LA SEGONA REVOLUCIÓ QUÀNTICA

“What quantum mechanics really means” i la (re)escriptura de la història

Enric Pérez Canals



Abstracció d'ordinadors quàntics daurats. Conceptualització: Luisa Quiroga

El sentit de la història

No és cap extravagància dir que la història es va reescrivint a mesura que transcorren els anys. Principalment, a causa de noves troballes o anàlisis que complementen o capgiren les narracions vigents, però també —i això és més interessant— de les transformacions que pateixen les perspectives contemporànies. Així doncs, els esdeveniments futurs, d’una banda, i la mirada, de l’altra, alteren la història. Ens dirigeixen l’atenció cap a episodis passats que altrament haurien semblat intranscendents o que, fins i tot, haurien restat invisibles.

En la història de la ciència, aquest procés és conegut, estudiat i temut alhora. Una visió presentista és la que jutja els fets passats exclusivament a partir dels valors actuals. Evitar-la comporta que, quan s’enceta una investigació, cal intentar entendre els casos d’estudi en el seu propi context, més enllà de les seves vicissituds posteriors. Però, és clar, l’èxit subsegüent d’una tècnica o la confirmació generalitzada d’una teoria canvia sovint la percepció dels seus orígens, particularment en relació amb les altres tècniques i teories amb què va entrar en competència. La història, com és sabut, l’escriuen sobretot els vencedors.

En l'àmbit més concret de la història de la teoria quàntica, l'auge de la computació associada i de tota la ciència mereixedora del Premi Nobel de Física del 2022 ens permet assistir a una d'aquestes transformacions. Episodis que fins fa uns anys no formaven part essencial de la història canònica de la disciplina, avui n'esdevenen part prominent.

> La història es va reescrivint a mesura que transcorren els anys, a causa de noves troballes que complementen o capgiren les narracions vigents, però també de les transformacions de les perspectives contemporànies

En una entrevista que podem trobar al lloc web de la Fundació Nobel, el professor Thors Hans Hansson, membre de l'Acadèmia Sueca, explica —referint-se a la concessió del premi del 2022— com la computació quàntica mostra "el que realment significa la mecànica quàntica" [1]. No és una frase que hagi de passar desapercebuda. Imre Lakatos argumentava que la diferència principal entre la seva manera d'entendre el progrés científic i la de Karl Popper consistia en el fet que, per a aquest últim, abans que una teoria hagi estat refutada, mai podrem saber com caldrà modificar-la; per a Lakatos, en canvi, abans que una teoria s'hagi modificat, mai podrem saber en quin sentit s'ha refutat [2]. Segons això, en el cas que ens ocupa, els darrers desenvolupaments ens indiquen amb més precisió on fracassava la teoria clàssica.

La segona revolució quàntica (1970-2022)

Ja a l'inici del segle XXI es va començar a parlar de la segona revolució quàntica, en referència als avenços tecnològics que permetien intuir la computació i la simulació quàntiques. La primera revolució havia estat la conceptual, i va tenir lloc cent anys abans. Nosaltres ens fixarem en les implicacions conceptuals de la segona sobre la primera.

John Clauser, Alain Aspect i Anton Zeilinger s'han endut el premi pel seu enginy i la seva praxi experimental, que ha anat eliminant les famoses llacunes (*loopholes*) dels muntatges que cerquen l'evidència empírica de l'entrellaçament. De mica en mica han anat arraconant les escletxes, els buits que podrien posar en entredit la confirmació d'aquesta propietat —l'entrellaçament— que avui simbolitza l'essència del reialme quàntic. Han comprovat que la mesura en un dels subsistemes afecta, instantàniament, l'estat de l'altre subsistema amb el qual estava entrellaçat abans de la mesura. Des dels primers experiments rudimentaris amb fotons provinents de cascades de desexcitacions atòmiques, a finals de la dècada dels seixanta, fins als muntatges actuals que contenen diversos fotons i fins i tot elements massius, el protagonista destacat, el desllorigador que es volia detectar i il·luminar, era l'entrellaçament. Pel gran interès que presenta en qüestions com l'encriptació, però sobretot perquè és una propietat distintiva i fascinant que posseeixen els objectes de la natura a escales atòmiques i que força a considerar lligams instantanis entre objectes distants.

Des de quan aquesta propietat ha adquirit aquest caràcter central en la física moderna [3]? Continuem tirant enrere.

Desigualtats i contracultura (1964-1970)

Després de la Segona Guerra Mundial (1939-1945), la investigació en física va experimentar una forta embranzida. El nombre d'estudiants de física va augmentar notablement, especialment als Estats Units (els països europeus van trigar uns anys a recuperar-se). Aquest impuls, com és lògic, no va ser desinteressat, i estava dirigit sobretot a accelerar l'evolució de les aplicacions tècniques. El bagatge de la nova fornada en disciplines de caire més humanístic, com la filosofia, va decaure de manera estimable si ho comparem amb les disciplines científiques del primer terç del segle XX.

En l'àmbit docent, el nou tarannà i la quantitat d'alumnes a les aules van canviar substancialment els continguts i les metodologies, i es va donar més pes als càlculs i menys a les qüestions conceptuals. Aquest nou panorama se sintetitza freqüentment amb la fórmula "shut up and calculate" ("calla i calcula"): cal deixar de banda el debat sobre els fonaments i centrar-se en els càlculs. Per als governants, la rivalitat tecnològica amb el bloc comunista aconsellava i reforçava aquest plantejament.

David Kayser ha argumentat, de forma convincent, que els moviments contestataris de finals de la dècada dels seixanta van quedar reflectits, en l'àmbit de la física, en un grup de joves que, a principis de la dècada dels setanta, es van negar a assumir aquesta tendència i van reivindicar i recuperar el debat sobre la interpretació de la mecànica quàntica [4]. En més d'una universitat de Califòrnia van crear-se grupuscles de físics que qüestionaven l'anomenada *interpretació de Copenhaguen* (aquesta manera de referir-se a l'ortodòxia quàntica s'havia establert només un parell de dècades abans, precisament per oposició a les teories alternatives) i van intentar establir vincles amb ensenyaments de religions orientals i fenòmens psíquics com la telepatia. Van afrontar les discussions sobre el significat de la teoria quàntica centrant-se, sobretot, en el teorema de Bell.

> L'entrellaçament simbolitza l'essència del reialme quàntic, pel gran interès que presenta en qüestions com l'encriptació, però sobretot perquè és una propietat fascinant dels objectes de la natura a escales atòmiques que força a considerar lligams instantanis entre objectes distants

John S. Bell havia publicat, el 1964, un teorema que permetia distingir experimentalment si un sistema perfectament descrit per la mecànica quàntica es podia sotmetre a una descripció causal o no. Segons la teoria quàntica, en els sistemes entrellaçats les parts no tenen paràmetres definits fins que no es produeix la separació a través d'una mesura. I, quan aquesta es produeix, la determinació dels paràmetres és immediata a tots els

subsistemes. Bell va trobar una manera d'avaluar al laboratori si aquests paràmetres estaven fixats abans de la mesura (malgrat que els experimentadors en desconeguessin els valors), o si (com prescrivia la mecànica quàntica) només es determinaven en el precís moment de mesurar-los. Físic teòric de professió, Bell va haver de preparar i discutir aquesta contribució al marge de les seves hores de feina. Llavors, molts físics (i editors de revistes) consideraven que aquestes qüestions no entraven pròpiament en l'àmbit de la física. L'entrellaçament estava lluny de representar "el que realment significa la mecànica quàntica".

Guerra freda i causalitat oculta (1945-1964)

Una víctima de la guerra freda, el nord-americà David Bohm, ja havia patit aquest menyspreament a l'inici de la seva carrera, juntament amb un exili forçat dels Estats Units, el 1949, per les seves idees comunistes. Però van ser les seves contribucions les que van despertar la curiositat de Bell. Bohm havia fet un doctorat que contenia material classificat, per la seva relació amb el projecte Manhattan. La política i la física, en el seu cas, anaven juntes: el materialisme dialèctic fonamentava el realisme i el determinisme de les seves idees. O sigui, res més lluny dels *hippies*. Quan Bohm va abandonar el comunisme, també va desistir de l'explicació causal i, fins i tot, va fer alguna proposta que tenia en compte el paper de la consciència en la nova física, esperonat per la seva relació amb el pensador oriental Jidu Krisnamurti ("l'observador és l'observat"), ara sí que en la línia dels joves que van reprendre les seves reflexions a principis dels anys setanta [5].

Bohm no havia acceptat de manera acrítica la interpretació ortodoxa de la mecànica quàntica i va formular, el 1952, una teoria causal que reproduïa resultats coneguts de la mecànica quàntica. I és que l'aleatorietat dels processos elementals, és a dir, la impossibilitat de fer una teoria atòmica completament determinista, n'era aleshores el tret més polèmic. Val a dir que ni Albert Einstein ni Erwin Schrödinger, dos il·lustres dissidents, van estar gaire interessats en aquesta proposta, però és indubtable que els treballs de Bohm van contribuir de manera distingida a posar en el centre del debat problemes com el de la mesura o la possibilitat de dissenyar una teoria determinista, en contra del que es pensava i del que un teorema de John von Neumann havia descartat prematurament el 1932. Bohm va rebre més reconeixement al final de la seva vida (va morir el 1992), quan els temes que havia tocat s'anaven convertint progressivament en temes cabdals a causa de les transformacions socials, polítiques i tecnològiques.

Aquest episodi il·lustra meravellosament la fecunditat de la controvèrsia i el debat en ciència. Tot i que Bohm no va reeixir a construir una teoria alternativa, la seva aportació per posar al centre de la discussió la possibilitat d'elaborar-ne una, de plantejar què vol dir mesurar i de considerar seriosament la no localitat va ser primordial. La teoria del calòric del segle XVIII o l'èter del segle XIX són idees que van tenir rellevància en el sorgiment de noves teories (termodinàmica o relativitat), i no s'han d'esborrar de la història de la física, ni s'han d'explicar com a episodis anecdòtics. Moltes de les seves característiques han deixat empremta en la forma final de les teories actuals. Això és aplicable a les idees de Bohm i el lloc que avui ocupen les desigualtats de Bell.

La incertesa de la realitat i els primers dissidents (1925-1945)

Continuant amb les retrogradacions, ens topem ara amb un escull ja anunciat: la Segona Guerra Mundial, temps difícils per als dissidents. En els anys immediatament previs, pràcticament només va haver-hi investigació quàntica aplicada a la física nuclear. El debat sobre els fonaments es va extingir. No obstant això, no van trigar a arribar els primers símptomes de desencant en relació amb la interpretació hegemònica que havia quedat establerta després de les discussions fundacionals de la dècada dels anys vint. Va ser aleshores que el concepte d'entrellaçament, absent en els primers debats, va irrompre en escena. Això sí, sense ser-ne el personatge principal.

En efecte, després d'un acord més o menys consensuat a la tardor del 1927 (quan simbòlicament es tanca la qüestió en la cinquena conferència Solvay), a principis de la dècada següent van començar a sorgir les veus crítiques. Sens dubte, els articles més importants en aquest sentit són el d'Albert Einstein, Boris Podolski i Nathan Rosen, i el d'Erwin Schrödinger, ambdós del 1935. Són dues contribucions relacionades perquè l'article d'Einstein, Podolski i Rosen va animar Schrödinger a publicar la seva anàlisi crítica de l'estat de la teoria quàntica. Ell en va dir "confessió".

Einstein, Podolski i Rosen havien ideat un experiment mental que permetia obtenir magnituds d'un subsistema mesurant-ne un altre. Una forma enginyosa de dotar de realitat propietats pretesament excloses de la teoria pel principi d'incertesa. D'aquesta manera, concloïen que resultava evident que la mecànica quàntica no era una teoria completa. Pels autors, la supressió de variables clàssicament imprescindibles per definir completament un estat, així com la dependència d'aquesta supressió del tipus d'experiment realitzat, era l'aspecte més tèrbol de la interpretació dominant.

Uns mesos després, Niels Bohr va respondre que, en realitat, les variables escollides pels autors no estaven sotmeses a les limitacions del principi d'incertesa, i va desmuntar el seu argument. Ara bé, reconeixia i desenvolupava el punt assenyalat i repensava el significat del mateix principi d'incertesa, representant emblemàtic de la nova mecànica, que fins aleshores s'havia entès com una conseqüència física de la pertorbació originada per la mesura [6]. Després d'aquest debat, l'entrellaçament entre subsistemes obligava a matisar el concepte de pertorbació, perquè podia afectar instantàniament sistemes distants.

Va ser en la discussió de Schrödinger (anterior a la resposta de Bohr) en què la paraula *entrellaçament* (*Verschränkung*) va ser encunyada amb el nou significat. Schrödinger, però, també va voler posar el focus en la superposició d'estats ideant la cèlebre paradoxa del gat. Si la superposició d'estats possibles també era un estat possible, s'arribava a contrasentits flagrants (almenys en l'àmbit dels objectes quotidians). A més, en un altre article del mateix any, va portar més enllà els efectes de l'entrellaçament i va proposar una manera de modificar l'estat d'un subsistema a partir de mesures en un altre subsistema separat espacialment del primer; el que avui es coneix com a *quantum steering* (direcció quàntica) en el context de la informació i la computació quàntiques.

> Schrödinger va posar el focus en la superposició d'estats ideant la cèlebre paradoxa del gat

Així, l'any 1935 ja tenim el concepte d'entrellaçament definit, deu anys després de la primera formulació de la mecànica quàntica (Werner Heisenberg 1925). Era una conseqüència llampant de la teoria, no la seva implicació més significativa. Un punt que per a Einstein o Schrödinger era prou obscur per centrar-hi l'atenció. Einstein s'hi va referir en alguna ocasió com a "spooky action at a distance" (acció fantasmagòrica a distància).

Uns orígens discrets: els salts quàntics (1900-1925)

Arribem ja al final de la història, l'origen de la teoria quàntica. Quines noves propietats de la matèria i la radiació van atraure l'atenció dels primers físics involucrats?

Hi ha arguments per atribuir l'honor del descobriment a Max Planck, el 1900, però també a Einstein, el 1905 [7]. Bàsicament, la dissemblança rau en dos aspectes: d'una banda, la consciència de la transcendència del pas que s'estava fent (quantitzar l'energia) i, de l'altra, la radicalitat de la quantització proposada. Einstein va defensar que l'intercanvi energètic entre la llum i la matèria tenia lloc en paquets, i ho va estendre a la constitució lumínica mateixa. Planck va restar importància a la quantització, i fins i tot va mirar de mitigar-la circumscrivint-la a la matèria i als processos d'emissió.

Einstein, doncs, va ser el primer a evidenciar l'estranyesa i la rellevància de la hipòtesi que dona nom a la teoria. Però la seva versió incloïa una primera característica que podria permetre intuir traces de no localitat. Si la llum es transmet com una ona però intercanvia energia en paquets, d'alguna forma hi ha d'haver una concentració instantània, un procés espaitemporal no local que escapi de les explicacions de l'electromagnetisme. En aquell moment no es va tenir en compte aquesta qüestió perquè, en general, la hipòtesi d'Einstein es va bandejar: no es volia substituir la teoria ondulatòria de la llum per una teoria que explicava poca cosa més que l'efecte fotoelèctric. Quedaven encara uns quants anys perquè sorgís el concepte de la dualitat. En el cas d'Einstein, pocs. El 1909, confós per aquestes manifestacions contradictòries de la llum, va suggerir per primer cop, i sense que gairebé ningú li donés suport, que la futura solució a l'enigma vindria d'un compromís entre la teoria ondulatòria i la concepció corpuscular [8].

La següent fita important va ser el model atòmic de Bohr, el 1913. El físic danès va superar, a còpia de postulats, dos problemes gegants que van afrontar els constructors de models atòmics: la hiperestabilitat (els elements són estructures a prova de col·lisions) i la font dels espectres. Va postular l'existència d'estats estacionaris en què els electrons atòmics, malgrat estar accelerats, no radiaven; d'altra banda, en el seu model, la radiació emesa pels àtoms depenia només de la diferència d'energia entre els estats estacionaris implicats, i no tenia res a veure amb la freqüència dels seus moviments orbitals, com preceptuaven les equacions de Maxwell. Més enllà d'aquesta axiomatització contrària a la física vigent, alguns col·legues de Bohr van objectar la pèrdua de causalitat: si un electró emet a la

freqüència que correspon a aquesta diferència energètica, ho ha de fer durant un procés que encara no ha acabat i on l'estat final determina la freqüència de la radiació emesa prèviament. Una nova ombra sobre la causalitat (en aquest cas, una inversió de la relació causa-efecte), però que en el seu moment tampoc va encendre la polèmica.

> Hi ha arguments per atribuir l'honor del descobriment de la teoria quàntica a Max Planck, el 1900, però també a Einstein, el 1905. La següent fita important va ser el model atòmic de Bohr, el 1913

Per acabar, convé ara saltar a principis dels anys vint, just abans del naixement de la mecànica quàntica, quan Louis de Broglie va introduir la dualitat ona-corpuscle i Einstein la va incloure en el seu tractament del gas ideal quàntic el 1924. Li va servir per explicar una propietat misteriosa de les partícules de gas en la nova teoria: es comportaven com un tot, la individualitat de les partícules s'havia esvaït fins al punt que no tenia sentit localitzar-les o imaginar-les per separat. És el que molts anys després es coneixeria com a *indistingibilitat quàntica*. El tot era definit, les parts no. El mateix Einstein es va preguntar per aquest tipus d'interacció o connexió que mantenia totes les partícules del gas funcionant de forma col·lectiva. És clar, però, que, per al pare de la relativitat, una interacció, per misteriosa i desconeguda que fos, no podia ser instantània, i per això va apel·lar a la hipòtesi de De Broglie.

L'entrellaçament, així doncs, tornava a deixar-se veure, ara amb més força, però tampoc es va entendre com el moll de l'os quàntic. Les partícules es van fer indistingibles, una forma d'incloure en l'antiga idea corpuscular una mena de camp que les mantenia unides, interconnectades.

Tot plegat és una mica confós, però amb els anys s'anirà aclarint i delimitant. Quantització, discretització, incertesa, superposició, aleatorietat… i entrellaçament. Resta per saber què ens deparen els propers estudis i desenvolupaments.

REFERÈNCIES I NOTES

1 — Consulteu l'entrevista sencera al web de la Fundació Nobel, a l'enllaç ja.cat/NoblePrizePhysics2022

2 — Lakatos, I. (1974). *The role of crucial experiments in science*: *Studies in History and Philosophy of Science*, núm. 4, p. 309-325.

3 — Per a una narració molt completa d'aquesta història (fins al 2005), consulteu: Gilder, L. (2008). *The age of entanglement*: *When quantum physics was reborn*. Nova York: Alfred Knopf.

4 — Kayser, D. (2011). *How the hippies saved physics*: *Science, counterculture and quantum revival*. Nova York: Norton & Company.

5 — Freire, O. (2015). *The quantum dissidents: Rebuilding the foundations of quantum mechanics (1950-1990)*. Heidelberg: Springer.

6 — Beller, M. (1999). *Quantum dialogues*: *The making of a revolution*. Chicago: Chicago University Press.
7 — Duncan, T.; Janssen, M. (2019). *Constructing quantum mechanics*. Nova York: Oxford University Press.
8 — Navarro, L. (2020). *El desconocido Albert Einstein*. Barcelona: Tusquets.



Enric Pérez Canals
Enric Pérez Canals és professor agregat del Departament de Física de la Matèria Condensada de la Universitat de Barcelona. La seva recerca està centrada en la història de la física moderna, concretament en les interrelacions entre la teoria quàntica i la física estadística. Imparteix l'assignatura d'Història de la Física a la Facultat de Física des de l'any 2010, i és autor del llibre *Física estadística. De estados y partículas: una mirada nueva a viejas controversias* (Edicions UB, 2018), juntament amb Pere Seglar i Comas. També ha escrit i dirigit peces de teatre breus inspirades en episodis i conceptes de la física moderna.