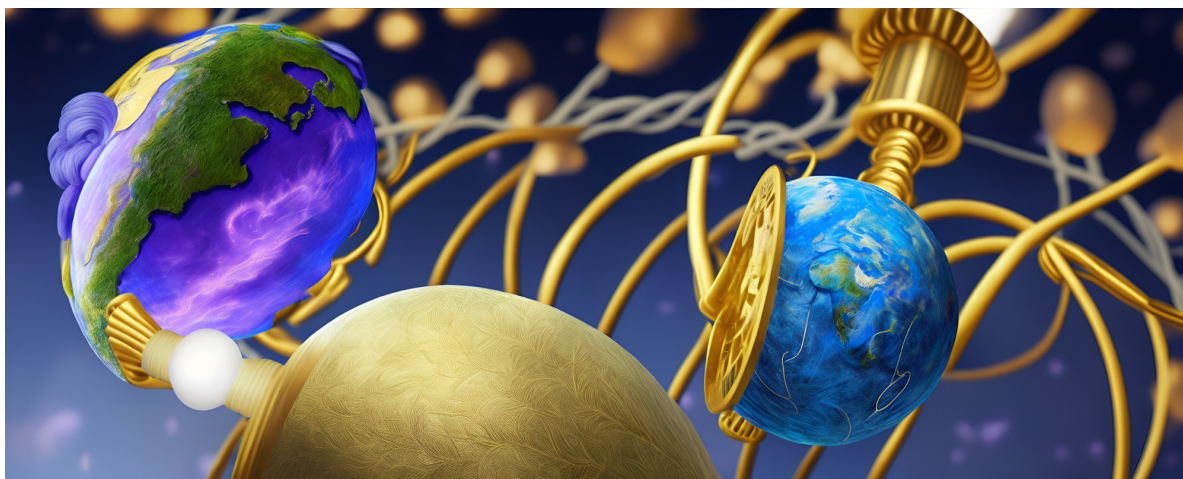


QUÀNTICA I HUMANITATS

L'espai després de la revolució quàntica

Carl Hoefer

El cosmos

Com és l'univers, en els seus aspectes més bàsics i fonamentals? Tots sabem que la manera com es comporten les coses materials, en els nivells més microscòpics, és, com a mínim, estranya. La mecànica quàntica ens diu que les coses més petites que formen la matèria que veiem al nostre voltant de vegades actuen com a partícules minúscules amb ubicacions ben definides. En canvi, en altres ocasions, actuen com una mena de fenomen ondulatori, estenent-se en l'espai. A més, el seu comportament és imprevisible, ja que de vegades fan "salts quàntics" d'un estat a un altre.

Però deixem un moment la matèria i el seu comportament. Potser no heu sentit a dir que la revolució quàntica ha canviat de manera fonamental la nostra comprensió de l'espai i el temps, de manera que continueu vivint en el món còmode i quotidià dels objectes de mida mitjana, distribuïts en l'espai amb posicions i estats de moviment ben definits, que existeixen al llarg del temps i que normalment canvien les seves ubicacions (en l'espai i entre si) a mesura que passa el temps. A més, la distància espacial entre les coses *importa*: els objectes només es poden afectar els uns als altres per contacte directe; o, si es poden afectar "a distància", per exemple mitjançant la gravetat o per camps electromagnètics com ara la llum, aleshores la separació espacial limita fortament aquests efectes. Com més allunyades estiguin dues coses l'una de l'altra, menys es poden afectar mútuament. Els objectes extremament distants no tenen essencialment cap efecte en allò que passa en l'aquí i l'ara.

Així és com pensàvem sobre el nostre univers al segle XIX i anteriorment; i encara és així com l'entendem en la nostra vida quotidiana. De fet, la principal diferència en la manera com avui pensem en l'univers, en comparació amb la manera com hi pensava un europeu culte després de Galileu i Newton, probablement té a veure amb la seva immensitat: ara sabem que el nostre Sol i els planetes ocupen una porció minúscula d'una galàxia lenticular immensa (la Via Làctia), que només és una dels centenars de milers de milions de galàxies que podem veure a la part de l'univers que és visible per a nosaltres.

És ben probable que sapigueu que les teories de la relativitat especial i general d'Einstein (1905 i 1915, respectivament) van engegar a rodar la nostra concepció clàssica i de sentit comú de l'espai i el temps. L'espai i el temps, en la física clàssica —i també quan hi pensem amb el nostre sentit comú, encara avui— són coses ben diferents. L'*espai* s'entén, si més no metafòricament, com un contenidor on cada cosa física ocupa un lloc. El *temps* és una cosa que passa inexorablement, per a tothom i a tot arreu exactament de la mateixa manera: minut rere minut, dia rere dia, ens movem avançant cap al que és, per a nosaltres *ara*, el futur.

Les teories de la relativitat d'Einstein van portar alguns canvis radicals a les nostres concepcions de l'espai i el temps. Alguns físics i filòsofs han argumentat que les teories de la relativitat ens obliguen a renunciar a la idea que el temps passa

Les teories de la relativitat d'Einstein van portar alguns canvis radicals a les nostres concepcions de l'espai i el temps. El temps va deixar de ser un *absolut* que transcorria de la mateixa manera per a tothom a l'univers i va esdevenir una cosa dependent de l'estat de moviment de cadascú. Alguns físics i filòsofs, fins i tot, han argumentat que les teories de la relativitat ens obliguen a renunciar a la idea que el temps *passa*. És ben conegut el lema que, després d'Einstein, el temps no és sinó una quarta dimensió de la realitat al costat de les tres dimensions espacials, si bé és una dimensió que es diferencia de les dimensions espacials en aspectes importants. Finalment, segons la teoria de la relativitat general, fins i tot l'espai va canviar radicalment: en lloc d'un contenidor homogeni on les lleis de la geometria euclidiana es complien a tot arreu, l'espai era "corb", es doblegava i s'estirava de manera variable pels efectes gravitatoris dels cossos massius. I no només és l'espai que està deformat segons la relativitat general: el temps mateix pot arribar a corbar-se tant per intensos camps de gravetat que acaba fent un bucle. El viatge al passat esdevé una possibilitat física, tal com es mostra a la pel·lícula *Interstellar*, de l'any 2014.

Localitat

Aquestes revisions de les nostres concepcions quotidianes de l'espai i el temps són fascinants i radicals, i és una llàstima que ara no ens hi puguem endinsar. Si en faig esment és perquè, tot i la seva radicalitat, les innovacions d'Einstein no van canviar la nostra

capacitat de pensar que el món consisteix en objectes tridimensionals, repartits en un immens contenidor (espai) i existents a través del temps. Les teories de la relativitat tampoc van debilitar la nostra creença que els objectes distants en l'espai amb prou feines afecten el que passa en l'aquí i l'ara. Ben al contrari, la van reforçar. Segons les teories d'Einstein, els objectes separats espacialment només es poden influir els uns als altres per la propagació d'algun cos material o camp entre ells, i aquesta influència mai no es pot propagar més ràpidament que la velocitat de la llum (en contrast amb la teoria de la gravetat de Newton com a força instantània, que disminueix amb la distància en proporció inversa al quadrat de la distància entre els objectes). Aquesta prohibició einsteiniana de les influències que són instantànies, o que es propaguen més ràpidament que la velocitat de la llum (c), va arribar a ser considerada un pilar fonamental de la física al segle XX, i se sol conèixer com a *principi de localitat* o *localitat d'Einstein* que d'ara endavant anomenarem localitat). El mateix Einstein pensava que la localitat era tan fonamental per a la ciència física que amb prou feines podríem avançar en aquest camp si hi renunciàvem [1].

Tenint en compte que Einstein va ser un dels primers fundadors de la mecànica quàntica, és una ironia que una de les maneres més significatives però menys conegudes en què la física quàntica revoluciona la nostra comprensió del món físic sigui precisament que derroca la localitat. Einstein ho va veure de seguida, i va ser el motiu principal de la seva oposició a la teoria quàntica desenvolupada als anys vint del segle passat. Einstein no podia acceptar l'"efecte fantasmagòric a distància" que semblava postular la teoria quàntica, i durant molts anys va buscar una teoria alternativa que fos coherent amb els fenòmens quàntics coneguts i que protegís la localitat.

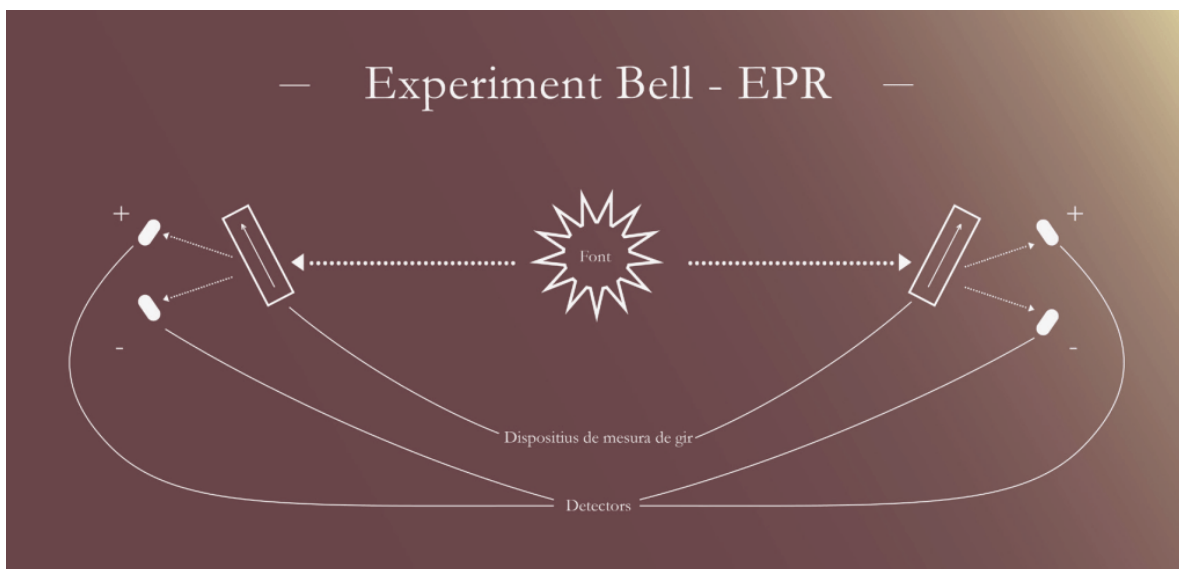
Del que Einstein no es va adonar —ni se'n va adonar ningú fins a les obres fonamentals de John Bell dels anys seixanta— és que seria possible establir definitivament, al laboratori, si la naturalesa presenta fallades de localitat o no. El Premi Nobel de Física del 2022 es va atorgar a físics experimentals que van establir, per mitjà d'una sèrie d'experiments duts a terme entre la dècada del 1970 i principis dels 2000, que la natura sí que viola la localitat, tal com prediu la teoria quàntica. Bell podria haver estat coguardonat amb el Nobel si no fos perquè la seva mort, el 1990, el va fer inelegible.

Per entendre-ho millor, hem de retrocedir una mica i parlar sobre com la mecànica quàntica prediu els fenòmens no locals.

La no localitat quàntica

Segons la mecànica quàntica, les partícules que han interaccionat en el passat, o que comparteixen un origen comú (per exemple, parells de fotons generats per col·lisió de partícules més pesants), tenen estats que estan *entrellaçats*, és a dir, les propietats d'una partícula estan relacionades —coordinades— amb les propietats de l'altra partícula. I el que és més important: aquesta connexió continua sent una característica d'ambdues partícules, per molt lluny que viatgin, fins que (potser) es produeix alguna interacció amb un tercer sistema que en trenqui l'entrellaçament. La connexió no disminueix amb la distància [2].

Per exemple, dos fotons poden ser emesos per un àtom a un estat d'alta energia de tal manera que un es detectarà a un costat d'un laboratori i l'altre, al costat oposat. Els spins dels fotons (l'spin és una mena de moment angular intrínsec que posseeixen les partícules) es representen en l'estat quàntic com a *indeterminats*: no tenen cap valor definit abans de mesurar-se, només probabilitats de manifestar valors diversos. Però els valors estan inexorablement lligats: un cop detectat i mesurat un fotó a un costat del laboratori és segur que, si l'altre fotó es mesura de la mateixa manera, a l'altre costat del laboratori, s'obtindrà un resultat específic determinat. En el llenguatge que de vegades s'utilitza per parlar de mesuraments quàntics, el mesurament de l'spin d'un fotó "col·lapsa" l'estat d'ambdós fotons perquè tinguin valors definits. En certa manera, mesurar un dels dos és mesurar-los tots dos, fins i tot si estan separats per quilòmetres o per milions de quilòmetres. Els mesuraments de l'spin sempre es fan utilitzant dispositius orientats al llarg d'un eix espacial determinat, tal com es mostra a la imatge. Les partícules entrelaçades en un estat *singlet* quàntic sempre donaran resultats oposats, si es mesuren amb aparells orientats en la mateixa direcció, independentment de la direcció triada. Més endavant veurem què passa quan els aparells no estan orientats exactament en la mateixa direcció.



Representació gràfica de l'experiment Bell - EPR

Si pensem en aquestes connexions entre els resultats dels mesuraments, és natural sospitar que tots els mesuraments el que fan realment és revelar propietats que ja posseïen les partícules quàntiques. Aquestes propietats preexistents de vegades s'anomenen *variables ocultes*, perquè no es troben en la descripció mecànica quàntica del parell de partícules. Aquesta idea, doncs, implica la suposició que la descripció mecànica quàntica de les partícules (que descrivia les partícules com a indeterminades pel que fa a propietats com ara la posició, el moment o l'spin) és incompleta. Per tant, la mecànica quàntica seria només una teoria útil per fer prediccions estadístiques, però no una teoria que descrigui directament i completament la realitat microscòpica. Això és precisament el que sostenia Einstein. Un famós treball escrit conjuntament per Albert Einstein, Nathan Rosen i Boris Podolsky l'any 1935, ara conegut com a document EPR, es titulava "Es pot considerar completa la descripció mecànica quàntica de la realitat física?".

La visió de Bell

Així doncs, tenim dues maneres de pensar en les partícules entrelaçades. Segons la mecànica quàntica, no tenen propietats definides, per exemple, de spin al llarg d'un eix donat, abans del mesurament; però el mesurament de l'spin d'una partícula fa que instantàniament el mesurament de l'altra partícula de la parella doni el resultat contrari (això si les mesures es fan amb aparells orientats cap a la mateixa direcció). Per a mesuraments en què, per exemple, l'spin d'una partícula es mesura en la direcció x , i l'altra partícula de la parella es mesura al llarg d'un eix de θ graus de distància de x , la mecànica quàntica prediu com estaran d'anticorrelacionats els resultats, en funció de θ . Segons la manera de pensar d'Einstein, des del moment de la separació, cada partícula té propietats definides que determinaran el resultat del mesurament, tant si es fa en el mateix eix com si es fa en eixos diferents.

La genial visió de Bell a principis de la dècada del 1960 va ser que, si la perspectiva d'Einstein era correcta, llavors hi havia límits superiors per a la quantitat de correlació que es podia observar entre els mesuraments fets a diferents angles θ . De fet, amb un argument senzill però enginyós, Bell va demostrar que, per a un gran nombre de mesuraments de spin en costats oposats d'un laboratori, fets en un dels tres angles dels eixos (anomenarem 1, 2 i 3 els angles que es mesuraran en un recorregut donat, que s'ha de determinar mitjançant un procediment d'aleatorització, com ara llançar una moneda a l'aire), hi ha un límit matemàtic a la suma de les correlacions per a mesuraments en els angles (1, 2), (1, 3) i (2, 3) [3]. Aquest límit s'imposa estrictament per lògica, assumint que les partícules no poden influir directament en els resultats dels mesuraments de les altres, sinó que els resultats dels mesuraments estan determinats exclusivament per les propietats que ja tenia la partícula en entrar a l'aparell de mesurar. Aquesta suposició, és clar, és precisament el principi de localitat.

Segons la mecànica quàntica, les partícules que han interaccionat en el passat o que comparteixen un origen comú tenen estats que estan entrelaçats. La connexió no disminueix amb la distància

El que Bell va demostrar, doncs, és que, si la localitat és certa, hi ha un límit superior a les sumes de correlacions per a mesuraments fets per aparells separats espacialment.

L'interessant és que la mecànica quàntica prediu sumes de correlacions que superen el límit superior de Bell. Com és possible? Bé, com ja hem dit, la mecànica quàntica prediu que mesurar una partícula fa que de manera instantània el mesurament d'una altra partícula o bé donarà el resultat contrari (si es mesura al llarg del mateix eix), o bé tindrà una certa probabilitat de donar el resultat contrari si es mesura en un angle que difereix en θ graus, una probabilitat que és diferent de la probabilitat assignada abans que la primera partícula sigui mesurada. Dit en altres paraules, les mateixes prediccions de la mecànica quàntica violen la localitat, per tant, el límit de Bell no és aplicable.

La localitat falla al laboratori

El que han demostrat dècades d'experiments és que les prediccions de la mecànica quàntica es compleixen i que el límit de Bell és superat pels resultats dels mesuraments que ens dona la natura. Però, a què ens referim realment quan diem que el resultat del mesurament d'una partícula canvia instantàniament les probabilitats dels possibles resultats de l'altra partícula? Segons el formalisme de la mecànica quàntica estàndard i no relativista, vol dir exactament el que hem dit: hi ha un canvi instantani en la partícula malgrat la seva separació espacial (que, teòricament, pot ser tan gran com vulguem), de la mateixa manera que se suposava que la gravetat newtoniana actuava instantàniament. Però els efectes de mesurar una partícula no han de viatjar ni propagar-se de la primera partícula a la segona; ni tampoc aquests efectes disminueixen de cap manera a mesura que augmenta la distància entre les partícules, a diferència de la força de la gravetat. Els experiments que l'any 1982 va fer Alain Aspect, un dels premis Nobel del 2022, van establir que l'efecte és realment instantani, o, si més no, que viatja més ràpidament que la velocitat de la llum (si suposem, contràriament al que sembla dir la mecànica quàntica, que l'efecte ha de viatjar d'una manera o altra d'una banda a l'altra del laboratori). Aspect va mesurar els fotons a cada costat del seu laboratori exactament alhora, amb una precisió del temps que descartava que qualsevol senyal a la velocitat de la llum (o més lenta) passés del mesurament d'una partícula al de l'altra [4].

Aquesta aparent violació de la localitat és, en cert sentit, xocant, i alguns físics han intentat rebutjar-la qüestionant el raonament de Bell o rebutjant alguna altra premissa tàcita de l'argument de Bell en lloc de la localitat. Com que aquí no podem entrar en totes les possibilitats lògiques, la situació resumida és la següent: només queden dues maneres de restaurar la localitat davant dels fets experimentals. La primera es coneix com a superdeterminisme i consisteix a postular correlacions entre les propietats ocultes que tenen les partícules abans de mesurar-les i les opcions de l'angle de mesurament a cada costat del laboratori. Aquestes tries es fan tirant una moneda a l'aire, amb un generador de nombres aleatoris o amb un altre mètode. Per això, postular correlacions entre el que determinen aquestes eleccions i les propietats de spin que tenen les partícules, per a la majoria de físics i filòsofs, és conspirar massa. L'altra manera de preservar la localitat és postular que els mateixos esdeveniments de mesurament influencien o determinen causalment les propietats prèvies que tenen les partícules des del moment de la seva emissió. Dit en altres paraules, si postulem una causalitat que reula en el temps, podem (tècnicament) preservar el principi que totes les influències causals "viatgen" a una velocitat més lenta que c . Igual que amb el superdeterminisme, la retrocausalitat se sol considerar molt menys plausible que acceptar simplement que la natura mostra no localitat.

Adeu a l'espai?

Recordareu que la connexió entre partícules quàntiques entrelaçades és completament independent de la seva aparent separació espacial. Les partícules es comporten, de fet, com si interactuar amb una fos, *ipso facto*, interactuar amb totes dues. Això també ho suggereix una lectura natural i senzilla de la manera com es representa l'estat de les dues partícules

en el formalisme quàntic. L'“espai” d'aquest formalisme és un espai matemàtic de moltes dimensions (un espai de Hilbert o espai de configuració) que té una dimensió per a cada grau bàsic de llibertat de cada partícula en un conjunt de graus de llibertat compatibles o commutants. Si representem una partícula massiva amb spin, necessitem un espai de quatre dimensions: tres dimensions per als graus de llibertat espacials (ubicació en direcció x i direccions y i z), i un grau més de llibertat per al seu moment angular de spin. Si representem un sistema de *dues* partícules massives amb spin, ara necessitarem vuit dimensions; i així successivament si anem afegint més partícules. Aleshores, els estats entrellaçats trien subregions especials del nostre espai d'alta dimensió com les que estan físicament permeses, aquelles a partir de les quals els resultats de la mesura “seleccionen” una subregió encara més restringida. El punt clau és que el procés de mesurament “toca” ambdues partícules alhora, seleccionant alguna regió de l'espai de vuit dimensions com a regió que representa les propietats del sistema combinat.

Tot i que alguns filòsofs han defensat aquesta afirmació, la qüestió no és que la teoria quàntica ens convidi a creure que el veritable espai del nostre cosmos no és el nostre conegut espai tridimensional sinó un espai de configuració de dimensions immenses. La qüestió és que la teoria quàntica ens convida a considerar la possibilitat que l'espai tridimensional del sentit comú no sigui tan fonamental com hem cregut tradicionalment. De fet, ens convida a considerar la possibilitat que l'espai tridimensional del sentit comú només sigui el que els filòsofs anomenen una mera aparença: una eina útil dels nostres sistemes perceptius i de les nostres primeres passes científiques, però en absolut una part del “mobiliari del món” fonamental.

La teoria quàntica ens convida a considerar la possibilitat que l'espai tridimensional del sentit comú només sigui el que els filòsofs anomenen una mera aparença: una eina útil dels nostres sistemes perceptius, però en absolut una part del “mobiliari del món” fonamental

Aquesta pot semblar una conclusió radical que es pugui extreure d'experiments amb partícules preparades especialment, però de fet l'entrellaçament és un fenomen força omnipresent en les teories quàntiques, encara que els seus efectes no són directament visibles per a nosaltres a la vida diària. La majoria de les interaccions de partícules i camps produeixen entrellaçament; per exemple, quan un àtom emet un fotó, els moments de l'àtom i el fotó s'entrellacen. I val la pena recordar que, poc després del big-bang, tota la matèria energia que veiem al nostre voltant es va comprimir en una petita regió espacial, en la qual tot interactuava essencialment amb tota la resta. Des del punt de vista d'un déu, doncs, gairebé tot pot estar connectat no localment amb gairebé tota la resta. Aquesta noció està en total desacord amb la manera com pensem en els objectes com a illes separades i independents en un gran contenidor que manté les coses ben distanciades les unes de les altres. No és estrany, doncs, que molts físics hagin intentat trobar una manera

d'evitar la conclusió de l'argument de Bell.

Més enllà de la mecànica quàntica ordinària: la gravetat quàntica i l'espai

Les violacions de la localitat basades en l'entrellaçament que hem vist no són les úniques pistes que ens mostra la física moderna i que ens fan pensar que l'espai 3D o l'espai-temps 4D potser no són trets fonamentals de la realitat.

Des de la dècada del 1930, els físics han treballat per intentar unir la teoria de la relativitat general i la mecànica quàntica. A diferència de les altres “forces” bàsiques de la natura, febles, fortes i electromagnètiques —totes les quals s'adrecen a la perfecció segons la teoria quàntica—, la quarta força, la força gravitatòria, s'ha resistit a la integració en el món quàntic. Després de dècades d'intentar quantificar la gravetat mitjançant tècniques estàndard que no han aconseguit els resultats desitjats, els físics van començar a explorar un seguit d'enfocaments diferents, alguns dels quals amb fonaments radicalment diversos dels de la relativitat general o la teoria quàntica. Tot i que ara com ara no hi ha cap teoria de la gravetat quàntica que gaudeixi d'una acceptació generalitzada, diverses teories postulen entitats fonamentals que són completament no espacials (per exemple, la teoria de conjunts causals) o completament no espai-temps (per exemple, algunes variants de la gravitació quàntica de llaços). En alguns d'aquests enfocaments, la idea és que l'espai, o l'espai-temps, esdevé una entitat emergent (o, potser, una propietat emergent de l'estat fonamental del nostre univers). Segons aquestes teories, alguns d'aquests “mons” possibles podrien estar mancats completament de l'espai o de l'espai-temps tal com els coneixem.

És massa aviat per extreure lliçons filosòfiques de qualsevol teoria de la gravetat quàntica, però pensar en les possibilitats és fascinant, tant per als filòsofs com per als físics. Només en el futur, potser un futur força llunyà, la humanitat sabrà com és realment el cosmos en què vivim, bàsicament parlant. Si hem de jutjar pels últims cent anys, sembla probable que els reptes de la revolució quàntica per a la nostra visió de sentit comú del cosmos estiguin lluny d'haver estat superats.

NOTES A PEU DE PÀGINA

- 1 — Einstein pensava que, si esdeveniments arbitràriament distants poguessin influir en els esdeveniments de l'aquí i l'ara, amb una força d'impacte no disminuïda per la distància, llavors mai seria possible descartar cap hipòtesi somiada per explicar el que passa aquí i ara en part en termes de coses que succeeixen a l'altre costat del globus, o fins i tot en galàxies llunyanes. Per tant, Einstein creia que el principi de localitat era necessari perquè els experimentadors poguessin aïllar i controlar els factors que determinen els resultats dels seus experiments.
- 2 — L'entrellaçament ha esdevingut una eina i un recurs important per als camps en creixement de la computació quàntica i la criptografia quàntica, tal com es descriu en altres articles d'aquest número.

- 3 — Per exemple, (1,2) vol dir que la partícula que arriba al costat esquerre del laboratori es mesura al llarg de l'eix 1, i que la partícula que arriba al costat dret es mesura al llarg de l'eix 2.
- 4 — Aquí i més amunt, quan dic *instantàniament* o *ahora*, vull dir segons el marc de referència adjunt del laboratori. La teoria de la relativitat ens diu que els observadors que passessin en naus espacials ràpides no estarien d'acord sobre quina partícula es va mesurar primer —aquesta és la famosa relativitat de la simultaneïtat de les teories d'Einstein. Però tots i cadascun dels observadors, per molt ràpid que es moguessin, estarien d'acord que qualsevol influència que es propagui del primer mesurament al segon hauria de viatjar més ràpid que c .

**Carl Hoefer**

Carl Hoefer és professor de recerca ICREA a la Universitat de Barcelona i doctor en Filosofia per la Universitat de Stanford. Actualment és director de l'Institut de Filosofia Analítica de Barcelona (BIAP). Els seus interessos de recerca se centren en qüestions metafísiques antigues que examinen la metafísica de la natura que deriva de les teories científiques. En particular, treballa sobre la naturalesa de l'espai, el temps i el moviment, especialment en l'àmbit de les teories de la relativitat d'Einstein, i sobre la naturalesa de la probabilitat objectiva. Durant els anys 2009 i 2017 va ser editor fundador de la revista *European Journal for Philosophy of Science*, publicada per Springer. Ha treballat a la Universitat de Califòrnia, a la London School of Economics i al Grup de Recerca en Epistemologia i Ciències Cognitives (GRECC) de la UAB.