals i les aplicacions de la física quàntica.

⁴ Transcripció de diverses entrevistes a físics quàntics il·lustrats per a un programa de la BBC, amb una excel·lent introducció de Davies, que, a més de bon divulgador científic, és un conegut físic teòric.

⁵ Una excel·lent introducció no tècnica al tema, escrita per un dels grans físics teòrics actuals i premi Nobel de física.

⁶ A més d'exposar amb claredat les idees sobre la inflació còsmica, aquest llibre presenta una bona introducció general a la cosmologia i a les troballes recents en física de partícules elementals.