

N'HI HA PROU QUE FUNCIONI? UNA MIRADA A LA MECÀNICA QUÀNTICA

Lluc TORCAL

Resum

R. Feynman (1918-1988), un dels més grans físics del segle XX i premi Nobel (1965), quan li preguntaven sobre si entenia la mecànica quàntica, responia simplement: «*It works*» («Funciona»). La pregunta es referia, naturalment, a la significació de la teoria, a la seva comprensió i a tot allò que la teoria ens podia dir de la realitat física del nostre món. Una pregunta legítima des que l'home és home i raona. La voluntat de comprendre com està fet el món, motor de la ciència, és acompanyada també per les preguntes sobre com és el món i què és el món, preguntes que entren de ple en la massa abandonada filosofia de la naturalesa. La mecànica quàntica, per tot el que presenta d'enigmàtica, d'incomprensible (s'entén, analitzat conscientment o inconscient des del paradigma filosòfic de la física clàssica), posa sobre la taula del debat filosòfic la necessitat de recórrer de nou a la filosofia de la naturalesa, per poder comprendre, sempre que, és clar, algú no en tingui prou dient que funciona. Les sorpreses vénen quan, un cop pensades les coses, des de l'òptica de la filosofia de la naturalesa, hom descobreix que no hi ha tants enigmes.

Paraules clau: Mecànica quàntica, Física, Filosofia de la Naturalesa, Filosofia de la Ciència.

It is enough if it works? A view on quantum mechanics

Abstract

R. Feynman (1918-1988), one of the greatest physicists of the 20th century, Nobel Prize (1965), when asked whether he understood quantum mechanics, he responded simply: «*It works*». The question of course refers to the significance of the theory, to its understanding and to all that the theory could tell us about the physical reality of our world: a legitimate question since man can think. The desire to understand how the world is done, the very motor of science, goes together with questions as how the world is and what the world is, questions that go straight into the dough abandoned Natural Philosophy. Quantum mechanics, by its enigmatic contents (if analyzed from

the philosophical paradigm of classical physics) raises to the philosophical debate the need to come back again to Natural Philosophy in order to understand, unless of course someone does not have enough by saying that «it works». Surprises arrive when, if thinking from the perspective of Natural Philosophy, one discovers that there are not so many enigmas.

Key Words: Quantum Mechanics; Physics; Philosophy of Nature; Philosophy of Science.

L'any 1900 començava una aventura nova per a la ciència física, amb la hipòtesi sorprenent de la quantificació de l'energia que proposava Max Planck (1858-1947) en el seu article del 14 de desembre publicat a la *Societat Alemanya de Física*. Amb aquesta hipòtesi, no es feia sinó iniciar tot un seguit d'altres suggerents hipòtesis i descobriments, que acabaren per oferir una visió del món microfísic cada vegada més xocant. La visió del món nascuda de la modernitat, que ens el presentava hermèticament tancat sobre si mateix, perfectament determinat sota tots els punts de vista, completament cognoscible, mesurable i previsible, començà a esquarterar-se: les hipòtesis que van anar estructurant la mecànica quàntica contradien els pressupòsits més fonamentals de la cosmovisió moderna. Per aquesta raó, la problemàtica de la mecànica quàntica no rau tant en el fet de ser una teoria científica difícil, que com a tal té les seves regles pròpies i descriu i explica els fenòmens naturals que són del seu àmbit d'aplicació, sinó sobretot en la seva interpretació, és a dir, en la necessitat d'establir una profunda reflexió sobre la visió del món que la teoria ens proposa, una reflexió que, al meu parer, es col·loca netament en l'àmbit de la filosofia.

Aquesta reflexió –necessària–, malgrat que comencin a despuntar interessants intents, no s'ha realitzat del tot per força motius: de vegades, perquè no se n'ha copsat la necessitat; d'altres, perquè no hi ha hagut la preparació necessària o bé perquè el treball interdisciplinari, que requereix una tal reflexió, no s'ha pogut dur a terme; ben sovint pel descoratjament que presenta el complex formalisme de la teoria... Ras i curt, per tal que aquesta reflexió es dugui a terme cal que hi hagi prèviament un diàleg enriquidor entre el món de la ciència i el del pensament filosòfic: un diàleg que no es redueixi merament a adquirir informació per ambdues bandes, cosa que evidentment és el pas previ, sinó que miri al veritable treball interdisciplinari, d'estreta col·laboració. Un diàleg, en definitiva, que posi sobre la taula totes les preguntes que l'home es fa.

El diàleg interdisciplinari entre la filosofia i la ciència, si bé pot ser fecund en molts camps, es presenta especialment necessari en el context concret de la filosofia de la naturalesa. Aquesta part de la filosofia, per la seva natura pròpia, podrà veure's infinitament enriquida en la mesura en què es prengui de debò aquest diàleg. Dialogar, no obstant això, no significa reduir-se, és a dir, perdre la pròpia identitat, perdre la pròpia

raó de ser. La filosofia de la naturalesa no és ni física ni biologia, però la interpretació del món material no pot deixar de banda els resultats i les conclusions a les quals arriben totes les ciències naturals. El treball d'una filosofia de la naturalesa, al meu parer, rau no tan sols en l'anàlisi d'aquests resultats i conclusions, sinó sobretot en la interpretació que se'ls pot donar i, per tant, en una comprensió més profunda de l'univers físic que ens envolta. El nostre diàleg, avui, se centra al voltant del problema de la mecànica quàntica.

En el marc de la física clàssica aquest diàleg, en general, no s'ha realitzat i això ha tingut com a conseqüència directa o bé, simplement, la desaparició de la filosofia de la naturalesa de l'àmbit acadèmic i de l'especulació filosòfica mateixa, o bé la deriva d'aquesta disciplina cap a un idealisme desmaterialitzat, molt allunyat dels seus orígens, molt allunyat de la *Physica*. Les raons, al meu parer, d'aquest allunyament entre les ciències i la filosofia, amb la consegüent nul·la reflexió filosòfica sobre la naturalesa, són múltiples. Principalment, però, es deuen al que es podria anomenar l'acomplexament que els filòsofs van anar patint des del Renaixement i, sobretot, des de la modernitat, davant la potència, el rigor i la precisió de les ciències modernes, basades en l'experimentació i la formalització matemàtica de les seves assercions. En efecte, la ciència moderna es qualificava a si mateixa, i així era percebuda, com a coneixement objectiu, rigorós i cert. Ja Francis Bacon (1561-1626) pretenia fer, en el seu *Novum Organum* (1620), una *instauratio magna* del coneixement fent *tabula rasa* de tot allò que havia produït l'actitud precientífica que havia imperat fins aleshores i creant el nou coneixement per mitjà del seu *nou* mètode inductiu, segons el qual es podia assolir l'objectivitat neta.

Si amb Bacon es realitza el gir que inicia una nova manera de pensar i d'aproximar-se intel·lectualment a la naturalesa, és amb Galileo Galilei (1564-1642) que comença la nova manera de practicar la ciència, que ha caracteritzat la cultura moderna fins als nostres dies. De tots es prou conegut que el nou mètode científic està basat en l'experimentació, fins al punt de no admetre res que no pugui ser experimentable com a objecte del propi coneixement; s'expressa per conceptes unívocs; se serveix de la deducció rigorosa per a justificar les seves conclusions; formalitza matemàticament tant aquells conceptes com la deducció augmentativa; té per criteri d'objectivitat l'observació dels fenòmens que no altera tals fenòmens; i suposa un procés de verificació i, per tant, de reproductibilitat dels fenòmens observats en la naturalesa dins de contextos experimentals artificials o laboratoris. Davant l'esclat de la potència d'aquest mètode, l'aproximació filosòfica a la naturalesa va quedar del tot eclipsada, cosa que al meu modest parer va comportar una gran pèrdua per a l'esperit humà, ja que es va acceptar del tot acríticament no tan sols un model de coneixement, elevat a l'únic model de coneixement, sinó –sobretot– la cosmovisió que aquest model duia associat, cosa que al capdavall ha resultat contraproductiu, fins i tot per a la ciència mateixa, tal com tindrem ocasió de veure al llarg d'aquest article.

Abans d'entrar en l'anàlisi d'aquesta cosmovisió, que anomenarem clàssica (en relació amb la física clàssica d'arrel galileana-newtoniana), i de la seva acrítica acceptació, convé notar que, malgrat tota la potència cognoscitiva inherent a la ciència i al seu mètode, aquesta no és sinó parcial: la realitat no s'exhaureix a través del coneixement científic, com posa ben en relleu, entre d'altres, tot el problema de la fonamentació de la ciència mateixa, que tant ha preocupat el pensament filosòfic dels darrers anys. La ciència és un element, al costat de tants altres, d'accés a la realitat: la universalitat i la potència que en resulten, per bé que importants, ofereixen només un aspecte de la realitat.

Abans de passar a desgranar els elements de la cosmovisió clàssica, cal recordar encara que la ciència, per la seva mateixa constitució, propugna un coneixement de caràcter hipotètic: presenta hipòtesis que han de ser verificades abans que formin part d'una teoria consolidada, la qual al seu torn també manté el caràcter hipotètic. El problema de la ciència no és tant la veritat com la certesa. Tot i així, molts científics han sobrepassat el seu propi mètode per parlar de com és la realitat: i amb això no em refereixo al fet que molts donen la seva opinió com qualsevol altra persona pot fer-ho, sinó al fet que, des de la seva càtedra, pretenen donar un judici sobre la constitució ontològica de la realitat, temptació davant la qual han caigut científics de gran nivell com ara I. Newton (1642-1727) o el mateix S. Hawking. Del primer, és ben coneguda la frase: «*Hypotheses non fingo*»¹ («No proposo cap hipòtesi»), per respondre a qui el desafiava a oferir una explicació de les causes de la gravetat, quan, precisament, el problema de les causes de la gravetat l'obsessionava fins al punt que va proposar l'existència d'un èter per a resoldre el problema de l'acció a distància. Si ni tan sols els més grans científics s'han aturat a l'hora d'interpretar els resultats de la ciència i, moltes vegades, han ofert una explicació de la realitat, no ens ha d'estranyar gens que el sistema clàssic tingués associada també una cosmovisió pròpia, malgrat tota la seva aversió al que es podria considerar la filosofia natural.

Vegem quin són els elements constitutius d'aquesta visió del món que hi ha implícita en la ciència clàssica.

Per començar, la física clàssica té de la matèria una noció ben determinada, una noció que s'espigola en els treballs tant de Galilei o de Newton com del mateix R. Descartes (1596-1650). El cos material és un ens que ocupa una certa extensió, que disposa d'una certa massa i que és inert i homogeni. L'extensió és el lloc que ocupa la matèria i que fins i tot, com en el cas de Descartes, pot arribar a coincidir amb la matèria. La inèrcia es defineix com la capacitat intrínseca de resistir, d'oposar-se al canvi. L'homogeneïtat s'entén com l'absència d'estructura interna de la matèria i, per tant, és el fonament d'una altra propietat bàsica associada a la matèria, com és la impenetrabilitat.

¹ I. NEWTON, *Philosophiæ naturalis principia mathematica, General Scholium*, publicat a la tercera edició del llibre.

D'aquesta concepció de la matèria, se'n segueix una visió corpuscularista: els cossos materials estan compostos de partícules indivisibles, dures i impenetrables. Aquests corpuscles són els components últims de la matèria, i de les seves propietats, se'n deriven directament (és a dir, per pura addició) totes les propietats de la matèria macroscòpica. Els corpuscles són immutables. Si el corpuscularisme interpreta la composició i les propietats de la matèria, el mecanicisme n'interpreta el moviment. El mecanicisme, prenent com a model el xoc entre dues partícules o el moviment produït per un engranatge, entén l'acció física només com a causada pel contacte directe entre dos cossos. És un model en què l'acció física es redueix a la interacció local (per aquesta raó Newton volia introduir el seu èter per a explicar la força gravitacional). A aquestes dues concepcions, el corpuscularisme i el mecanicisme, cal afegir-hi unes altres dues assumpcions bàsiques de la cosmovisió clàssica, sempre presents però mai fetes explícites. Es tracta de l'*Omnimoda determinatio* i del principi de continuïtat.

La primera assegura l'absoluta determinació ontològica d'un sistema físic, és a dir, assegura que un sistema físic està caracteritzat per un conjunt de propietats determinades sota qualsevol aspecte: posició, quantitat de moviment, acceleració, temperatura, energia, etc. Aquest principi és, alhora, la base per a una concepció del coneixement entès com a representació: conèixer és reproduir i establir perfectament totes les propietats d'un determinat sistema físic. Heus ací, amb unes altres paraules, l'expressió de l'ideal d'objectivitat característic de la ciència moderna (clàssica). La segona assumpció que hem assenyalat, la del principi de continuïtat, nega que pugui haver-hi discontinuïtats o salts en la naturalesa: és a dir, que els efectes se succeeixen directament de llurs causes.

Amb aquests dos pressupòsits, la visió clàssica del món físic es converteix en determinista. En efecte, si tot ha de ser perfectament determinat i tot ha de comportar-se de manera contínua, l'evolució de qualsevol sistema físic ha de ser necessàriament determinista. Coneixent les condicions inicials d'un sistema qualsevol i invocant el principi de continuïtat, la ciència pot predir amb exactitud el comportament futur de qualsevol sistema i fins i tot del mateix univers globalment considerat, tal com sostenia P.S. de Laplace (1749-1827).

Encara es poden comptar altres assumpcions acrítiques dins de la ciència moderna. Per exemple, la linearitat. Segons aquesta assumpció, els efectes d'una determinada causa no modifiquen essencialment el comportament d'un sistema físic, són causats linealment. Si afegim aquesta assumpció al determinisme que ja hem trobat, obtindrem una visió causalista del món físic: una visió segons la qual la regularitat és la llei comuna per a tots els sistemes físics i en què els efectes es produeixen de manera automàtica. Per exemple, en la concepció del moviment, si aquest és transmès únicament per contacte directe, l'efecte se segueix immediatament i automàticament de la causa que l'ha produït. Breument, el causalisme afirma que d'un determinat impuls mecànic, se'n segueix necessàriament un efecte mecànic. Ens trobem, de fet, davant d'una reducció de tot el sistema causal aristotèlic a les causes merament mecàniques.

La possibilitat de reduir l'error de mesura a zero és una altra pretensió infundada de la mecànica clàssica i és a la base de l'obtenció de les lleis deterministes i de les formulacions lineals. La ciència neix de l'experiència, però l'experimentació comporta errors: si aquests errors, per principi, no són reduïbles a zero, les lleis que puguin seguir d'aquesta experimentació no podran ser mai ni deterministes ni gaudir de formulacions lineals. Com que en aquesta visió del món tot està perfectament determinat, l'error és només instrumental i pot ser reduït per principi. També s'assumeix per principi que els sistemes poden ser factoritzats, és a dir, dividits en parts: al cap i a la fi, la matèria està composta de corpuscles que no interactuen entre ells, les propietats dels quals donen les propietats dels compostos que configuren. Tot plegat ens condueix cap a una altra assumpció feta per la ciència moderna: em refereixo a la separabilitat dels sistemes que no interactuen entre si.

Totes aquestes assumpcions i pressupòsits són presents acríticament en qualsevol treball de ciència moderna. De fet, són les bases filosòfiques (no explicitades per la ciència) en què la ciència es fonamenta i, contràriament a les seves intencions originàries (recordem el mètode inductiu de Bacon), no suporten cap anàlisi crítica i rigorosa, no tan sols pel fet de la seva acrítica assumpció, sinó, sobretot, per les múltiples raons per les quals hom pensa que la realitat física no és realment així i que la ciència que es basa en aquestes assumpcions no descriu realment els fenòmens de l'experiència.

És aquí on entra de ple la discussió nascuda al voltant de la mecànica quàntica.

Abans d'obrir pas a la física quàntica, recapitem una mica quin ha estat el camí seguit fins ara. Hem volgut fer notar que, fins i tot en la ciència que es creu més pura perquè neix amb la intenció de fer *tabula rasa* i de no acceptar res més que allò que ens ofereix objectivament l'experiència objectiva, hi ha associada una cosmovisió. En aquest cas, per eclipsi de la filosofia de la naturalesa, o per complex d'aquesta, es tracta d'una cosmovisió acríticament associada a la ciència i no reflexionada, elaborada essencialment des de la ciència mateixa. La intenció, doncs, d'aquestes primers línies és la de reivindicar el paper de la filosofia de la naturalesa, capaç de repensar, en les pròpies claus del pensament, i del pensament ben fonamentat, la mateixa naturalesa que la ciència estudia amb els seus mètodes; i capaç d'oferir una comprensió d'aquesta naturalesa no tan sols tan vàlida com la de la ciència sinó, sobretot, complementària i necessària per al bon desenvolupament de la ciència mateixa, ja que, en cas que sigui ben feta, serà una reflexió crítica sobre els fonaments i les variades interpretacions que es puguin desprendre dels fenòmens objecte de la investigació científica.

Cal afegir aquí que l'empenta inicial amb què es caracteritzà l'inici de la ciència moderna, i que va deixar la filosofia de la naturalesa una mica fora de combat, va estar acompanyada d'una sèrie de confusions que, precisament per manca d'una reflexió des de l'àmbit d'aquella disciplina filosòfica, van quedar fossilitzades i s'han anat arrossegant fins als nostres dies, entre les quals l'equiparació entre llei i causa, fruit d'una confusió molt més profunda: la de l'àmbit formal amb la de l'àmbit físic. Si bé la for-

malització d'aquest darrer, la capacitat de matematitzar la física, és el mèrit de la ciència moderna, el demèrit més gran és la reducció d'aquell darrer al primer.

A banda dels resultats sorprenents amb què s'obrí pas la nova teoria física, anomenada quàntica per les discontinuïtats que postulava tant en l'energia com en altres propietats del món físic més fonamental, el veritable problema no va ser tant com modificar alguns conceptes que fins aleshores havien estat massa encarcarats (valguin com a exemples les noves propietats ondulatòries de la matèria o les propietats corpusculars de les ones electromagnètiques) com sobretot –a mesura que es va anar avançant en la comprensió de tot el que la nova teoria comportava– la relació que havia d'haver-hi entre la teoria i la realitat. Cal dir que tot plegat es va desenvolupar a un ritme molt vertiginós: l'escrit de Max Planck amb què s'inicia l'aventura quàntica és de 1900 i un dels articles més importants en relació al problema teoria-realitat i que ara esmentaré és del 1933.

Els fenòmens d'interferència de la matèria, el comportament corpuscular de les ones electromagnètiques –amb la seva formulació maxwelliana encara calenta–, la quantificació de l'energia i de les «òrbites» dels electrons dins de l'àtom, el moment angular intern o *spin*, les noves lleis per a descriure els fenòmens observats, incapaces d'oferir resultats deterministes o predictibles, la funció de la probabilitat o, més en general, el rol de les matemàtiques en la teoria i les diferents descripcions de la física, la no-commutativitat de certs observables i les relacions d'incertesa, que imposaven límits naturals a la física, la nova característica de l'entrellaçament dels sistemes físics (*entanglement*), el gran i nou problema de la mesura..., tot plegat va començar a fer trontollar la cosmovisió del món fins ara apuntada. La gran pregunta que va anar emergint en aquests primers anys del segle XX entre els més grans dels homes de ciència del temps, era: quina havia de ser la relació entre la teoria quàntica i la realitat? I aquesta ha estat la pregunta central que ha mogut, fins i tot, la mateixa recerca científica al llarg de tot el segle XX i fins als nostres dies. Problemes com pensar què és mesurar eren totalment nous, obriren noves perspectives i feren entendre nous punts de vista en les relacions de la física amb la matemàtica o amb la mateixa filosofia (de la naturalesa).

Conceptualment, els primers problemes que posa la nova teoria provenen de l'estatus del formalisme matemàtic. La matemàtica serveix per a descriure els sistemes físics i la seva evolució temporal en unes determinades classes de contextos experimentals. Les descripcions matemàtiques fonamentals corresponen a la de E. Schrödinger (1887-1961) i a la de W. Heisenberg (1901-1976). La primera descriu l'evolució temporal de l'estat físic, mentre que la darrera descriu l'evolució temporal dels observables de què parla la teoria. El principi de complementarietat assegura que ambdues descripcions són equivalents. El problema matemàtic no ve tant per la presència d'aquestes dues descripcions paral·leles, com pels resultats que s'obtenen d'ambdues. L'equació de Schrödinger descriu una evolució contínua i lineal del sistema fins que arriba un moment, quan es produeix una interacció com ara un acte de mesura, en què sobtadament el sistema

trenca aquesta evolució i el sistema es col·lapsa en un resultat concret. La formulació de Heisenberg descriu tots els resultats possibles que pot tenir un observable determinat en relació amb un sistema determinat. També en aquest cas, per causa d'una interacció, el sistema es col·lapsa aleatòriament en un dels possibles resultats previs. Aquesta reducció, brusca, aleatòria i dràstica de tots els possibles resultats que pot oferir un sistema abans d'una interacció, és el que creà més maldecaps als primers pares de la mecànica quàntica. L'aleatorietat dels resultats obliga a pensar estadísticament. El formulisme matemàtic és de caràcter probabilístic i el problema que es presenta rau en el valor d'aquesta probabilitat: té només un caràcter epistemològic o bé parla d'un tret ontològic del món físic? Aquesta problemàtica és paradigmàtica dels problemes de fons que obre la mecànica quàntica: els problemes vinculats a la relació entre la teoria i la realitat, problemes que, de fet, ens col·loquen en el cor de la filosofia de la naturalesa.

Aquest debat en la mecànica quàntica s'obre amb la reflexió sobre la probabilitat. En un famós article (del qual he dit que parlaria més amunt), Einstein, Podolsky i Rosen² (1935) es preguntaven quin hauria de ser el criteri de la realitat i consideraven que els resultats estadístics tenien un caràcter només epistemològic. De fet, al seu parer, la realitat no és aleatòria, sinó que té un fons determinista, el qual, però, ens és desconegut.

D'alguna manera, A. Einstein (1879-1955) esperava que els sistemes físics fossin tipus d'objectes, és a dir, entitats teòriques amb assignacions ontològiques reals. Els nous resultats observats, però, feien preguntar-se si realment els sistemes físics podien ser considerats algun tipus d'objectes. I, és clar, on no hi ha objectes tampoc no hi pot haver assignació de cap tipus de realitat física. La solució que va plantejar Heisenberg³ deixava de banda el problema de la realitat tot celebrant la capacitat del formalisme de fer prediccions específiques. Però la pregunta romangué latent perquè tota la sèrie de fenòmens d'interferència o d'acció no local, precisament per això, no podien ser considerats com a localitzats, raó per la qual hom es podia preguntar de quin tipus de realitat s'estava parlant.

Des del punt de vista que interessa a aquest article, els problemes bàsics de la mecànica quàntica es poden reduir a tres categories principals:

El problema del mesurament

En realitat, els esdeveniments resultants del mesurament són aleatoris, encara que les lleis generals de la teoria siguin deterministes. Com entendre aquesta dicotomia? Històricament, un dels pares de la mecànica quàntica, J. von Neumann (1903-1957),

²A. EINSTEIN; B. PODOLSKY; N. ROSEN, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?». *Physical Review* 47 (1935) 777-780. Per motius de brevetat ens referirem a aquest article amb l'abreviació EPR.

³W. HEISENBERG, «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik».

proposà que, si suposem que la naturalesa física es regeix per les lleis de la mecànica quàntica, l'única realitat no física involucrada en el mesurament i que pugui ser responsable d'aquest resultat inesperat havia de ser la ment de l'experimentador. No obstant això, va deixar oberta la qüestió de si aquesta ment podia tenir una influència real en la realitat física dels sistemes quàntics o només donava lloc a una mena d'il·lusió mental dissociada del que realment succeiria en el món físic, que encara seguiria les lleis de la mecànica quàntica. Això va dividir la comunitat científica en dues parts principals: els qui donen suport a la interpretació subjectiva de la mesura (i també de la mecànica quàntica) i els partidaris d'una interpretació objectivista.

La interpretació subjectivista té un rerefons filosòfic important que es remunta als debats sobre l'acció de l'ànima sobre el món físic de Descartes i G. Leibniz (1646-1716). Hi ha representants importants d'aquesta interpretació entre els físics, el més autoritzat dels quals és E. Wigner (1902-1995). Tot i així, la interpretació objectivista sembla molt més raonable a les orelles d'un físic. El problema específic que aquesta interpretació subratlla és la reducció brusca i sobtada d'un estat de superposició inicial (l'estat que no ha interaccionat amb res més i que evoluciona contínuament) a una de les seves components (associada amb el resultat fruit d'una interacció determinada, com ara l'acte de mesurar). Un físic com H. Everett (1930-1982), per evitar aquest problema, va introduir el que més tard s'ha conegut com la interpretació dels molts mons (*Many World Interpretation*): al seu parer, el que l'investigador observa és, en realitat, una de les components del sistema. Les altres components no es perden, sinó que mantenen la seva existència, de manera que la realitat objectiva es troba encara en un estat de superposició de totes les components. Aquestes altres components del mateix estat de superposició van ser posteriorment interpretades com a representació de diferents mons en què les contraparts de l'experimentador (en els altres mons) les mesuren (d'aquí el nom d'aquesta interpretació).

Notem que aquesta posició té alguna relació significativa amb la teoria modal de Leibniz dels mons possibles. També val la pena esmentar que, a aquesta interpretació, J. Lockwood va donar-li un gir subjectivista proposant la idea d'una ment universal els components de la qual serien les ments de diferents observadors, cadascun dels quals mesurant una component de l'estat de superposició. Tot i així, amb la interpretació objectivista hi ha un problema considerable (independentment de la formulació de Lockwood). Tal com mostra W. Zurek, aquesta interpretació incorre en una confusió entre la possibilitat formal (matemàtica) que permet expandir el conjunt de l'estat del sistema objecte més un aparell de mesura en diferents bases matemàtiques (corresponent a diferents observables) i la concreta configuració experimental (la física real del sistema que es considera), que mira de mesurar un observable en particular (una quantitat relacionada amb l'estat del sistema).

El que hi ha aquí al darrere és entendre que l'acte de mesurar és una interacció física real, que pot ser descrita matemàticament d'una manera determinada perquè s'ocupa

d'un cert observable específic, és a dir, que cal no confondre el pla matemáticoformal amb el pla físic-real, tal com passà en la concepció mecanicoclàssica. Aquest és, naturalment, un problema molt més fonamental que la qüestió de si s'obté només un dels components d'un cert estat inicial (segons una determinada preparació del sistema) o no. Per tal d'entendre què passa en un acte de mesura, proposo de considerar aquest darrer com un procés amb tres fases: la preparació, el premesurament i la detecció o mesura.

1. La primera etapa prepara un sistema en un estat determinat. Aquesta operació sempre és possible i és un requisit necessari per a fer front a sistemes tan difícils d'aconseguir com els quàntics. Preparar un sistema en un cert estat significa preparar-lo en un estat de superposició, és a dir, en un estat que comprèn en si mateix tota la informació possible (tots els possibles resultats) que es podrà assolir en etapes posteriors.

2. El segon pas és triar un cert observable que volem mesurar. Clàssicament, es parla de variables en relació amb els paràmetres del sistema (com l'energia, la posició, la quantitat de moviment, etc.) que en defineixen l'estat. Se suposa que les variables són contínues i perfectament determinades en si mateixes. No obstant això, des d'un punt de vista mecanic quàntic, ens ocupem de discontinuïtats bàsiques i no sempre es produeix que tots els observables tinguin valors determinats en un estat determinat (per causa de la no-commutativitat de la major part d'ells). Per això parlem d'observables i no de variables. Cada disposició experimental és específica per a un observable, raó per la qual una disposició determinada exclou altres possibles alternatives de configuració. Aquesta selecció d'un observable específic per a mesurar l'anomenem premesurament. En altres paraules, en aquesta etapa s'acobla un sistema objecte amb un cert aparell de mesura. Durant l'estadi de premesurament el sistema objecte i l'aparell de mesura queden acoblats: de l'estadi inicial en superposició, ara el sistema està vinculat a un aparell de mesura d'un observable físic determinat. Sense tenir encara cap resultat determinat, el meu sistema objecte ha quedat lligat a l'interrogant físic concret que em fa utilitzar un determinat aparell de mesura concret. Només amb aquest pas intermedi té sentit parlar de detecció o mesura.

3. El pas final del mesurament és la detecció, amb la qual s'obté un resultat específic associat amb aquest procés de detecció. Només aquesta etapa és irreversible. És aquí on, finalment, podem assignar propietats al sistema.

En relació amb la interpretació del que significa mesurar, sembla que en tractar de fer front a la impossibilitat d'obtenir el que s'anomena un estat propi d'un cert observable (que s'associa amb el resultat de mesura) a través de l'evolució unitària, Everett i els altres objectivistes van incórrer en un problema molt més gran, el de la confusió entre les matemàtiques i la dinàmica (és a dir, el de la confusió entre la preparació i l'estadi de premesurament), oblidant el problema crucial de l'adscripció de realitat, que no es pot oblidar quan es tracta de sistemes físics. El problema podria resoldre's gràcies al que es coneix com a decoherència: encara que localment s'aconsegueixi un determinat resultat de mesura (que, per tant, roman aleatori), l'estat global del sistema, junta-

ment amb tot l'univers, està encara en un estat de superposició. No hem d'interpretar això com si el resultat local fos il·lusori. Ben al contrari: fins a un cert punt, aquesta és l'única realitat amb la qual de fet tractem i que considerem actual (en el seu sentit més profundament metafísic). La qüestió rau a entendre que hi ha una dicotomia fonamental entre localitat i globalitat. Tal com veurem, això pot ser al seu torn explicat considerant que una mesura augmenta l'entropia local (i, per tant, el desordre) desplaçant una mica d'ordre vers un altre lloc de manera que el balanç global entre l'ordre i el desordre pugui ser conservat. No obstant això, és precisament aquest desplaçament el que permet l'aparició de formes més complexes de la realitat actual.

Localitat i no-localitat

Tal com ja hem esmentat, en les primeres etapes del desenvolupament de la teoria, físics de la talla d'Einstein, juntament amb Podolsky i Rosen, es van plantejar la qüestió crucial sobre si la mecànica quàntica només representava una descripció estadística del nostre món o bé una de més fonamental. En altres paraules, EPR s'inclinà a pensar que la probabilitat quàntica (i, per tant, també les lleis quàntiques, que són probabilístiques) representa la quantitat de la nostra ignorància relativa a un micro-realitat que no és immediatament accessible per a nosaltres. EPR va pensar que la mecànica quàntica era una teoria incompleta, raó per la qual es va introduir el concepte de variables ocultes: segons EPR, hauria d'haver-hi algunes variables encara desconegudes per a nosaltres (i, per això, ocultes) que podrien explicar realment el comportament dels sistemes quàntics. L'objectiu principal de la crítica d'EPR va ser el principi d'incertesa. L'article proposa un experiment imaginari en el qual dues partícules quàntiques bessones nascudes d'una font comuna (per exemple, per desintegració radioactiva) se separen de manera que ja no interactuen. Mesurant en una d'elles, per exemple, la posició, s'hauria d'aconseguir un cert valor. Gràcies a les lleis de la mecànica quàntica, hauríem de ser capaços de predir el valor de la posició també de la partícula bessona sense interactuar amb ella (ja que, de fet, estan separades per hipòtesi del problema). Això ens faria pensar que aquest valor seria objectiu i real, independentment de la nostra decisió de mesurar-lo. També podríem fer un mesurament de la quantitat de moviment i obtenir la mateixa conclusió. Això ens obligaria a atribuir també un valor determinat d'impuls a la partícula bessona, que per tant tindria tant la posició i el moment perfectament determinats. El principi d'incertesa de Heisenberg assegura que no podem tenir determinació simultània i perfecta de posició i quantitat de moviment. Per tant, als ulls d'EPR, si no volguéssim afirmar que el principi d'incertesa és contradictori, l'única possibilitat és admetre que la mecànica quàntica només representa una descripció estadística i, per tant, incompleta de la realitat física.

En el mateix any en què va publicar el seu article EPR (1935), altres grans científics, N. Bohr (1885-1962) i Schrödinger, van respondre a EPR. Bohr va negar que es pugui

atribuir res a la realitat independentment de qualsevol context de mesura concreta. L'objecció de Bohr és vàlida si es considera l'atribució de propietats als sistemes quàntics (cosa que requereix necessàriament un esdeveniment de detecció). L'objecció de Schrödinger va ser adreçada a la noció de separabilitat i finalment va assenyalar que els sistemes que són dinàmicament independents poden, però, mostrar interdependències estàtiques entre ells. Aquets és de fet el significat de la noció d'entrellaçament dels sistemes (*entanglement*) que ell va introduir. En altres paraules, els sistemes quàntics, encara que no violin la localitat d'Einstein (cosa que implicaria l'intercanvi de senyals amb velocitat més elevada que la de la llum) mostren formes d'interdependència no local que poden produir canvis instantanis en la seva configuració. Podem recordar aquí que Leibniz va ser el primer filòsof a pensar en la possibilitat de tenir una certa correlació entre els sistemes a distància en plena absència d'interaccions locals i dinàmiques (harmonia preestablerta).

Causalitat

El punt anterior planteja la qüestió fonamental de si les interconnexions causals estan prohibides absolutament en la mecànica quàntica. De fet, la mecànica clàssica reconeix només el que s'anomena la causalitat eficient o mecànica i rebutja la doctrina aristotèlica de la multiplicitat de causes. No obstant això, si els sistemes quàntics distants no intercanvien senyals i si els resultats dels mesuraments són aleatoris, no es pot aplicar en aquests casos el model de causalitat eficient. L'*entanglement* representa un conjunt de restriccions sobre els resultats possibles: de fet, com EPR entengué perfectament, en cas d'obtenir un determinat resultat en una de les dues partícules en l'estat anomenat EPR, seríem capaços de predir les propietats de l'altra partícula bessona. Això demostra que l'*entanglement* actua com una reducció de l'espai dels possibles resultats i, per tant, pot ser assimilada a una mena de causa formal. Això també planteja la qüestió de com concebre la causalitat formal. A. Zeilinger proposa considerar l'*entanglement* com una correlació entre la informació que podem obtenir de dos sistemes entrellaçats. Tècnicament parlant, l'*entanglement* és una forma d'informació mútua entre sistemes distants. Per tant, per tal d'entendre els efectes quàntics sense negar la causalitat com a tal i sense, per tant, recórrer als miracles, hem d'ampliar la nostra noció de causalitat mitjançant la revisió del paper de les causes formals.

L'anàlisi anterior de les tres categories de problemes posa de manifest la necessitat de tenir una interpretació ontològica de la teoria que no sigui naïf, en un sentit clàssic, i que estigui en consonància amb els resultats que coneixem de la mateixa teoria física.

De la presentació que acabem de fer sobre el problema de la mesura, n'hem individuat tres estadis que impliquen tres categories importants de la física: l'estat, els obser-

vables i les propietats. Intentarem entendre quina pot ser la significació ontològica d'aquestes tres categories principals de la teoria.

1. L'estat quàntic és molt diferent en relació amb l'estat clàssic a causa de la superposició, que mostra termes d'interferència que no tenen un anàleg clàssic. Com hem vist en la part introductòria d'aquest article, d'acord amb la mecànica clàssica, un estat representa la informació completa que podem tenir sobre un sistema en un moment determinat (*Omnimoda determinatio*). També se suposa que es pot extreure tota la informació d'aquest sistema, que és una espècie d'observable i que, per tant, és tractat com si tingués una realitat immediata i individual. En canvi, la mecànica quàntica mostra que no es pot considerar d'aquesta manera. Mesurar ens ajuda a entendre l'estat com una classe d'equivalència de preparacions. En altres paraules, l'estat no és una realitat individual (o associada a una realitat individual), sinó que té més aviat la naturalesa d'un universal (d'una classe). Això no exclou la noció d'estat de qualsevol significació ontològica. De fet, ens trobem davant d'una peça d'una ontologia que podríem anomenar interpretada per la teoria, és a dir, davant d'una categoria teòrica ancorada a la realitat, però que no expressa isomòrficament aquesta realitat.

2. Per bé que diferents configuracions experimentals puguin donar lloc a la mesura d'un cert observable, podem entendre el concepte d'observable com una classe d'equivalència també, en aquest cas, de premesuraments. L'observable constitueix igualment una peça d'una ontologia interpretada, és a dir, una categoria teòrica ancorada a la realitat, que significaria no pas una entitat individual sinó una classe.

3. Finalment, una propietat pot ser entesa com una classe d'equivalència d'esdeveniments de detecció, i per tant tenir els mateixos caràcters generals que les dues categories anteriors. De fet, un esdeveniment en si mateix només s'esdevé i no diu res de res del sistema. És només gràcies als passos previs de preparació i premesurament que podem inferir que el sistema objecte, de fet, té aquesta propietat donat un tal esdeveniment.

Abans de continuar, mirem d'evitar un possible malentès. Ja que hem obtingut aquestes categories gràcies a un procediment de mesura, es podria pensar que aquestes depenen del procediment específic que duem a terme en un laboratori, cosa que suposaria una forma d'idealisme. De fet, hem de pensar la mesura com un tipus específic d'interacció entre sistemes oberts, és a dir, entre sistemes que estan oberts a l'ambient circumstant (cosa que permet el desplaçament local d'ordre i desordre). En definitiva, aquesta estructura ontològica té un significat universal i no depèn dels procediments que els éssers humans puguin realitzar.

Fet aquest aclariment, la principal pregunta que ens podem fer és a quin tipus de realitat es refereixen aquestes categories. Ja hem comentat que un estat quàntic també presenta termes d'interferència que no tenen un anàleg clàssic. Podem anomenar aquests termes *aspectes característics*, fent al·lusió al fet que tots ells són, en primer lloc, caràcters reals de l'estat que determinen el comportament específic del sistema i, segonament, caràcters no locals. Per aquesta raó, aquests *aspectes característics* no poden ser considerats

propietats, ja que, per definició, les propietats són locals. És important entendre que ni podem mesurar ni podem tenir evidència directa de l'existència d'aquests *aspectes característics*. Poden ser, però, inferits. No obstant això, ja que determinen el comportament dels sistemes quàntics, han de ser reals i la seva realitat pot ser comprovada encara que de formes indirectes.

D'altra banda, ja s'ha dit que les propietats es refereixen als esdeveniments. Per tant, els esdeveniments són una peça més de la realitat (en aquest cas, totalment local) que ens permet fer aquesta atribució ontològica. No obstant això, tal com s'ha esmentat, també els esdeveniments en si mateixos són cecs i no ens diuen res, si no és a través de certes condicions, com ara una disposició experimental específica.

Per tant, podem pensar que la realitat en el sentit ple de la paraula és una mena d'interacció dinàmica entre els esdeveniments i els *aspectes característics*, ja que, d'una banda, en tota mena d'interacció aquests dos elements hi són sempre involucrats, i de l'altra, és només en el context d'un determinat procés dinàmic que poden jugar un paper ontològic.

En conclusió, els anomenats *aspectes característics*, els esdeveniments i la interacció dinàmica entre ells són alhora allò que inferim, donada la teoria quàntica i certs procediments, i allò que representen les condicions objectives necessàries per a tenir aquests procediments (preparació, premesurament i mesura) que ens permeten parlar de les tres peces d'una ontologia interpretada (estat, observable i propietat). Per tant, aquests tres aspectes, els anomenats *aspectes característics*, els esdeveniments i la interacció dinàmica entre ells, poden ser anomenats fragments d'una ontologia (ara sí) no interpretada: són els elements constitutius de la realitat, però no són directament accessibles a nosaltres. Des d'aquest punt de vista de la inaccessibilitat de la realitat, EPR tenia en part raó, tot i que no en el sentit que la teoria quàntica s'hagi d'integrar amb algun tipus d'ontologia clàssica amagada. En conclusió, només aquestes operacions (i les seves contraparts en els processos espontanis que succeeixen en el nostre món) són capaces d'establir un pont entre la teoria i la realitat. Aquesta és una lliçó general que pot llançar llum sobre un tema que, malauradament, estava ocult en part per la mecànica clàssica.

S'ha esmentat abans que podem interpretar les correlacions com una mena de causa formal. De fet, l'*entanglement* indueix una forma de restricció de l'espai dels possibles resultats del mesurament. Hi ha un llenguatge per a fer front a qüestions d'aquest tipus: el de la informació. A. Zeilinger defineix la informació com la interdependència entre resultats possibles, és a dir, entre els possibles esdeveniments de selecció d'informació. En altres paraules, la informació apareix de dues formes: com una interdependència pura (informació mútua) i com a adquisició d'informació, que requereix un tipus de procediment local com la mesura i representa una selecció de la informació que pot ser continguda en el sistema. En altres paraules, s'està assumint, de fet, que la noció aristotèlica de potència pot ser de gran ajuda per a fer front a aquests tipus de qüesti-

ons. Mirem-ho amb una mica de detall. L'*entanglement* representa una quantitat d'informació que pot ser adquirida en etapes posteriors. Per exemple, quan dos sistemes s'entrellacen podem fer ús de la reserva d'informació per a transmetre informació de maneres clàssicament prohibides (l'anomenat teletransport). Aquesta és una diferència important amb relació a la modernitat, que entenia que només la realitat actual o les possibilitats eren categories viables. De fet, la potència significa una cosa molt diferent tant pel que fa a la realitat actual com a la possibilitat, ja que es refereix a les restriccions que existeixen en el nostre món que, encara que reals, no tenen un poder dinàmic en si mateixes.

Tinguem en compte, a més, que el que la mecànica quàntica ens diu és que, si bé podem tenir interdependències entre el que podem posteriorment seleccionar com a informació rellevant, la forma en què codifiquem la informació és sempre un procediment local. En altres paraules, la mecànica quàntica pot ser considerada com la teoria general de com la informació s'intercanvia en el nostre univers i, per tant, també de les possibles interconnexions causals. Aquest punt de vista no tan sols evoca la noció aristotèlica de potència, sinó també la seva noció de causa agent i, tal com s'ha dit, la seva noció d'una multiplicitat de causes.

Un darrer problema important és el de la individuació. Els tres passos del procés de mesura es poden considerar com a etapes d'una determinació progressiva. A partir d'un estat inicial que només representa una quantitat potencial d'informació i que, per tant, és encara indeterminat, som conduïts a través d'un procés dinàmic a un resultat final que representa l'adquisició d'informació específica i, per tant, una determinació local del sistema. Aquesta determinació local representa, al seu torn, les condicions necessàries per a la construcció de les estructures de la matèria del nostre món i, per tant, el substrat físic bàsic del nostre món macroscòpic. En altres paraules, podem pensar la individualitat com el resultat que emergeix d'un món quàntic encara ple d'una quantitat significativa d'indeterminació.

Com es pot veure, els problemes que la mecànica quàntica posa sobre la taula entren de ple en el marc d'una filosofia de la naturalesa. De fet, al meu parer, n'estimulen el desenvolupament, perquè estimulen el pensament sobre la relació entre una teoria físicomatemàtica i una realitat que li dona suport i que vol ser entesa per mitjà d'aquesta teoria. No n'hi ha prou de respondre: «*It works*» (funciona), com deia R. Feynman (1918-1988), un dels més grans físics del segle XX i premi Nobel (1965), quan li preguntaven sobre si entenia la mecànica quàntica. La mecànica quàntica, per tot el que presenta d'enigmàtica, d'incomprensible (s'entén, analitzat conscientment o inconscient des del paradigma filosòfic de la física clàssica), posa sobre la taula del debat filosòfic la necessitat de recórrer de nou a la filosofia de la naturalesa, per a poder comprendre no tan sols com funciona la realitat sinó com aquesta realitat és.

Bibliografia

- AULETTA, G., *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics*, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong 2000.
- , «Some lessons of Quantum Mechanics for cognitive science». *Intellectica* 36-37 (2003), 293-317.
- , «How Quantum Mechanics Suggests New Insights in Metaphysics and Natural Theology». *Antonia-num* 78 (2003), 705-710. Rev. ed. under the title «The 'Trialistic' Structure in Physics: New Insights for Metaphysics and Natural Theology», C.L. HARPER (ed.), *Spiritual Information*, Philadelphia 2005, 181-187.
- , «Critical Examination of the Conceptual Foundations of Classical Mechanics in the Light of Quantum Physics». *Epistemologia* 27 (2004), 55-82.
- , «Decoherence and Triorthogonal Decomposition». *International Journal of Theoretical Physics* 43 (2004), 2263-2274.
- , «Quantum Information and Inferential Reasoning». *Foundations of Physics* 35 (2005), 155-69.
- , «Quantum Information as a General Paradigm». *Foundations of Physics* 35 (2005), 787-815.
- , «The Ontology Suggested by Quantum Mechanics», P. VALORE (ed.), *Topics on General and Formal Ontology*, Milan 2006, 161-179.
- , «The Problem of Information», G. AULETTA (ed.), *The Controversial Relations Between Science and Philosophy: A Critical Assessment*, Vatican City 2006, 109-127.
- , «Il dibattito tra Einstein, Bohr e Schrödinger: Causalità, determinazione e azione a distanza». *Il Protagora* 9 (2007), 181-198.
- , «How Many Causes Are There?». *21mo secolo. Scienza e tecnologia* 5 (2008), 41-48.
- , «What About the Three Forms of Inference?». *Acta Philosophica* 1.18 (2009), 59-74.
- , «Correlations and Hyper-Correlations». *Journal of Modern Physics* 2 (2011), 958-961.
- , (in collaboration with I. Colagè, P. D'Ambrosio, and L. Torcal), *Integrated Cognitive Strategies in a Changing World*, Rome 2011.
- , «Inferences with Information». *Universal Journal of Applied computer Science and Technology* 2.2 (2012), 216-221.
- AULETTA, G.; TAROZZI, G., «Wavelike Correlations versus Path Detection. Another Form of Complementarity». *Foundations of Physics letters* 17 (2004), 889-895.
- , «On the Physical Reality of Quantum Waves». *Foundations of Physics* 34 (2004), 1675-1694.
- , «Premeasurement vs. Measurement: A Basic Form of Complementarity», C. GAROLA, A. ROSSI, S. SOZZO (eds.), *The Foundations of Quantum Mechanics: Historical Analysis and Open Questions*, Singapore 2006, 40-47.
- AULETTA, G.; TORCAL, L., «From Wave-Particle to Features-Event Complementarity». *International Journal of Theoretical Physics* 50 (2011), 3654-3668.
- AULETTA, G.; WANG, S.-Y., *Quantum Mechanics for Thinkers*, Peking, 2013.
- AULETTA, G.; ALAI, M.; TAROZZI, G., «Einstein's Local Realism and the Realistic Interpretation of the Wave Function», C. ALUNNI, M. CASTELLANA, D. RIA, A. ROSSI (eds.), *A. Einstein et H. Weyl (1955-2005). Questions épistémologiques ouvertes*, Paris-Maglie 2009, 33-49.
- AULETTA, G.; FORTUNATO, M.; PARISI, G., *Quantum Mechanics*, Cambridge 2009; 2nd ed. 2013.
- BELL, J.S., «On Einstein Podolsky Rosen Paradox». *Physics* 1 (1964), 195-200; rep. *Speakable and Un-speakable in Quantum Mechanics*, 14-21.
- , «On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics». *Review of Modern Physics* 38 (1966), 447-452; rep. in *Speakable and Un-speakable in Quantum Mechanics*, 1-13.
- , *Speakable and Un-speakable in Quantum Mechanics*, Cambridge 1994.

- BOHR, N., «On The Constitution Of Atoms And Molecules». *Philosophical Magazine* 26 (1913), 1-25, 476-502, 857-875.
- , «The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory». *Nature* 121 (1928), 580-590.
- , «Quantum Mechanics and Physical Reality». *Nature* 136 (1935), 65.
- , «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?». *Physical Review* 48 (1935), 696-702.
- , «Causality and Complementarity». *Philosophy of Science* 4 (1937), 289-298.
- , «Natural Philosophy and Human Cultures». *Philosophical Writings*, II, 23-31.
- , «On the Notions of Causality and Complementarity». *Dialectica* 1 (1948), 312-319.
- , «Discussion With Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», A. SCHILPP (ed.), *Albert Einstein*, 201-241.
- , «Quantum Physics and Philosophy», in R. KYLBALSKY, (ed.), *Philosophy in the Mid-Century*, Firenze 1958; rep. in *Philosophical Writings*, III, 1-7.
- , «Atoms and Human Knowledge» in *Philosophical Writings*, II, 83-93.
- , *Atomic Physics and Human Knowledge*, New York 1958.
- , «The Genesis of Quantum Mechanics» in *Philosophical Writings*, III, 74-78.
- , «The Solvay Meetings and the Development of Quantum Physics» in *Philosophical Writings*, III, 79-100.
- , *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge 1961.
- , *Collected Works*, Amsterdam 1985-1996.
- , *Philosophical Writings*, Woodbridge (Connecticut) 1958-1963, 1987.
- EINSTEIN, A., «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt». *Annalen der Physik* 17 (1905), 132-148.
- , «Prinzipien der Forschung», rep. in *Mein Weltbild*, 107-113.
- , «On the Method of Theoretical Physics». *Philosophy of Science* 1 (1934), 163-169.
- , «Physik und Realität». *Journal of Franklin Institute* 221 (1936), 349-382; eng. tr. in *Out of My Later Years: Estate of A. Einstein*, 59-97.
- , «Quantenmechanik und Wirklichkeit». *Dialectica* 2 (1948), 320-324.
- , «Remarks Concerning the Essays Brought Together in This Co-operative Volume», in A. SCHILPP (ed.), *Albert Einstein*, 665-688.
- , *Out of My Later Years: Estate of A. Einstein*, New York 1956.
- , *Mein Weltbild*, Frankfurt a. M. 1993.
- EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N., «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?». *Physical Review* 47 (1935), 777-780.
- HEISENBERG, W., «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen». *Zeitschrift für Physik* 33 (1925), 879-893.
- , «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik». *Zeitschrift für Physik* 43 (1927), 172-198.
- , *Physics and Philosophy*, New York 1958.
- , *Der Teil und das Ganze, Gespräche im Umkreis der Atomphysik*, München 1969.
- KOYRÉ, A., *From the Closed World to the Infinite Universe*, Baltimore 1957.
- NEWTON, I., *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, London 1687; Cambridge 1713; London 1726; Harvard 1972 (eds. A. KOYRÉ–I. B. COHEN).
- SÁNCHEZ RON, J.M., «Espacio-Tiempo y átomos. Relatividad y mecánica cuántica». *Historia de la ciencia y de la técnica* 51, Los Berrocales del Jarama 1992.

- , *Historia de la física cuántica. El periodo fundacional (1860-1926)*, Barcelona 2001.
- SCHRÖDINGER, E., «Quantisierung als Eigenwertproblem I». *Annalen der Physik* 79 (1926), 361-376.
- , «Quantisierung als Eigenwertproblem II». *Annalen der Physik* 79 (1926), 489-527.
- , «Quantisierung als Eigenwertproblem III». *Annalen der Physik* 80 (1926), 437-490.
- , «Quantisierung als Eigenwertproblem IV». *Annalen der Physik* 81 (1926), 109-139.
- , «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. I-III». *Naturwissenschaften* 23 (1935), 807-812, 823-828, 844-849.
- , «Discussion of Probability Relations Between Separated Systems». *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 32 (1935), 446-452.
- , *Mind and Matter*, Cambridge 1958; rep. in *What is Life? with Mind and Matter and Autobiographical Sketches*, 91-164.
- , *What is Life?*, Cambridge 1967; rep. in *What is Life? with Mind and Matter and Autobiographical Sketches*, 1-90.
- , *What is Life? with Mind and Matter and Autobiographical Sketches*, Cambridge 1992.
- WHEELER, J.A., «The "Past" and the 'Delayed-Choice' Double-Slit Experiment», A.R. MARLOW (ed.), *Mathematical Foundations of Quantum Theory*, New York 1978, pp. 9-48.
- , «Law Without Law», in J.A. WHEELER – W. ZUREK (ed.), *Quantum Theory and Measurement*, 182-213.
- , «Information, Physics, Quantum. The Search for Links», in W. ZUREK (ed.), *Complex, Entropy, and the Physics of information*, Reading, Massachusetts 1995⁷.
- WHEELER, J.A.; ZUREK, W. (eds.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton 1983.
- ZEILINGER, A., «A Foundational Principle for Quantum Mechanics». *Foundations of Physics* 29 (1999), 631-643.
- , «Quantum Entangled Bits Step Closer to It». *Science* 289 (2000), 405-406.
- , «Why the Quantum? It From Bit? A Participatory Universe? Three Far-Reaching Visionary Questions from John Archibald Wheeler and How They Inspired a Quantum Experimentalist», J.D. BARROW *et al.* (eds.), *Science and Ultimate Reality*, 201-220.
- ZUREK, W.H., «Pointer Basis of Quantum Apparatus: Into What Mixture Does the Wave Packet Collapse?». *Physical Review D* 24 (1981), 1516-1525.
- , «Environment-Induced Superselection Rules». *Physical Review D* 26 (1982), 1862-1880.
- (ed.), *Complexity, Entropy and the Physics of Information*, Redwood City 1990.
- , «Decoherence and the Transition from Quantum to Classical». *Physics Today* 44.10 (1991), 36-44.
- , «Quantum Darwinism and Envariance», J.D. BARROW *et al.* (eds.), *Science and Ultimate Reality*, 121-137.
- , «Quantum Origin of Quantum Jumps: Breaking of Unitary Symmetry Induced by Information Transfer in the Transition from Quantum to Classical». *Physical Review A* 76 (2007), 052110-1-5.
- , «Wave-Packet Collapse and the Core Quantum Postulates: Discreteness of Quantum Jumps from Unitarity, Repeatability, and Actionable Information». *Physical Review A* 87.5 (2013), 052111.

Lluc TORCAL

Facultat de Teologia de Catalunya

lluc.torcal@ocist.org

Article rebut: 18 de novembre de 2013. Article acceptat: 27 de gener de 2014.