

VICENT PICÓ
Universitat de València

La filosofia de la teoria quàntica

The philosophy of quantum theory

Rebut: 16/9/22. Acceptat: 1/11/22

Resumen: La teoria quàntica representa una de les fites més importants de la història de la ciència del segle XX, tant pel que fa a les seues implicacions teòriques i tecnològiques com pel que fa als problemes conceptuals que planteja la seua interpretació. Aquest article constitueix una revisió de les propostes interpretatives del formalisme quàntic d'ençà que la teoria es va axiomatitzar a les acaballes de la dècada dels anys 20 del segle passat. Aquestes propostes incideixen en problemes filosòfics com la no-localitat, l'indeterminisme, la probabilitat o el realisme científic, per a cadascun dels quals s'ofereix una resposta temptativa a partir de la interpretació del formalisme corresponent.

Abstract: Quantum theory represents one of the most important milestones in the history of science in the 20th century, both in terms of its theoretical and technological implications and in terms of the conceptual problems posed by its interpretation. This article constitutes a review of the interpretive proposals of the quantum formalism since the theory was axiomatized at the end of the decade of the 20s of the last century. These proposals rise philosophical problems such as non-locality, indeterminism, probability or scientific realism, for each of which a tentative answer is offered based on the interpretation of the corresponding formalism.

Palabras clave: Teoria quàntica, problema de la mesura, variables ocultes, molts mons, col·lapse objectiu.

Keywords: Quantum theory, measurement problem, hidden variables, many worlds, objective collapse.

LES FITES ASSOLIDES per la filosofia de la ciència durant el segle XX no es podrien entendre sense els avenços de la física teòrica de les primeres dècades del segle passat. Les dues gran revolucions en les teories de la física fonamental, ço és, el naixement de la teoria quàntica al voltant de l'any 1900 i de la teoria de la relativitat especial proposada per Albert Einstein l'any 1905, compten com a dos moments històrics que expliquen el desenvolupament de la reflexió filosòfica sobre la ciència i, en particular, sobre les ciències físiques.

D'una banda, la naixent teoria quàntica va permetre explicar fenòmens com la radiació de cos negre (1900), l'efecte fotoelèctric (1905) o l'estabilitat atòmica (1913), però no va ser fins la dècada dels anys 20 que es va aconseguir una formalització de la teoria. Werner Heisenberg (1925) i Erwin Schrödinger (1926) van proposar la mecànica matricial i la mecànica ondulatoria, respectivament, com a teories que superaven la mecànica newtoniana de partícules i explicaven els fets experimentals observats. John von Neumann (1932/1955) va axiomatitzar totes dues teories en un únic formalisme, tot demostrant l'equivalència de les seues prediccions empíriques (cosa que ja havia mostrat Schrödinger el mateix any de la publicació de la seua teoria).

D'altra banda, la teoria de la relativitat especial va suposar una extensió de la teoria electromagnètica de James C. Maxwell, tot suposant una revisió de les transformacions de Galileu utilitzades en la mecànica newtoniana. Aquestes van ser substituïdes per les transformacions de Lorentz per tal de mantenir la invariància de les lleis de l'electromagnetisme, amb la qual cosa la mecànica newtoniana va deixar el seu lloc a la mecànica relativista, i la visió de Newton de les lleis de la dinàmica con un balanç entre forces va deixar el seu lloc a una visió geomètrica de les interaccions en l'espai-temps.

Aquests dos canvis teòrics, coincidents en el temps, van provocar, al seu torn, una revolució conceptual. La idea d'espai i temps absoluts, així com la de simultaneïtat, van ser abandonades en favor d'una idea relativa d'espai-temps en quatre dimensions (tres dimensions espacials i una de temporal). La separació entre subjecte i objecte, típica de les teories clàssiques fins a les acaballes del segle XIX, va quedar en entredit, ja que les partícules subatòmiques tenien comportaments difícils d'explicar sota el paraigua de les teories físiques anteriors. Aquestes partícules exhibien, ara i adés, comportaments teòricament incompatibles, sotmetent-se al que es coneix com a la dualitat ona-partícula. Niels Bohr (1934/1988) explica aquest fet tot canviant de marc conceptual, defensant el fenomen de la complementarietat, segons el qual, en la nova física és impossible fer una descripció, al mateix temps, causal i espai-temporal de les propietats físiques d'un objecte i de la seua evolució.

Totes aquestes noves idees van configurar un primer terç del segle XX en el qual la filosofia de la ciència va oscil·lar entre una posició definidament po-

sitivista i una visió instrumentalista (si no idealista) de les teories científiques. Deixant de banda la història de les teories de la relativitat especial i general, i com això afecta als conceptes d'espai i temps, i al concepte de causalitat, em centraré en aquestes pàgines en les conseqüències de la teoria quàntica pel que fa a la filosofia de la física, des de la seua formulació fins a l'actualitat, fent èmfasi en els debats actuals i en les perspectives de futur de la filosofia de la teoria quàntica.

Cal aclarir, en primer lloc, una qüestió terminològica. És habitual parlar del problema de la radiació de cos negre, de l'efecte fotoelèctric i del model de l'àtom d'hidrogen de Bohr, com a problemes de la *vella* teoria quàntica, o de la teoria quàntica *tout court*. La teoria axiomatitzada per von Neumann sol rebre el nom de mecànica quàntica, doncs compta com una teoria que reuneix la mecànica matricial de Heisenberg i la mecànica ondulatoria d'Schrödinger en un únic formalisme. La generalització d'aquest formalisme a una descripció covariant Lorentz es coneix com a teoria quàntica de camps, i és una teoria quàntica relativista en la qual les partícules puntuals són substituïdes per camps com a entitats fonamentals de l'ontologia de la teoria. En endavant, faré servir l'expressió 'teoria quàntica' per a referir-me a qualsevol d'aquestes teories i, quan siga convenient, faré explícita la distinció entre la mecànica quàntica (de partícules, no relativista) i la teoria quàntica de camps (relativista).

La teoria quàntica és, possiblement, una de les teories més exitoses de la història de la ciència. Permet, per exemple, fer el càlcul de la càrrega de l'electró amb una precisió enorme, compatible amb la seua mesura experimental. Constitueix, a més, el fonament de moltes de les aplicacions tecnològiques que han permès el progrés de la societat a un ritme que no podria haver-se imaginat fa només un segle. La tecnologia dels semiconductors, bàsica per a la fabricació dels microxips que fan funcionar tots els aparells electrònics arreu del món, la física nuclear aplicada a la generació d'energia o al diagnòstic i el tractament en medicina, o els grans avenços en la teoria de l'estat sòlid i el descobriment i disseny de nous materials, són només uns exemples de l'èxit predictiu, científic i tecnològic, que ha tingut la teoria quàntica d'ençà que es va proposar. No obstant això, una cosa és l'èxit en la predicció i en la aplicació tecnològica, i una altra cosa és la comprensió de la realitat que la teoria proporciona. En aquest segon aspecte, la teoria quàntica és coneguda per constituir una font inexhaurible de problemes conceptuals, contradiccions i, si més no, paradoxes, que fan de la seua interpretació una tasca complexa. No existeix un consens sobre què és allò que la teoria quàntica ens diu sobre el món ni sobre quina és la forma adient d'interpretar el seu formalisme.

Aquest comportament, exitós quant a l'aplicació tecnològica, però sense una base sòlida per a la comprensió dels conceptes que fa servir, suposa el

punt de partida idoni per a l'activitat filosòfica i, per aquest motiu, els debats sobre la interpretació de la teoria quàntica han sigut constants al llarg de tot el segle xx i principis del segle XXI. La filosofia de la física ha tingut, de fet, durant molt de temps, la qüestió quàntica com un dels eixos centrals sobre els quals ha desenvolupat la seua activitat. Només les reflexions sobre els conceptes d'espai i temps i la seua relació amb les teories de la relativitat especial i general, han gaudit d'una dedicació gairebé comparable a la que els filòsofs de la física han dedicat a la teoria quàntica.

Pel que fa a la relació entre disciplines, també ha sigut constant el diàleg entre la comunitat de físics i la de filòsofs de la física (la majoria d'ells, al seu torn, físics de formació). En aquesta convivència també han participat, ara i adés, els metafísics, doncs moltes de les qüestions que es plantegen en el debat interpretatiu de la teoria quàntica tenen inevitablement un caire metafísic. De fet, la disciplina coneguda com a metafísica de la ciència (SCHRENK 2016) naix com a resposta a alguns dels problemes plantejats des de les teories de la física a la metafísica en general. Hi ha qui pensa que la metafísica deu informar la ciència per tal que aquesta elabore les seues teories amb les restriccions metafísiques adients; també hi ha qui pensa, contràriament, que la ciència és qui deu informar la metafísica i que tota teoria metafísica deu tenir en compte allò que les teories més exitoses de la ciència afirmen. Per exemple, en l'àmbit de la teoria de la relativitat especial, sembla que no és possible reconciliar una posició presentista respecte del concepte de temps (segons aquesta concepció, allò que existeix realment són només els objectes i esdeveniments presents) amb la relativitat de la simultaneïtat que s'obté com a conseqüència dels postulats de la teoria de la relativitat especial. Per tant, si hom defensa que la ciència ha d'informar la metafísica, cal abandonar el presentisme com a posició metafísica envers el temps i defensar, per exemple, una visió eternalista (segons la qual tots els esdeveniments, passats i futurs, així com els presents, tenen la mateixa existència real). Qui defense la posició alternativa, segons la qual la metafísica és prèvia a la física, la incompatibilitat entre presentisme i relativitat especial es resoldria renunciant a la teoria de la relativitat especial, si bé no caldria abandonar-la tota ella sinó únicament trobar una forma alternativa d'interpretar-la o canviar algun aspecte fonamental del qual es deriva la contradicció amb el presentisme.

En la pràctica, hi ha que defensa una posició intermèdia (ESFELD 2007): la física i la metafísica han d'informar-se mútuament, de manera que els nostres prejudicis metafísics, que parteixen, per exemple, del sentit comú, o d'altres teories científiques, són la base sobre la qual és possible construir i interpretar una determinada teoria científica. En aquest sentit, la metafísica és prèvia a la física. Per un altre costat, allò que la teoria científica diu sobre el món, una

vegada interpretat el seu formalisme, imposa una sèrie de restriccions sobre quin ha de ser el conjunt d'afirmacions metafísiques que podem defensar i, en particular, l'ontologia del món segons el descriu la teoria. És a dir, les nostres pressuposicions metafísiques determinen *de què* parla la teoria, mentre que la teoria determina *com és* això de què la teoria parla. Aquesta visió és compartida, per exemple, per Michael Esfeld (2014) i Valia Allori (2013), defensors d'una posició coneguda com ontologia primitiva.

EL PROBLEMA DE LA MESURA

En aquesta secció introduiré el problema de la mesura, tant des del punt de vista històric com metodològic. És un problema central en la història de la teoria quàntica perquè apareix en la formulació dels postulats de la teoria segons els entenia von Neumann l'any 1932. En aquella formulació, hi ha postulats que són semblants als d'altres teories de la física (en particular, als de la mecànica clàssica de partícules), mentre que n'hi ha un, el postulat de la mesura, que no té anàleg en les teories anteriors, pel fet que inclou a l'agent o l'observador com a element a descriure per la pròpia teoria.

La mesura com a concepte teòric no és a aliè a la física anterior a l'any 1900, però jugava un paper completament independent de la teoria en qüestió. La mesura física serveix per a contrastar prediccions i fer observacions, de manera que constitueix un lligam entre l'observador i allò observat. Sense mesura no és possible portar a terme cap contrastació empírica. Tanmateix, la descripció de l'acte de mesurar no resta inclosa en el formalisme de la teoria, ans al contrari, n'és un prerrequisit: cal pressuposar que és possible fer mesures que ens permeten contrastar les nostres prediccions. Què compte com a mesura o observació i què no, dependrà, no tant de la teoria i del seu formalisme, com de la disponibilitat tecnològica, de la precisió desitjada o de l'objectiu pràctic que es pretén assolir. Per tant, no és la noció de mesura que és aliena a la manera de fer ciència fins al segle XIX, sinó el rol específic que juga en el formalisme quàntic d'ençà de la formulació de Von Neumann de la teoria quàntica. Per aquest motiu, en aquesta secció cal revisar aquesta formulació per tal de determinar on apareix l'acte de mesurar i, el que és més important, entendre per què és (o pot ser) problemàtic i, si és possible, trobar-ne la interpretació més adient.

La formulació de la teoria quàntica per part de Von Neumann està estructurada en postulats, que pretenen servir de punt de partida per a la deducció de tots els fenòmens observats en aquell temps i, al mateix temps, fer entendre l'equivalència de les teories de la mecànica matricial i de la mecànica ondulatòria formulades per Heisenberg i Schrödinger pocs anys abans.

El primer postulat estableix que l'estat d'un sistema físic ve descrit per un vector d'estat, que és un objecte matemàtic pertanyent a un espai de Hilbert. A la representació d'aquest vector d'estat en una determinada base se la sol anomenar funció d'ona. El segon postulat estableix que els observables de la teoria venen representats per operador lineals autoadjunts dins d'aquell mateix espai de Hilbert.

Els dos primers postulats no tenen un contingut estrany a la forma típica d'axiomatitzar una teoria científica. Per exemple, els postulats anàlegs de la mecànica clàssica de partícules estableixen, d'una banda, que l'estat d'una partícula ve descrit per un punt en l'espai de fases (si fem servir el formalisme hamiltonià de la mecànica clàssica) i les magnituds observables venen descrites per funcions reals de variables reals. És a dir, per a descriure l'estat d'una partícula i les seues propietats, cal un espai matemàtic (sigués l'espai de Hilbert en la teoria quàntica, o l'espai de fases en la teoria clàssica) i un objecte definit sobre ell (operadors autoadjunts en l'espai de Hilbert, o funcions en l'espai de fases). Un exemple senzill de descripció d'una propietat d'una partícula en totes dues teories seria la seua posició. En la teoria clàssica, la posició ve descrita per les funcions *coordenades*, que depenen d'un sistema de referència triat, que assignen a cada punt de l'espai de fases un conjunt de valors numèrics: la posició de la partícula vindria representada per aquests valors. En la teoria quàntica, l'operador posició no assigna un conjunt de valors numèrics a cada vector de l'espai de Hilbert sinó que assigna un valor esperat (que és un valor numèric) i un conjunt de valors numèrics complexos (que són projeccions sobre vectors propis) associats a un altre conjunt de valors numèrics reals (que són els valors propis de l'operador).

Per tal de simplificar la descripció, una partícula quàntica en un determinat estat representat per un vector d'un espai de Hilbert, podria tenir la seua posició representada pels valors numèrics, posem per cas, $1/\sqrt{2}$, $i/\sqrt{2}$ i 0 , associats al seu torn als valors numèrics 1 , 2 i 3 , per exemple. Com cal entendre aquesta assignació de valors numèrics a un operador pel que fa a un determinat estat? Els tres valors reals (1 , 2 i 3) representen posicions físiques genuïnes en les quals es pot trobar la partícula. Caldria mesurar-los en alguna unitat física (per exemple, en metres). En canvi, els altres tres valors numèrics, no poden representar valors possibles de la posició de la partícula perquè no són, en general, valors reals (el segon d'ells pren un valor imaginari pur, amb la unitat imaginària $i=\sqrt{-1}$ al numerador). Són coeficients que s'interpreten com a amplituds de probabilitat en el sentit següent: el càlcul del seu mòdul al quadrat dóna com a resultat la probabilitat de trobar a la partícula en la posició associada a cada valor. Per exemple, si calculem el mòdul al quadrat dels tres valors numèrics de l'exemple proposat, obtenim $1/2$, $1/2$ i 0 . Per tant, podem

dir que la partícula descrita pel vector de l'espai de Hilbert té una posició que val 1 amb una probabilitat $1/2$, val 2 amb una probabilitat $1/2$ i val 3 amb una probabilitat 0.

El tercer postulat introdueix l'equació d'Schrödinger com a descripció de l'evolució temporal d'un estat d'un sistema quàntic. L'evolució descrita per l'equació és unitària i, per tant, determinista. Conegut l'estat d'una partícula en un determinat instant de temps, és possible calcular quin serà el seu estat en un instant diferent (passat o futur). L'anàleg clàssic al tercer postulat és la segona llei de la dinàmica de Newton o, en els formalismes lagrangiana i hamiltoniana, l'equació d'Euler-Lagrange i les equacions de Hamilton, respectivament.

El quart postulat o postulat de la mesura és el més conflictiu quant a la seua interpretació i manca d'anàleg clàssic. Estableix que, quan hom mesura un sistema quàntic, la seua evolució temporal deixa d'estar regida per l'equació d'ona d'Schrödinger i segueix unes directrius diferents: si es mesura l'observable sobre el sistema, el valor obtingut per a aquest observable serà un dels seus valors propis (recordem, els valors 1, 2 i 3 de l'exemple) amb una probabilitat determinada pel mòdul al quadrat dels coeficients associats als vectors propis de l'operador lineal corresponent. L'evolució, en aquestes condicions, deixa de ser unitària i es torna indeterminista, i se sol dir que la funció d'ona associada a l'estat del sistema col·lapsa. Tot el que la teoria quàntica pot dir és quins valors es poden obtenir i amb quina probabilitat. A més, després de la mesura, l'estat de la partícula canvia de manera que una nova mesura del mateix observable donaria com a resultat el mateix que s'hagués obtingut, ara amb una probabilitat igual a 1.

El postulat de la mesura és conflictiu per diverses raons. En primer lloc, estableix una evolució temporal que no és determinista, en conflicte amb les lleis d'evolució conegudes de les teories clàssiques. A més, això provoca que els sistemes quàntics tinguen un comportament dual: de vegades es comporten com prediu l'equació d'Schrödinger, que és determinista, i de vegades es comporten de forma *abrupta*, canviant el seu estat a un estat propi de l'observable que ha estat mesurat. Aquest canvi discontinu s'anomena habitualment col·lapse. En segon lloc, aquesta dualitat té lloc quan es produeix una mesura, però la mateixa teoria i el seu formalisme no proporcionen un criteri per establir en quin moment s'ha produït. Al contrari, sabem que quan es produeix una mesura, l'evolució no és unitària; però tot el que sabem de la mesura és que això és precisament el que provoca. Una conseqüència d'aquesta arbitrarietat en la definició de mesura és que podem definir un acte de mesurar en escales ben diferents. Això ho va fer constar Schrödinger en el seu famós exemple del gat (1980): si descrivim la mesura des del punt de vista del gat, el flascó amb el verí estarà trencat o no trencat i, per tant, el gat estarà viu o mort, però si fem la descripció des del punt de vista d'un observador extern, fins que no faça la

mesura, l'estat del sistema 'flascó + gat' no canvia de forma abrupta i segueix l'evolució determinista donada per l'equació d'ona. El gat no es troba, encara, en un estat definit i per tant, no està ni viu ni mort.

Aquesta descripció, com se segueix de l'exemple del gat d'Schrödinger és clarament insatisfactòria. L'objectiu d'Schrödinger no era mostrar que podien existir gats que no estaven ni vius ni morts sinó que aquesta conseqüència no desitjada del postulat de la mesura mostrava la seua incorrecció o, si més no, que calia interpretar-lo d'una manera diferent a la forma en què s'interpretava habitualment.

La història de la filosofia de la física, pel que fa a la interpretació de la teoria quàntica, des de la publicació de l'obra de von Neumann fins a l'actualitat és la història de la recerca d'una interpretació satisfactòria del postulat de la mesura, o, si això no és possible, la proposta de la seua eliminació. El comportament dual que es deriva d'aquest postulat i les seues conseqüències (la dualitat ona-partícula, les relacions d'incertesa o d'indeterminació, etc.) són elements que cal tenir en compte en una proposta d'interpretació del formalisme quàntic, i a això dedicaré la resta de l'article, per tal de revisar quines han sigut les propostes de solució des dels anys 30 fins a arribar a les propostes que tenen major acceptació en l'actualitat. Si bé cal dir que actualment no existeix un consens sobre *quina* és la interpretació correcta de la teoria, sí existeixen punts d'acord sobre quins ingredients hauria de tenir i quins problemes hauria de resoldre.

Per tal de presentar aquestes interpretacions, cal afegir abans un element a la discussió, l'origen del qual es troba en la dècada dels anys 80 del segle passat i és, per tant, relativament recent, com és la teoria de la decoherència. És una teoria, en principi, independent de qualsevol interpretació, i que il·lumina el problema de la mesura des d'una perspectiva que no tenien els pares de la teoria quàntica i que, per tant, serveix per a exposar les actuals interpretacions de la teoria i per a revisar les primeres interpretacions que s'oferiren poc després de la seua formulació.

LA TEORIA DE LA DECOHERÈNCIA

La teoria de la decoherència¹ és una troballa feta per Wojciech Zurek l'any 1981, encara que les seues idees es poden trobar també en alguns escrits de Heinz-Dieter Zeh (1970). La idea fonamental del seu projecte era la següent: el postulat de la mesura és problemàtic perquè no estableix, d'una vegada i per totes, en què consisteix l'acte de mesurar i, per tant, deixa oberta

¹ Pot trobar-se una exposició detallada de la teoria de la decoherència en Schlosshauer (2007).

l'aplicació del postulat a diferents nivells de detall fins al punt de fer-lo, fins i tot, dependent de la decisió arbitrària de l'observador. En altres paraules, un sistema físic evolucionarà d'una forma si ningú l'observa i ho farà d'una altra forma si és observat, independentment de les interaccions d'aquest sistema amb altres sistemes físics del seu entorn. Aquesta descripció poc intuïtiva del que prediï el postulat de la mesura es pot evitar si s'elabora una *teoria de la mesura*, és a dir, si hom troba una caracterització de l'acte de mesurar que determine de manera precisa en què consisteix aquest acte: quan es produeix una mesura, com i per què. L'aplicació del quart postulat dependria, en aquest cas, de les condicions físiques de l'experiment i no de cap acte voluntari i conscient de l'observador.

Zurek proposa una descripció de l'acte de mesurar tot afegint l'entorn del sistema al problema inicial format per sistema quàntic i aparell de mesura (o observador). Si separem en tres parts allò que volem descriure (observador, sistema quàntic i entorn), aleshores és possible caracteritzar l'estat d'un sistema, no només lligat per la interacció amb l'observador, sinó, i de manera més radical, també amb el seu entorn (l'aire, les molècules properes, les parets de l'habitació, altres sistemes físics que hi haja a prop). Zurek va mostrar que, per a sistemes macroscòpics, la interacció del sistema amb el seu entorn és enorme i no pot ser eliminada de la descripció, doncs un sistema macroscòpic es caracteritza habitualment per romandre en equilibri termodinàmic i mecànic amb allò que l'envolta. No és possible, ni tan sols conceptualment, descriure un sistema macroscòpic sense referència a la interacció que té amb el seu entorn. Aquest lligam d'un sistema macroscòpic amb el seu entorn provoca que, de manera efectiva, la mesura d'un sistema quàntic es produïska, en tot cas, abans que el sistema interactue de manera notable amb el seu entorn i, per tant, els sistemes macroscòpics no poden tenir l'estabilitat necessària per a mantenir-se en un estat que pugui ser descrit per un vector d'un espai de Hilbert sense fer referència als graus de llibertat amb què ha interactuat amb el seu entorn.

La mesura, entesa des del punt de vista de la teoria de la decoherència, és un fenomen físic que consisteix en la desaparició, a nivell local, de qualsevol tipus de superposició quàntica que pogués existir entre diferents estats del sistema.² Aquesta desaparició és deguda a la múltiple interacció del sistema amb el seu entorn. La descripció matemàtica de l'estat del sistema evolucionat deixa de ser un vector d'un espai de Hilbert i s'ha de fer servir un altre objecte

² El fenomen de la superposició quàntica d'estats és una conseqüència del primer postulat. Si un sistema quàntic pot trobar-se en dos estats diferents (representats per sengles vectors en l'espai de Hilbert corresponent), també pot trobar-se en un estat descrit per qualsevol combinació lineal (com per exemple, la suma o la resta) d'aquests dos estats. D'això en diem fenomen de superposició quàntica d'estats.

matemàtic, anomenat matriu densitat, que permet descriure estats que són, en la pràctica, indistingibles dels possibles estats clàssics del sistema. Aquests tipus d'estats s'anomenen estats mixts.³ Aquesta interacció incontrolada amb l'entorn explica que no siguem capaços d'observar sistemes macroscòpics en superposició quàntica d'estats. Tanmateix, convé fer veure que, si fem servir el formalisme de la teoria per a predir el comportament de l'evolució del sistema sense fer ús del postulat de la mesura, l'evolució serà unitària i, en conseqüència, no podrà existir cap col·lapse real de la funció d'ona. El que succeeix quan un sistema pateix el fenomen de la decoherència és que aquesta superposició ja no existeix només entre el sistema físic i l'aparell de mesura, sinó que l'entorn també ha de formar part de la descripció, fins al punt que, de manera local (sistema i observador) l'estat del sistema sembla haver patit un col·lapse, i només es detecta una de les opcions de la superposició quàntica, mentre que, de manera global, el conjunt format per sistema, observador i entorn continua existint en un estat superposició.

Aquestes consideracions permeten fer servir la teoria de la decoherència per a resoldre, com a mínim, part del problema de la mesura. Quan es porta a terme una mesura d'una magnitud d'un sistema físic, la superposició preexistent deixa d'existir d'acord a una base descriptiva concreta (que s'anomena base preferida i que pot dependre d'un determinat observable). Aquest fet pot ser explicat en termes de la interacció física del sistema tant amb l'aparell de mesura com amb l'entorn, de manera que la base preferida no és triada de forma arbitrària, sinó d'acord a les interaccions físiques realment existents entre els diferents subsistemes involucrats. No obstant això, hi ha una altra part del problema de la mesura que no pot ser resolta sense afegir una interpretació del formalisme. Encara que l'estat del sistema i l'observador en el seu conjunt siga un estat mixt, resta per explicar per què mai no observem les superposicions quàntiques a nivell global, i aquesta qüestió no es pot respondre únicament des de l'explicació del fenomen concret de la decoherència. Tampoc no és possible resoldre el problema de la indeterminació: si bé es possible explicar per què existeix una base preferida, no és possible explicar per què, donada una determinada base, l'evolució del sistema ocorre, de fet, de la manera com ho fa.

En definitiva, la teoria de la decoherència esdevé un suplement indispensable en les interpretacions possibles de la teoria. Com discutiré en les seccions següents, permet fer una interpretació realista de la teoria quàntica que resol, al menys en part, el problema de la mesura, bé sense modificar l'equació d'evolució dinàmica (com en la teoria dels molts mons), o bé resultant un

³ Un estat *mixt*, representat per una matriu densitat, pot entendre's com una suma probabilística d'estats *purs*, els quals són els únics que poden ser representats per un vector d'un espai de Hilbert.

complement explicatiu d'aquelles interpretacions que modifiquen l'equació d'Schrödinger per a resoldre (o dissoldre) el problema de la mesura. Pel que fa a la interpretació ortodoxa, també suposa un element que cal incloure en la descripció.

INTERPRETACIONS DE LA TEORIA QUÀNTICA

Les diverses interpretacions de la teoria quàntica poden classificar-se atenent a diversos aspectes. Deixant de banda la pretensió de trobar la forma més acurada de classificar-les, en aquest secció les agruparé en quatre grans blocs seguint un criteri que és parcialment històric. En primer lloc, presentaré la interpretació ortodoxa de la teoria, coneguda com a interpretació de Copenhaguen, que és la que van defensar Bohr i Heisenberg entre altres i que és la que està present de manera majoritària en llibres de text,⁴ obres divulgatives i en molts àmbits de la física teòrica i aplicada actual. Faré una revisió del seu contingut i explicaré algunes variants d'aquesta interpretació. En segon lloc, presentaré les idees d'un grup de físics, que podem anomenar els *dissidents* (FREIRE JR. 2015) que, amb Einstein i de Broglie, i sobretot després amb Bohm, van apostar per una interpretació realista i determinista de la teoria. Aquesta interpretació s'encabeix en un conjunt de teories anomenades teories de variables ocultes. Dins d'aquestes ha tingut (i encara manté) predominança la interpretació coneguda com a mecànica bohmiana o interpretació de l'ona-pilot. En tercer lloc, les teories del col·lapse objectiu són un intent d'interpretar de forma realista la teoria tot afegint nous termes a l'equació d'Schrödinger. Finalment, parlaré de la teoria dels molts mons i d'algunes de les seues versions. És una teoria que interpreta el formalisme sense cap addició, fent una lectura de l'acte de mesurar segons la qual no hi ha només un món sinó que els mons es multipliquen en cada mesura.

Aquests conjunts de teories es poden agrupar (veure WALLACE 2008) en teories que modifiquen el formalisme, tot ampliant-lo (variables ocultes) o canviant-lo (teories del col·lapse objectiu) i teories que mantenen el formalisme (ortodoxa i molts mons). També és possible agrupar aquests conjunts en teories deterministes (algunes versions de les teories de variables ocultes, molts mons) i indeterministes (la resta). Finalment, és possible separar aquestes teories segons quina interpretació fan de la funció d'ona, el principal objecte matemàtic present en els postulats de la teoria: pot entendre's com un

⁴ La forma en què la mecànica quàntica és introduïda habitualment als llibres de text està relacionada amb la idea que hi ha dues evolucions diferents i un col·lapse lligat a la mesura. Aquesta idea fou introduïda de forma explícita per autors com Von Neumann i Dirac.

element representatiu (d'alguna entitat del món real) o com una mesura de la probabilitat (objectiva, d'un conjunt; o bé subjectiva). Tornaré sobre aquestes classificacions després de la discussió d'aquestes interpretacions, per tal de comprendre el problema de la indeterminació de la metafísica per la física (diverses interpretacions són compatibles amb un mateix formalisme) i per veure si és possible triar una d'aquestes interpretacions sobre les altres de forma racional i motivada.

La interpretació ortodoxa

A partir de les reflexions sobre el concepte de complementarietat i guiat per les relacions d'incertesa descobertes per Heisenberg, Bohr es compromet amb una interpretació de la teoria quàntica que descansa sobre algunes presuposicions metafísiques. D'una banda, les relacions d'incertesa s'expliquen per una indeterminació dels valors de magnituds conjugades d'un cert sistema (per exemple, la seua posició i el seu moment o velocitat). Aquesta falta de determinació es pot interpretar de forma subjectiva (no podem conèixer el valor d'aquestes magnituds) o de forma objectiva (el sistema físic no té definits aquests valors). Siga como siga, el formalisme s'interpreta sense cap afegit però carregat amb algun tipus de tesi metafísica. Els defensors d'aquesta interpretació, com són Bohr, Heisenberg, Jordan, Pauli, etc., discrepen en alguns matisos però comparteixen aquestes pressuposicions de base. L'observador juga un paper essencial, siga aquest entès com un agent racional dotat de consciència (veure, per exemple, la interpretació de WIGNER) o qualsevol dispositiu físic capaç d'enregistrar el valor d'una magnitud física després d'una mesura. En qualsevol cas, el problema de la mesura és inherent a aquesta interpretació, motiu pel qual la interpretació ortodoxa, en la seua formulació original, no té pràcticament seguidors entre els filòsofs de la física, més enllà del *calcula i calla* que proposen els instrumentalistes més radicals.

No obstant això, la interpretació ortodoxa ha inspirat altres interpretacions que basen la seua proposta en una lectura probabilista de la funció d'ona. Es coneixen com interpretacions operacionalistes, buiden l'ontologia associada a la teoria quàntica i proposen que entenguem el formalisme com una eina per a fer prediccions del comportament d'un sistema quàntic, sense fer cap afirmació sobre la realitat de l'estat del sistema en qüestió. El seu raonament parteix de la idea que, com que les relacions d'incertesa impedeixen una determinació precisa de certes magnituds en un determinat context experimental, no és necessari completar aquesta imatge amb una història que no és possible comprovar. Aquesta línia de pensament té els seus arrels en la visió de Heisenberg (1930/1949), per exemple.

Teories de variables ocultes

Les teories de variables ocultes intenten resoldre el problema de la mesura partint de la consideració que la teoria quàntica és una teoria incompleta. El programa d'aquestes teories consisteix en l'addició de variables que no pertanyen al formalisme original i que, en aquest sentit, són *ocultes*. Aquestes noves variables poden considerar-se com una modificació de la teoria quàntica i, en conseqüència, cal afegir una nova equació d'evolució que determine el comportament d'aquestes variables amb el pas del temps. Una altra opció és considerar aquestes variables com una explicitació de la nostra ignorància sobre algunes magnituds físiques del sistema, de la mateixa manera que ho fa, per exemple, la mecànica estadística.⁵ La forma més habitual de procedir, tot començant amb el formalisme quàntic sense interpretar, és considerar alguns dels observables (que en la interpretació ortodoxa no tenen, en general, un valor definit) com a variables ocultes. Per exemple, hom pot considerar que l'observable posició, que en la interpretació estàndard és representat per un operador lineal i autoadjunt, és en realitat una variable oculta de la teoria. És a dir, una partícula quàntica descrita per l'equació d'ona d'Schrödinger té associada no només una funció d'ona, sinó també una posició definida en cada moment, amb la diferència que l'equació d'Schrödinger descriu en cada moment el valor de la funció d'ona però no l'evolució de la variable posició, que roman oculta.

La primera proposta de teoria de variables ocultes és la interpretació de David Bohm (1952) del formalisme quàntic, que ell anomena interpretació ontològica o causal de la teoria. És possible trobar una proposta semblant en la participació de Louis de Broglie en el cinquè congrés Solvay de l'any 1927,⁶ encara que no la va desenvolupar i que el mateix de Broglie acabaria adoptant una interpretació propera a l'ortodoxa fins la publicació de l'obra de Bohm l'any 1952. Les idees d'Einstein expressades en l'article publicat juntament amb Podolsky i Rosen l'any 1935, conegut com article EPR, tenen una inspiració semblant. Tant de Broglie com Einstein, i Bohm després, tenen una visió realista de les teories científiques. De Broglie proposa una interpretació realista de la funció d'ona que apareix a l'equació d'Schrödinger, fins al punt d'interpretar-la com una ona física tan real com les ones sonores o les electromagnètiques. Aquesta ona (que anomenaria ona pilot) serveix de guia a les trajectòries que segueixen les partícules, en un sentit que no quedava del tot clar, doncs la fun-

⁵ Aquestes dues interpretacions es presenten habitualment com a interpretacions òptica i epistèmica, respectivament. Veure Wallace (2012).

⁶ El congrés Solvay de l'any 1927 va veure les conegudes disputes entre Einstein i Bohr sobre el significat de les relacions d'incertesa i de la pròpia teoria quàntica. No obstant això, són menys conegudes altres participacions en el congrés, com la de de Broglie, però no menys importants. Veure Bacciagulpi i Valentini (2009) per a un nou punt de vista respecte d'aquell congrés.

ció d'ona es definia a partir d'un vector en un espai de Hilbert abstracte, essent la funció d'ona la seua representació en una base determinada,⁷ i no en l'espai físic tridimensional quotidià. Això va provocar una reacció negativa del mateix Schrödinger⁸ envers la posició de de Broglie. La posició d'Einstein és menys propositiva, doncs pensa directament que la teoria quàntica és, en essència, incompleta, i que cal trobar una altra teoria que la supere. En aquest sentit, les teories de variables ocultes proposen l'existència d'algun grau de llibertat, no inclòs en el formalisme de la teoria, capaç d'explicar el comportament dels sistemes quàntics.

En concret, la proposta original de Bohm consistia en escriure la funció d'ona en forma polar (amb una amplitud i una fase) i substituir aquesta expressió en l'equació d'Schrödinger. A partir d'ací, Bohm va obtenir deductivament dues equacions diferencials que permetien determinar l'amplitud i la fase de la funció d'ona. Una d'aquestes equacions és formalment a l'equació de Hamilton-Jacobi de la mecànica clàssica excepte per l'aparició d'un nou terme que Bohm va anomenar potencial quàntic. A banda de reescriure l'equació d'Schrödinger en aquestes termes, Bohm va introduir una segona equació diferencial per a explicar el moviment de les partícules, on l'acceleració cada partícula és proporcional al gradient dels potencials clàssic i quàntic. Per tal de fer compatible aquesta nova equació amb les prediccions de la teoria quàntica, també va haver d'afegir una restricció sobre les velocitats inicials permeses per a les partícules. John S. Bell (1964) va formular una versió diferent d'aquesta mateixa idea, tot canviant la formulació en termes del potencial quàntic per una formulació de primer ordre, en la qual la restricció sobre les velocitats s'interpreta com una llei dinàmica fonamental, anomenada equació guia.

La nova formulació de Bell, inspirada en la proposta de Bohm, es coneix com a mecànica bohmià i és la teoria de variables ocultes que ha tingut un recorregut més llarg des dels anys 60 fins als nostres dies.⁹

La interpretació bohmià proposa prendre com a variables ocultes les posicions de les partícules. Aquestes posicions apareixen com a variables d'una nova equació, l'equació guia, que acompanya a l'equació d'Schrödinger, que roman inalterada. El formalisme no es substitueix per un altre, sinó que s'amplia. En conseqüència, la descripció de l'evolució del sistema és dual. D'una banda, la funció d'ona evoluciona d'acord a l'equació d'Schrödinger, de la

⁷ Per exemple, en la base associada a l'observable posició, la funció d'ona es defineix en l'espai de configuracions.

⁸ Erwin Schrödinger, en les seues publicacions de la dècada dels anys 20, defensava una interpretació realista de la funció d'ona, fins que, la interpretació probabilista del mòdul al quadrat d'aquesta funció per part de Max Born, el va fer canviar de idea

⁹ Veure Dürr *et al.* (1996) per a una exposició de la mecànica bohmià tal i com s'entén en l'actualitat.

mateixa forma que ho faria en la interpretació estàndard de la teoria. D'altra banda, les posicions de les partícules evolucionen d'acord a l'equació guia, que inclou al seu si la funció d'ona del sistema de partícules. Les evolucions de la funció d'ona i de les posicions de les partícules que constitueixen el sistema no són independents; els canvis produïts en la funció d'ona en un determinat instant temporal afecten a les posicions de totes les partícules en aquell mateix instant.

Una de les dificultats a què han de fer front les teories de variables ocultes és la impossibilitat de construir una descripció consistent de l'evolució d'un sistema quàntic que incloga com a variables ocultes magnituds que en la interpretació estàndard són representades per operadors lineals que no commuten. La mecànica bohmiana resol aquest problema prenent com a variables ocultes únicament les posicions de les partícules. La resta de magnituds que apareixen en una descripció típica d'un sistema quàntic (l'espí, l'energia o el moment, entre d'altres) no poden ser representades per variables ocultes, a risc d'inconsistència, i, per tant, no estan definides. Això té com a conseqüència que, quan hom fa una mesura sobre un sistema quàntic, siga quin siga l'observable triat, aquesta mesura s'ha de poder reduir a la detecció de les posicions de les partícules. Malgrat el privilegi (potser injustificat) que se li atorga a l'observable posició en aquesta teoria de variables ocultes, no és menys cert que la possibilitat de reduir qualsevol mesura experimental a una mesura de posicions s'avé sense massa dificultats al sentit comú. D'aquesta forma, l'espí, l'energia o el moment es poden interpretar com a propietats, no de les partícules individuals, sinó de la funció d'ona del sistema, l'estatus ontològic de la qual caldrà discutir. Quan es mesura alguna d'aquestes magnituds, com que el valor obtingut no pot estar definit en tot moment, s'ha de tenir en compte el context experimental per a predir els valors possibles que s'obtidran. Aquest fenomen s'anomena contextualitat i pot suposar un problema si hom és realista respecte d'aquestes magnituds.¹⁰ En qualsevol cas, el tractament de les posicions de les partícules i de la resta de magnituds físiques ha de ser asimètric: mentre que les posicions són propietats categòriques de les partícules, i permeten definir en tot moment la seua trajectòria, la resta de magnituds poden interpretar-se com a propietats disposicionals, que adquireixen valors concrets en cada context determinat.

Ara bé, si la mecànica bohmiana postula l'existència de trajectòries, com s'avé això amb les prediccions probabilístiques del formalisme quàntic interpretat de la manera ortodoxa? Per a la teoria bohmiana, el col·lapse de la fun-

¹⁰ Aquest problema es pot resoldre si hom defensa que el moment, l'espí, etc., són propietats de las partícules del sistema i, al mateix temps, accepta que el valor mesurat d'aquestes propietats depèn del context experimental de mesura. Això és el que pensa, per exemple, Holland (1995). Agraesc a un revisor anònim l'èmfasi en aquesta proposta de solució del problema.

ció d'ona és només efectiu (a diferència d'altres propostes de modificació del formalisme, com les teories del col·lapse objectiu, que s'exposen en la secció següent) i és conseqüència de la forma de descriure l'evolució del sistema (BELL 1982). En aquest sentit, és semblant a allò que succeeix en la mecànica estadística, que és una teoria clàssica. Tant en una teoria com en l'altra, es prescindeix de la informació sobre les condicions inicials de l'evolució d'un determinat sistema, per a predir quin serà el seu comportament futur. Aquesta ignorància parcial sobre l'estat inicial del sistema provoca, tant en la mecànica estadística com en la bohmiana, una pèrdua d'informació en la descripció de l'evolució de l'estat. Això implica la introducció de magnituds efectives, en mecànica estadística, com són les variables termodinàmiques de temperatura, potencial químic, etcètera; en la teoria bohmiana, la conseqüència és que la predicció de les trajectòries de les partícules, malgrat estar definides en tot moment, només pot ser probabilística. Si es realitza una mesura de la posició sobre una determinada partícula, aquesta mesura revela el valor real de la seua posició, però no permet conèixer les posicions de la resta de partícules, doncs es desconeix quina era la configuració inicial en l'espai de posicions de totes elles.

Encara que siga possible justificar la presència de probabilitats en la descripció de l'evolució d'un sistema quàntic de partícules, no és evident que les prediccions d'aquesta interpretació hagen de coincidir amb les prediccions de la interpretació estàndard. Com que la teoria quàntica té un èxit en la seua predicció empírica sense precedents, el repte de la mecànica bohmiana és trobar una distribució inicial de probabilitats que siga capaç de reproduir exactament les mateixes prediccions. Es pot demostrar que això es pot aconseguir si s'assumeix, en un determinat moment, la validesa de la regla de Born per al càlcul de probabilitats a partir del mòdul al quadrat de la funció d'ona. Si aquesta regla és vàlida en un determinat moment, també serà vàlida en qualsevol instant passat i futur (DÜRR *et al.* 1992; NORSEN 2018). L'assumpció de la validesa de la regla de Born es coneix com a hipòtesi de l'equilibri quàntic, i, o bé s'ha de incloure com a postulat de la teoria (BELL 1982) o bé s'ha d'incloure una justificació, possiblement empírica, del motiu pel qual observem que se satisfà, en tot moment i sense excepcions, la regla de Born.¹¹

Entre els avantatges d'aquesta interpretació de la teoria, que es va posar de moda durant les dècades dels anys 80 i 90 del segle passat, s'inclouen la capacitat de reproduir les mateixes prediccions que la interpretació estàndard però havent resolt el problema de la mesura: com que el col·lapse de la funció

¹¹ Existeixen propostes de testar experimentalment aquesta hipòtesi de l'equilibri quàntic. S'han fet simulacions de sistemes fora de l'equilibri (és a dir, que no satisfan la regla de Born) que, deixats evolucionar, tendeixen a l'equilibri, mostrant una possible via de justificació de la hipòtesi.

no és real sinó efectiu, no cal explicar quan o per què es produeix una mesura. L'acte de mesurar és un tipus d'interacció física com qualsevol altre, i l'evolució d'un sistema quàntic es regeix per les mateixes equacions (l'equació d'Schrödinger i l'equació guia) independentment de si es fan mesures o no. Un altre avantatge de la mecànica bohmiana és que, en comparació amb altres teories de variables ocultes, no pateix el problema de la incompatibilitat entre observables,¹² doncs les úniques variables considerades ocultes que tenen realitat física són les posicions de les partícules. També té l'avantatge que, en un sentit, s'avé amb les intuïcions del sentit comú, doncs explica de manera natural la intuïció que els objectes macroscòpics són agregats de partícules (MAUDLIN 2013; ALLORI 2013); la interpretació bohmiana ha de defensar que *tot el que hi ha* són partícules, i *només* partícules.

Pel que fa a les crítiques a la teoria, una de les objeccions més repetides és la falta de parsimònia, sobretot en comparació amb la interpretació ortodoxa. Si les dues teories són empíricament equivalents, com pot això comptar com un avantatge si el formalisme proposat és més extens i augmenta la quantitat d'entitats que han de poblar l'ontologia associada a aquesta interpretació? Els defensors de la mecànica bohmiana poden respondre a aquest argument tipus navalla d'Ockham apel·lant, de nou, a la resolució del problema de la mesura. La interpretació estàndard no resol el problema de la mesura; en tot cas, el deixa sense adreçar. En canvi, la proposta formal de la interpretació bohmiana dóna una resposta consistent al problema de la mesura tot mantenint les mateixes prediccions que la interpretació ortodoxa. Una altra línia crítica amb aquesta teoria de variables ocultes és el privilegi que se li atorga a la variable posició envers altres magnituds, la mesura de les quals només pot ser contextual. Aquesta asimetria és més preocupant quan hom intenta generalitzar la teoria bohmiana i construir una teoria que siga relativista, al mode de l'equació de Dirac o de les equacions de la teoria quàntica de camps utilitzades en el formalisme estàndard. Aquest projecte de generalització encara no s'ha aconseguit, degut a la descripció manifestament no-relativista de l'equació guia. Les dues respostes adduïdes front aquesta crítica són, d'un costat, la proposta d'un canvi en l'ontologia de la teoria (per exemple, deixant de parlar de partícules i adoptant el llenguatge de les teories de camps) o dispensant fins i tot el determinisme en la predicció del comportament dels sistemes quàntics; la resposta més conservadora fa l'observació que el motiu pel qual la mecànica bohmiana és tan difícil de generalitzar és la no-localitat de la funció d'ona, propietat que també està present en altres interpretacions, com l'ortodoxa, de manera que les dificultats per a construir

¹² Els coneguts com a *no-go theorems* descarten la possibilitat de famílies senceres de teories de variables ocultes, però no afecten al tipus particular de teoria en què consisteix la mecànica bohmiana.

una versió relativista de la teoria no és exclusiva de les teories de variables ocultes. Tant una resposta com l'altra deixen oberta la porta a desenvolupaments futurs de la proposta bohmiana d'interpretació del formalisme quàntic.

Una de les consideracions més debatudes al si de la teoria bohmiana és quin és l'estatus ontològic de la funció d'ona (DÜRR *et al.* 1997). Les teories de variables ocultes, en general, enteses com una descripció del que existeix realment, han de comptar amb una ontologia dual, que ha de consistir en la funció d'ona i en allò descrit per les variables ocultes. En el cas de la mecànica bohmiana, l'ontologia està formada, per tant, per les partícules i les seues posicions (que són les seues úniques propietats no contextuais) i per la funció d'ona. Mentre que l'estatus ontològic de les partícules no admet massa possibilitat de discussió, la funció d'ona s'ha considerat, entre els propis bohmians, com una entitat amb existència física real, en un extrem, o com una entitat de tipus nomològic, o, en altres paraules, com una expressió d'una llei de la naturalesa, en l'altre extrem. En el primer cas, cal explicar com pot funcionar una ontologia dual de partícules (que existeixen al món físic tridimensional) i la funció d'ona (que està definida a partir d'un vector en un espai de Hilbert abstracte). En el segon cas, cal entendre com és possible que una llei de la naturalesa tinga propietats com l'espí, l'energia o el moment, que només es poden entendre de forma contextual.

En qualsevol cas, les teories de variables ocultes han estat una de les propostes que s'ha oposat amb afany a la interpretació ortodoxa de la teoria i que, exemplificades en la teoria de la mecànica bohmiana, han tingut èxit predictiu malgrat les complicacions conceptuals i d'estatus ontològic de la funció d'ona. Es dona el cas que, mentre la mecànica bohmiana era defensada en l'àmbit de la filosofia de la física, com una posició raonable que resol el problema de la mesura i pot substituir a la interpretació ortodoxa, aquesta actitud no ha tingut massa ressò entre els físics, el motiu principal del qual pot ser la nul·la diferència predictiva entre la teoria quàntica en la seua interpretació estàndard i la interpretació bohmiana de la teoria.

Teories del col·lapse objectiu

Les teories del col·lapse objectiu (GHIRARDI 2002) defensen una interpretació objectiva del col·lapse de la funció d'ona. Aquesta interpretació exigeix la modificació de l'equació dinàmica d'evolució (l'equació d'ona d'Schrödinger) i això se sol fer tot afegint algun terme que provoque, almenys de manera aproximada, allò que en la interpretació ortodoxa és un afegit extern al propi formalisme de l'equació d'evolució, és a dir, el col·lapse mateix de la funció d'ona.

El primer exemple de teoria del col·lapse objectiu va ser proposat per Ghirardi, Rimini i Weber (GRW 1986) i totes les versions posteriors de la teoria prenen aquest model com a punt de partida. La teoria GRW reemplaça l'equació d'Schrödinger per una altra equació modificada, amb nous termes, que són, en general, estocàstics i no-lineals. Aquests termes tenen la funció de donar compte del col·lapse real i objectiu de la funció d'ona per tal d'explicar el postulat de la mesura. Com que l'equació d'Schrödinger modificada compta amb diversos paràmetres lliures, és possible construir models diferents a partir d'un únic formalisme. El model original de 1986 aconsegueix provocar el col·lapse de la funció d'ona mitjançant l'acció de dos paràmetres i s'aplica a sistemes formats per una quantitat finita de partícules no-relativistes i distingibles. La descripció del col·lapse es fa en la representació de posicions, de manera que cada partícula del sistema té una certa probabilitat de patir un col·lapse espontani en la seua variable posició en un determinat interval temporal. La taxa de col·lapses per unitat de temps constitueix el primer paràmetre de la teoria. Mentre que el col·lapse és instantani i es produeix de forma ocasional i sense raó aparent, l'evolució de la funció d'ona entre dos col·lapses consecutius segueix l'equació d'Schrödinger no modificada i és, per tant, una evolució unitària i determinista. Per tal de fer coincidir les prediccions d'aquest model amb les observacions empíriques, la probabilitat que el col·lapse de la funció d'ona determine el valor de la posició de la partícula en una regió concreta de l'espai té relació amb la regla de Born del càlcul de probabilitats.¹³ La grandària de la regió en la qual és probable trobar la partícula després del col·lapse és el segon paràmetre del model.

Fixats els valors dels dos paràmetres, el temporal i l'espacial, és possible descriure l'evolució d'un sistema de partícules d'acord als successius col·lapses que són susceptibles de patir cadascuna d'elles. Si la quantitat de partícules és suficientment gran, és molt probable que es produïska un col·lapse d'alguna d'elles en un interval de temps molt reduït, de manera que, si el sistema de partícules es troba inicialment en un estat superposició de dos (o més) estats macroscòpics ben definits, és igualment probable que el sistema evolucione molt ràpidament cap a un d'aquests estats macroscòpics.¹⁴ En el cas de sistemes microscòpics, formats per poques partícules, la probabilitat que alguna d'elles patisca un col·lapse és pràcticament zero, de manera que la seua evolució pot ser descrita per l'equació d'Schrödinger sense modificacions i, per tant, la pre-

¹³ Segons la interpretació de Born de la funció d'ona com una ona de probabilitat, és possible calcular la densitat de probabilitat de trobar una partícula en una certa posició de l'espai com el quadrat del mòdul del valor de la funció d'ona en aquesta posició.

¹⁴ El càlcul explícit d'aquesta evolució deguda a successions de col·lapses espontanis proporciona un estat final que només és un estat macroscòpic aproximadament ben definit. Aquesta aproximació és, en la pràctica, per a sistemes de moltes partícules (de l'ordre del número d'Avogadro), indistingible d'un estat macroscòpic definit de forma exacta.

dicció de l'estat en què es trobarà el sistema passat un cert temps coincideix amb la predicció del formalisme estàndard. La determinació del valor dels dos paràmetres d'aquest model depèn de la satisfacció d'aquests dos requisits, que són centrals en la teoria: un, que l'evolució d'un sistema macroscòpic siga descrita essencialment per una ràpida successió de col·lapses de la funció d'ona del sistema sencer i, dos, que l'evolució d'un sistema microscòpic siga descrita essencialment per la part unitària i determinista de l'equació d'evolució temporal, és a dir, sense la participació de cap tipus de col·lapse, fins que el sistema interactue amb algun objecte macroscòpic.

Arran de la proposta de la teoria GRW, es van construir models alternatius de teories del col·lapse objectiu tot seguint els mateixos requisits. Per exemple, Philip Pearle (1989) va proposar la modificació de l'equació d'Schrödinger mitjançant l'addició d'un terme d'interacció estocàstica amb un camp extern, el valor del qual roman indeterminat fins que es produeix el col·lapse. Models com el de Pearle formen part d'una família de models continus de localització espontània (models CLS, per les seues sigles en anglès), el formalisme dels quals permet la descripció de sistemes de partícules idèntiques de forma més natural que els models de tipus GRW, així com la preservació de la simetria de la funció d'ona després del col·lapse. L'any 1995, Ghirardi, Grassi i Benatti van proposar un altre model específic de la teoria GRW consistent en l'adopció d'un camp de matèria, caracteritzat per la seua densitat, com a objecte de la descripció mecano-quàntica de l'evolució temporal. En aquest model, el camp (o la densitat) de matèria ompli l'espai i evoluciona en el temps segons l'equació d'Schrödinger no modificada fins que pateix un col·lapse que la localitza parcialment en una determinada regió de l'espai. Aquest col·lapse, si es produeix en un interval de temps molt curt, provoca la inestabilitat dels possibles estats macroscòpics en superposició, de la mateixa manera que ho fa el model original.

Com que els diferents models proposats en el si de les teories del col·lapse objectiu es plantegen com a solucions del problema de la mesura, és legítim plantejar quin tipus d'ontologia és compatible amb aquestes teories. La primera qüestió que cal respondre és si aquests tipus de teories són fonamentals o si, en canvi, són només una parametrització fenomenològica d'una modificació de la teoria encara per descobrir. Si la futura teoria ha de ser invariant Lorentz per tal de ser compatible amb la teoria quàntica de camps, que és relativista, aleshores els models proposats, si són només una parametrització fenomenològica, haurien de ser-ho en el règim no-relativista, i, en aquest cas, caldria fer front a un problema encara sense resoldre, conegut com el problema de les cues.¹⁵

¹⁵ El problema de les cues fa referència a l'existència de funcions d'ona en la representació de posicions que s'estenen fins a infinit, fent difícil reconciliar aquestes funcions d'ona amb la imatge d'un objecte (macroscòpic) amb una posició perfectament definida a l'espai.

Independentment de si la teoria és una parametrització fenomenològica o una teoria fonamental, la pregunta per l'ontologia es pot respondre, com a mínim, de quatre formes diferents. En primer lloc, és possible defensar una ontologia on l'entitat central siga la funció d'ona: com que el col·lapse d'aquest objecte és allò que determina l'evolució del sistema de partícules (o del continu format per un camp de matèria), cal que la funció d'ona existisca realment. Segons aquesta actitud realista envers la funció d'ona, l'espai en què té lloc l'evolució del sistema no és l'espai físic tridimensional del qual tenim una intuïció directa, sinó l'espai de configuracions, que té $3N$ dimensions, essent N la quantitat de partícules del sistema. Si el sistema està format per una partícula, les dimensions de l'espai físic i de l'espai de configuracions coincideixen, però això no és així si la quantitat de partícules és major que u, més encara si el sistema està format per una quantitat macroscòpica de partícules, que és una de les situacions que es vol descriure. En aquestes condicions, la realitat de la funció d'ona i de l'espai de configuracions en què és definida es pot interpretar com un avantatge d'aquesta posició teòrica (aquesta és la línia argumental, per exemple, de David Albert (1992) o com un inconvenient pel que fa a la seua plausibilitat (MAUDLIN 2010). És possible plantejar la qüestió de si la funció d'ona s'ha d'interpretar com un element indispensable de l'ontologia de la teoria o si es pot interpretar també com una eina representativa d'una realitat física subjacent. Si el col·lapse de la funció d'ona és un fenomen físic real, és difícil escapar de la conclusió que la funció d'ona mateixa i l'espai en què es defineix (l'espai de configuracions) són també reals en el mateix sentit físic.

Una segona resposta pel que fa a la qüestió de l'ontologia és la reacció de John Bell (1987) a la proposta de la teoria GRW. Bell va proposar un model consistent en interpretar els col·lapses successius de la funció d'ona com flaixos en l'espai físic tridimensional. Aquests flaixos s'interpreten com aparicions i desaparicions de pedaços de matèria, que existeixen i deixen d'existir guiats pel col·lapse de la funció d'ona en l'espai de configuracions.¹⁶ La diferència principal entre aquesta interpretació i la del model original rau en què Bell entén l'espai de configuracions com una entitat abstracta, sense realitat física material. Quan la funció d'ona col·lapsa, atenent als termes afegits a l'equació d'Schrödinger original, no succeeix res en l'espai de configuracions que tinga realitat física, sinó que cal entendre el fenomen del col·lapse com una magnífica eina matemàtica per a predir l'aparició i desaparició dels trossos de matèria en determinades regions de l'espai físic tridimensional, que sí són reals. L'espai de configuracions és un espai matemàtic abstracte, com també ho és la mateixa funció d'ona, l'evolució temporal de la qual permet entendre i justificar

¹⁶ Aquesta interpretació de Bell se sol conèixer com a interpretació dels *beables*.

la generació dels flaixos en l'espai físic tridimensional. Aquesta interpretació, i la seua ontologia, malgrat certa fricció amb una visió del sentit comú, amb l'aparició i desaparició successiva de pedaços de matèria, semblen compatibles amb una versió relativista de la teoria quàntica, cosa que no sembla ser així amb alguns altres dels models proposats.

El principal problema de la interpretació de Bell és que els flaixos són fenòmens físics no fonamentals, doncs depenen del comportament de la funció d'ona en l'espai de configuracions. Si aquesta funció d'ona no és real, i els flaixos sí ho són, és difícil explicar aquesta dependència en el sentit adduït. Com es pot explicar l'existència d'aquests flaixos, ara i adés, en termes de l'evolució temporal de la funció d'ona, si aquesta no representa res real, si som anti-realistes envers la funció d'ona? Quin és el fonament ontològic dels flaixos, si no podem apel·lar a la funció d'ona? Una manera possible de respondre a aquesta pregunta és la tercera resposta a la qüestió de l'ontologia que se sol considerar en el context de les teories del col·lapse objectiu. Dorato i Esfeld (2010) proposen una ontologia en termes de propietats disposicionals que servisca de fonament a l'ontologia fenomenològica proposada per Bell. La quarta i última resposta a la qüestió de la realitat de la funció d'ona consisteix en interpretar-la directament com una densitat de matèria en l'espai físic tridimensional, proposta que sembla més propera a la primera versió de la teoria GRW.

En general, les teories del col·lapse objectiu tenen alguns avantatges i inconvenients si les comparem amb els altres blocs de teories que també intenten donar una resposta al problema de la interpretació de la teoria quàntica. Un dels avantatges és la prioritat que concedeixen a l'espai i el temps en el seu formalisme, a diferència de la proposta d'interpretació estàndard, segons la qual la posició no és cap observable privilegiat que devem fer servir en la nostra descripció de l'evolució d'un sistema físic, sinó que és representat per un operador lineal i autoadjunt més, com la resta d'observables possibles. En la descripció ortodoxa, a més, el temps és únicament un paràmetre i no té comportament dinàmic (no té associat un operador lineal ni és possible considerar-lo com un observable de ple dret).

Un altre dels avantatges de les teories del col·lapse objectiu és que constitueixen una alternativa que es pot posar a prova en un laboratori, tot fent una comparació amb les prediccions específiques de la teoria quàntica en la interpretació ortodoxa (WALLACE 2012). Les prediccions de les teories del col·lapse objectiu són, en determinades condicions experimentals, diferents a les prediccions específiques de la teoria quàntica en la seua versió estàndard. L'experiment que s'hauria de portar a terme per a l'observació directa d'aquesta discrepància és la construcció d'una superposició d'un sistema de moltes partícules i mesurar els paràmetres de la teoria quan es produisca el col·lapse (o

acotar els seus valors, si no es produeix). Cap experiment pot descartar tots els valors possibles, però si no es troba un valor suficientment petit dels paràmetres, això voldria dir que romandria inexplicat el col·lapse de les superposicions quàntiques en sistemes suficientment grans, que era el principal objectiu d'aquesta teoria.

La principal crítica i, al mateix temps, una de les virtuts de la teoria, és que fa prediccions sensiblement diferents a les prediccions del formalisme original. Això implica que, en principi, és possible dissenyar un experiment que pugui posar a prova aquesta interpretació que, degut a aquestes diferències pel que fa al seu contingut empíric, té més sentit anomenar *teoria* GRW (ja que no és únicament una *interpretació* del formalisme). No obstant això, els sistemes mesoscòpics¹⁷ que són capaços d'exhibir aquesta discrepància respecte de la interpretació ortodoxa són difícils de trobar o de construir *ex profeso* en un context experimental, encara que la porta roman oberta a noves troballes en el futur. En concret, el problema experimental amb aquests sistemes és que les superposicions d'estats que s'haurien d'aconseguir són afectades ràpidament pel problema de la decoherència (s'entrellacen tant els seus graus de llibertat interns, com els seus graus de llibertat amb els de l'entorn), de manera que no és fàcil distingir un col·lapse real del fenomen de la decoherència (que és un col·lapse efectiu, però no real). Caldria fer mesures sobre l'entorn que no estan al nostre abast tecnològic en l'actualitat per a distingir tots dos fenòmens, és a dir, l'evolució no-unitària d'un col·lapse real de l'evolució unitària del fenomen de la decoherència. L'objectiu seria construir un sistema macroscòpic (procliu al col·lapse efectiu) però amb pocs graus de llibertat efectius interns (poc procliu a la decoherència interna) i poc lligats amb l'entorn, és a dir, molt aïllat (poc procliu a la decoherència per l'entorn), i això constitueix en l'actualitat un autèntic repte experimental.¹⁸

Teoria dels molts mons

La teoria dels molts mons té el seu origen en la proposta de Hugh Everett (1957) d'interpretar de manera literal el formalisme de la teoria quàntica. Si l'evolució de la funció d'ona descrita per l'equació d'Schrödinger d'un sistema

¹⁷ Els sistemes mesoscòpics són aquells que es troben en un domini intermedi entre els sistemes microscòpics d'unes poques partícules i els sistemes macroscòpics formats per una quantitat de partícules de l'ordre del número d'Avogadro.

¹⁸ Veure Carlesso i Donadi (2019) per a un recull de les propostes experimentals realitzades fins al dia d'avui, que no han trobat evidència favorable a la teoria GRW ni a cap altre model conegut. Els resultats experimentals són, però, compatibles amb un ampli rang de valors dels paràmetres d'aquets models, motiu pel qual els resultats experimental no compten com a evidència contrària als models. Veure també Carlesso *et al.* (2022) per a futures propostes d'experiments i noves perspectives de les teories del col·lapse objectiu.

que es troba en superposició quàntica porta a la superposició d'estats de sistemes macroscòpics (com el gat d'Schrödinger, o qualsevol observador i el seu objecte d'observació), cal admetre aquesta superposició com una descripció adient i exacta del que realment succeeix al món, encara que això implique acceptar una ontologia allunyada del que el sentit comú ens fa creure.

La teoria d'Everett és una temptativa de solució del problema de la mesura. Segons la interpretació literal del formalisme de la teoria quàntica, l'evolució unitària i determinista de l'estat d'un sistema quàntic que es troba en superposició d'estats diferents implica l'existència, després d'una mesura, de sistemes formats per l'agent que mesura i l'objecte que és mesurat en una superposició macroscòpica d'estats. El formalisme, interpretat d'aquesta manera, descarta la possibilitat del col·lapse de la funció d'ona en realitzar una mesura, ja que l'acció de mesurar és una interacció física entre sistemes com qualsevol altra. Aquest plantejament considera que l'estat quàntic (i també la funció d'ona corresponent) és representacional i que la teoria quàntica és una teoria unitària i completa. D'això se segueix que no cal afegir cap postulat extra per a explicar l'acte de mesurar: tot el que cal saber sobre la relació entre objecte i aparell de mesura està contingut en l'equació d'Schrödinger i en la descripció de l'estat d'un sistema quàntic en un determinat instant.

Aquesta posició, que interpreta de forma realista el formalisme, ha d'admetre el fet que, malgrat tot, les superposicions quàntiques d'estats de sistemes macroscòpics mai no són observades. Com que l'evolució donada per l'equació dinàmica prediu la seua existència, però, en canvi, aquestes superposicions mai no són observades, els partidaris d'una interpretació *à la* Everett justifiquen aquesta aparent contradicció tot adduint que, en aquelles situacions en què hom considera que s'ha realitzat una mesura d'un sistema quàntic, allò que realment succeeix és que el món se separa en diferents branques, cadascuna de les quals es correspon tot seguit amb un nou món que s'escindeix de l'anterior i que és independent de cadascun dels nous mons amb què es corresponen cadascuna d'aquestes branques. Aquesta escissió genera una multiplicitat de mons el comportament dels quals és aproximadament clàssic. Per exemple, si una partícula quàntica es troba en un estat superposició de dues posicions definides diferents, x_1 i x_2 i un observador extern al sistema en fa una observació, l'evolució unitària que resulta de l'aplicació de l'equació d'Schrödinger portarà al conjunt format per sistema i observador a un estat que serà superposició de l'estat en què la partícula es troba en la posició x_1 i l'observador ha enregistrat aquesta posició (per exemple, a través d'una impressió en la seua retina) i un altre estat en què la partícula es troba en la posició x_2 i l'enregistrament per part de l'observador també és un altre. Tanmateix, segons la teoria d'Everett, en aquestes circumstàncies no es produeix cap col·lapse, sinó que la superposició

macroscòpica sobreviu encara que l'observador de l'exemple no puga observar-la. Un dels estats de la superposició descriu ara un món M_1 , en el qual, la partícula i l'observador es troben en un estat definit, mentre que l'altre estat de la superposició es correspon amb un altre món, M_2 , en el qual, la partícula i l'observador es troben en un estat definit diferent. Aquests dos mons es corresponen amb les dues branques que s'han generat amb l'evolució unitària i determinista del sistema quàntic com un tot. D'aquesta manera, les superposicions macroscòpiques no tenen a veure amb un fenomen d'indefinió sinó amb un de multiplicitat (WALLACE 2012). La partícula i l'observador no tenen un estat *indefinit*, sinó que tenen un estat definit i *múltiple*, ço és, en cada branca generada després de la mesura, l'estat del sistema està completament definit i segueix l'evolució dictada per l'equació dinàmica.

Val a dir que aquesta descripció general de la teoria dels molts mons no es correspon exactament amb la proposta que apareix detallada en l'article original d'Everett¹⁹ (BARRETT 2011). De fet, la proposta original, coneguda com a interpretació de l'estat relatiu, va ser reinterpretada i articulada en l'exposició que fan De Witt i Graham (1973) de la teoria.²⁰ Aquesta reinterpretació va provocar l'aparició de variants de la teoria que, coincidint en la interpretació literal del formalisme per tal de recuperar una única evolució temporal dels sistemes quàntics, discrepen en la forma d'interpretar l'escissió d'un únic mon en molts mons. Una proposta interpretativa que va resultar rellevant en la discussió va ser la interpretació de les moltes ments de Albert i Loewer (1988). Segons la seua forma d'interpretar la multiplicitat derivada de l'acte de mesurar, allò que es multiplica després d'una mesura no són els *mons* sinó les *ments* de l'observador que realitza la mesura. Les superposicions d'estats macroscòpics són reals i existeixen en un únic mon, però no les observem perquè en l'acte de mesurar, l'observador escindeix la seua única ment en múltiples ments, de manera que cadascuna d'aquestes ments pot enregistrar un valor diferent de l'observable mesurat, essent compatible aquesta interpretació amb el fet empíric que un mateix observador mai no experimenta aquestes superposicions macroscòpiques com a tals.

Tant la teoria dels molts mons original com les variants proposades durant les dècades següents han de fer front, fonamentalment, a dos problemes. El primer d'ells es coneix com el problema de la base preferida, mentre que el segon problema té relació amb la interpretació del concepte de probabilitat. A

¹⁹ Agraesc a un revisor anònim aquesta important matisació. La proposta original d'Everett no fa servir el concepte de món sinó el d'estat relatiu, de manera que les conseqüències que se segueixen de la interpretació dels molts mons tenen el seu fonament en l'article original d'Everett però no se segueixen necessàriament de la seua proposta.

²⁰ De fet, el nom de teoria dels molts mons apareix per primera vegada al títol l'article de De Witt i Graham de l'any 1973.

més d'aquests dos problemes, la extravagància de l'ontologia postulada per a explicar el fenomen d'escissió dels mons (o les ments) també sol comptar com a punt en contra d'aquesta família d'interpretacions de la teoria quàntica.

Pel que fa al problema de la base preferida, la dificultat amb què es troba la teoria rau en el fet que la descripció d'una superposició quàntica d'estats depèn de la base d'estats triada per a aquesta descripció, de manera que un sistema quàntic que es trobe en un estat superposició de dos estats amb posicions i definides també pot ser descrit com un estat superposició d'altres dos estats que consisteixen al seu torn en les superposicions positiva i negativa dels estats amb i definides. Aleshores, la pregunta que es planteja és: quina base triar per a fer la descripció que determinarà com és l'escissió d'un mon en mons diferents? Una resposta satisfactòria a aquesta pregunta ha d'evitar la petició de principi: no podem assumir que, de fet, l'escissió té lloc, i que l'escissió del mon en molts mons ocorre precisament determinada per la base d'estats associada a la mesura realitzada. Cal afegir un procediment físic que justifiqui la preferència d'una base determinada en cada situació experimental en què es porta a terme una mesura física.

Durant un temps, el problema de la base preferida va constituir un greuge difícil de superar per part de les teories dels molts mons, en comparació amb l'èxit que començaven a guanyar les teories del col·lapse objectiu i les de variables ocultes. Aquest problema, en aparença insalvable, va patir una reformulació arran dels treballs de Zeh (1970) i, sobretot, de Zurek (1981), qui va rescatar les idees de Zeh i les va desenvolupar fins a donar forma a la teoria de la decoherència, de la qual he parlat en una altra secció d'aquest article. El fenomen de la decoherència (tant interna com externa) permet explicar el mecanisme físic mitjançant el qual una mesura té lloc. Si hom vol fer una descripció del col·lapse efectiu d'un estat quàntic quan el sistema esdevé macroscòpic, cal triar una base determinada per a la descripció del sistema. Aquesta base permet escriure l'estat superposició de manera que el lligam amb els graus de llibertat de l'entorn explique l'evolució. La base preferida té, per tant, una existència física real i aquesta *preferència* pot ser explicada completament en termes físics, sempre i quan tinguem un model concret de decoherència per a una situació experimental determinada. Així doncs, el principal problema al qual havia de donar resposta la teoria dels molts mons es dissol amb l'aparició i desenvolupament de la teoria de la decoherència, la qual cosa va fer reviscolar l'interès per aquesta interpretació del formalisme de la teoria quàntica, d'ençà de la dècada dels anys 90 fins als nostres dies.

El segon problema al qual ha de fer front aquesta interpretació no ha gaudit, fins ara, del mateix destí que el problema de la base preferida. Des del plantejament d'Everett en l'article original, el concepte de probabilitat que

es fa servir en el context de les teories dels molts mons no té un significat clar (BALLENTINE 1973). Com que tots els possibles resultats d'un experiment aleatori quàntic tenen lloc realment, és difícil adscriure una probabilitat a cadascun dels resultats possibles, siga que interpretem la probabilitat com una característica del nostre coneixement sobre els esdeveniments esperables en una determinada situació, siga que interpretem la probabilitat en un sentit objectiu (com a freqüències o propensions físiques, per exemple). Si sabem que en una mesura d'un estat superposició d'un sistema macroscòpic, els diferents valors possibles descrits per la base preferida són tots ells mesurats realment (encara que cadascun en un mon diferent), la probabilitat d'ocurrència de cada resultat hauria de ser igual a 1. A més d'aquestes consideracions inicials sobre la pròpia possibilitat de parlar de probabilitats en un context d'escissió de mons, existeix també un problema quantitatiu sobre l'assignació de valors numèrics a aquestes probabilitats. Suposant que som capaços de resoldre la primera part del problema i concloem que és possible parlar de probabilitats, una assignació de valors numèrics que no consistisca en l'equiprobabilitat d'ocurrència de cada mon, no sembla tenir justificació directa. És raonable pensar que, en una escissió, hi ha mons que es creen amb major probabilitat que altres? Sembla que la creació d'un món en una escissió és una qüestió de tot o res i que, per tant, no admet graus, de manera que el concepte de probabilitat i la seua avaluació numèrica tenen difícil aplicació en una teoria dels molts mons que vulga reproduir els resultats experimentals de la teoria quàntica. Wallace (2010) aborda aquest problema tot reinterpretant el problema de la probabilitat en termes de la teoria de la decisió d'agents racionals, per tal de justificar l'ús de conceptes probabilístics en l'explicació dels fenòmens quàntics observats, essent la seua proposta una de les més discutides en les discussions actuals sobre la validesa de la interpretació dels molts mons.

Pel que fa a l'ontologia que subjau a la teoria dels molts mons, Maudlin (2010) considera que qualsevol partidari d'aquesta interpretació de la teoria ha de defensar un monisme de la funció d'ona, és a dir, ha de creure en la realitat de la funció d'ona i només d'ella, de manera que l'existència de partícules en l'espai físic no és sinó una manifestació epifenomènica d'una realitat més profunda, com és la pròpia funció d'ona i la seua evolució temporal.

En l'actualitat, la teoria dels molts mons troba una defensa ferma en la posició filosòfica de figures com David Wallace (2012) i comença a tenir ressò entre els filòsofs de la física i els físics que treballen en àmbits com la cosmologia o la teoria quàntica de la gravitació. Això és degut a la relació que existeix entre el postulat de l'existència de molts mons i l'explicació de fenòmens cosmològics com la inflació còsmica i la seua relació amb el principi antròpic. De fet, una de les crítiques més repetides contra aquest conjunt de teories té relació

amb el que es coneix com l'ajustament fi. Segons la teoria dels molts mons, existeix una multiplicitat d'universos en els quals les coses són diferents a com han succeït en el nostre univers: entre ells, hi haurà mons que s'han escindit fa poc que seran pràcticament idèntics al nostre, però n'hi haurà d'altres que es van escindir gairebé en els primers instants del nostre univers, la qual cosa provocaria amb una alta probabilitat una evolució radicalment diferent a la que nosaltres observem.

Altres interpretacions

Encara que els quatre blocs d'interpretacions presentats constitueixen la pràctica totalitat d'interpretacions que es defensen en l'actualitat des de la filosofia de la física, hi ha hagut al llarg de la història i continuen havent-hi en l'actualitat propostes alternatives que van més enllà de les interpretacions que he exposat. Un cas paradigmàtic és el bayesianisme quàntic.

Segons el bayesianisme quàntic, cal interpretar les probabilitats que apareixen al formalisme de manera subjectiva i aplicar el teorema de Bayes i el càlcul de probabilitats corresponent tot pensant en els enunciats que es deriven de la teoria quàntica com a proposicions sobre el nostre *coneixement* d'un determinat sistema. Aquesta idea està inspirada en alguns passatges de Heisenberg (1930/1949) així com en algunes posicions idealistes i subjectivistes que es trobaven entre els defensors de la interpretació ortodoxa.

Una altra via explorada és la modificació de les lleis de la lògica emprades per a la comprensió de les prediccions i explicacions de la teoria quàntica. L'existència d'estats entrelaçats (en els quals un gat no està ni viu ni mort) permet definir una lògica no-bivalent que expliqui les aparents contradiccions de la teoria. No obstant la bona voluntat de la proposta, el problema de la mesura no queda resolt d'aquesta manera sinó, en tot cas, dissolt, i caldria enraonar per què cal aplicar unes regles lògiques en certs sistemes físics i quan cal aplicar les regles de la lògica clàssica. Aquesta decisió, aparentment arbitrària, roman sense explicació en el context de les teories de la lògica quàntica.

PROBLEMES CONCEPTUALS

Després d'haver descrit amb cert detall algunes de les interpretacions de la teoria quàntica, és moment de derivar-ne algunes conseqüències. En particular, és freqüent, en els darrers anys, plantejar els problemes interpretatius de la teoria quàntica en un marc general, de vegades plantejat com un problema entre les teories locals i no-locales de la física, al qual dedicaré la subsecció següent.

També és habitual definir el problema en termes de l'oposició entre el determinisme i l'indeterminisme, al qual també dedicaré una subsecció. Abordaré a continuació quines implicacions té la tria d'una determinada interpretació en qüestions relatives a la noció de probabilitat. Com que la teoria quàntica és (o sembla ser) una teoria estadística, és preceptiu definir un concepte de probabilitat que s'avinga a la teoria i que permeta una interpretació raonable de les conseqüències de la mateixa. Finalment, dedicaré també unes línies al debat dins del realisme científic, ja no tant com una posició contra l'anti-realisme, sinó també com una disputa entre els diferents defensors del realisme científic per a trobar una versió de realisme que siga compatible amb la teoria quàntica.

La no-localitat

Una teoria física es considera local si el comportament d'un sistema físic depèn només de les seues interaccions amb allò que es troba en una regió de l'espai propera al sistema.²¹ Des del punt de vista tècnic, aquesta proximitat en l'espai pot entendre's a partir de la limitació imposada per la velocitat finita de la llum, de manera que una teoria és local si totes les interaccions entre els sistemes que la teoria descriu viatgen a una velocitat que no supere la velocitat de la llum. Aquest *realisme local* va ser defensat per Einstein i els seus col·laboradors en l'article EPR de 1935 i s'entén com una conseqüència natural de la teoria de la relativitat especial. El límit imposat per aquesta teoria a la interacció entre sistemes físics (que es poden entendre com intercanvis de senyals) depèn de la velocitat finita de la llum, de manera que la interacció entre un sistema i un altre depèn del temps que tarde la llum en arribar d'un punt de l'espai on es trobe el primer sistema al punt de l'espai on es trobe el segon sistema. Això no passaria, per exemple, amb una teoria on la velocitat de la llum fos infinita.

John Bell (1964) va estudiar amb detall l'experiment EPR i el va reformular per tal d'extraure conclusions de l'assumpció d'Einstein del realisme local. Va concloure que si una teoria física és una teoria local en el sentit einsteinià, aleshores aquesta teoria no pot reproduir totes les observacions predites per la teoria quàntica. Aquest resultat es pot expressar mitjançant el que es coneix com les desigualtats de Bell (1964). No obstant això, la voluntat de Bell no era descartar totes les interpretacions realistes de la teoria quàntica, ans al contrari, volia determinar fins a quin punt una teoria de variables ocultes podia reproduir els resultats de la teoria quàntica mitjançant l'addició de variables no observables directament. Les seues famoses desigualtats contraposaven la teoria

²¹ La teoria newtoniana de la gravitació se sol considerar com un exemple de teoria no-local, ja que la interacció entre subsistemes és instantània i a distància.

quàntica interpretada al mode ortodox amb qualsevol intent de construir una teoria de variables ocultes *locals*.²² Els resultats experimentals obtinguts per Aspect (1976) van decidir en favor de la teoria quàntica i en contra de les teories de variables ocultes locals, però deixava espai i, de fet, definia de forma més acurada quines eren les interpretacions de la teoria que feien servir variables ocultes que podien ser compatibles amb les observacions.

Aquestes consideracions a partir de les desigualtats de Bell demostren l'exigència de no-localitat de qualsevol teoria de variables ocultes que siga compatible amb les prediccions de la teoria quàntica. Per aquest motiu, la mecànica bohmiàna, com a exemple paradigmàtic de teoria de variables ocultes, es considera una teoria altament no-local, tant en la formulació original de Bohm (que incloïa un potencial quàntic que actuava a distància) com en la formulació de l'equació guia posterior. Els defensors d'aquesta posició admeten la no-localitat de la seua interpretació, però neguen la possibilitat de trobar una interpretació local de la teoria que resolga al seu torn el problema de la mesura. Per a ells, és la teoria quàntica la que és no-local i, per tant, una interpretació adient del formalisme ha de tenir en compte aquesta característica de la mateixa teoria.

El que no queda tan clar és si la no-localitat és també una característica de la resta d'interpretacions. Segons la interpretació ortodoxa, és possible prescindir de la no-localitat si defensem una posició propera a la de Bohr: la vaga definició del principi de complementarietat i la no definició de les magnituds que no estan essent mesurades pot justificar la inexistència d'accions a distància de tipus no-local. Tanmateix, la no resolució del problema de la mesura la converteixen en una posició poc atractiva per al filòsof de la física, en el seu afany de lliurar d'inconsistències a qualsevol teoria física. Pel que fa a les interpretacions de la teoria que defensen un col·lapse objectiu, la no-localitat és una característica que és vehiculada pels termes afegits a l'equació d'ona. Aquests termes extra que descriuen l'evolució del sistema i que han d'explicar el col·lapse, han de correlacionar partícules que es troben tan separades com es vulga i, en conseqüència, han de violar la tesi del realisme local.

La teoria dels molts mons, pel seu compte, permet entendre l'evolució d'un sistema quàntic no a partir d'interaccions no-locales amb altres sistemes físics allunyats, sinó com una escissió d'universos: si haguérem d'explicar l'evolució d'un d'aquest universos, l'explicació hauria d'incloure elements no-local (com, de fet, és habitual fer). En canvi, si fem l'explicació global del procés d'evolució del conjunt dels molts mons, aquesta no pateix del problema de la no-localitat. També pot evitar aquest compromís la teoria del bayesianisme quàntic, ja que en aquesta interpretació el formalisme quàntic expressa única-

²² Veure Mermin (1990) per a una explicació detallada de les desigualtats de Bell.

ment el nostre judici com a subjectes de coneixement i no cap propietat real entre sistemes de partícules que estiguen allunyades les unes de les altres.

En definitiva, la qüestió de la no-localitat és una característica rellevant del formalisme quàntic, que pot interpretar-se com una propietat del món (mecànica bohmiàna, GRW) o com una aparença explicada per altres mecanismes (molts mons, bayesianisme quàntic, interpretació ortodoxa). En qualsevol cas, la comprensió del fenomen de la no-localitat és un objectiu indispensable de tota interpretació del formalisme que pretenga resoldre el problema de la mesura, al temps que la seua explicació depèn dels compromisos ontològics que hom estiga disposat a assumir.

L'indeterminisme

Pel que fa a la qüestió del determinisme, una de les raons per les quals Einstein, Bohm i altres van perseguir una interpretació diferent a la ortodoxa va ser precisament la d'eliminar el caràcter indeterminista de la posició ortodoxa. La teoria de l'ona pilot de de Broglie i la de Bohm, i les seues hereves, són teories decididament deterministes, que s'encarreguen d'amagar sota les variables ocultes el caràcter aparentment probabilístic de la teoria. L'evolució d'un sistema quàntic està *determinada* per l'equació d'Schrödinger i per l'equació guia, de manera que seria possible predir amb precisió infinita la posició d'una partícula passat un interval de temps si coneguérem les posicions de totes les partícules involucrades en l'evolució (idealment, totes les partícules de l'univers) i la funció d'ona del sistema en un moment determinat, en una formulació que recorda la famosa definició de determinisme de Laplace.²³ Tanmateix, la formulació de la teoria, i el caràcter especial de la funció d'ona prohibeixen la determinació de les condicions inicials que caracteritzen un sistema quàntic particular en un moment concret. Això provoca que, en la pràctica, no siga possible predir l'evolució del sistema i fa aquesta interpretació perfectament compatible amb les relacions d'incertesa de Heisenberg.

La interpretació del col·lapse objectiu, en aquest punt, segueix l'estratègia contrària a la de la teoria de les variables ocultes. Accepta l'indeterminisme quàntic i el codifica en un terme que justifique, de manera estocàstica, el col·lapse real i objectiu del sistema quàntic. Cal modificar l'equació d'evolució perquè aquest element probabilístic quede inclòs al si de la teoria (doncs la interpretació ortodoxa només l'inclou a través del polèmic postulat de la mesura). D'aquesta manera, és possible construir una teoria amb prediccions molt

²³ Segons Laplace (1814), una intel·ligència que fos capaç de conèixer totes les forces que actuen sobre totes les entitats que existeixen al món, juntament amb les seues posicions, en un instant determinat de temps, seria capaç de predir tant el seu comportament passat com el futur.

semblants a la de la teoria quàntica que mantinga aquest element d'indeterminació sense caure en els subjectivismes de les propostes que es deriven de la interpretació de Copenhaguen. En aquest sentit, les teories del col·lapse objectiu cerquen l'objectivitat, de la mateixa forma que ho fan les teories de variables ocultes, però ho fan abraçant l'indeterminisme, a diferència del determinisme que defensen els teòrics de les variables ocultes.

Finalment, la teoria dels molts mons, en acceptar la interpretació literal del formalisme quàntic i rebutjar qualsevol modificació per tal d'acomodar el postulat quatre en el formalisme de la teoria, es converteix també en una teoria determinista de l'evolució de l'univers com un tot, ja que només pren en consideració l'evolució que dicta l'equació d'Schrödinger, que és una equació unitària i, per tant, prediu un estat determinat del multivers, partint d'un estat inicial conegut. No obstant això, de la mateixa forma que passa amb el problema de la no-localitat, *des de dins* d'un únic univers, per exemple, el nostre, les coses succeeixen i són descrites de forma indeterminista. Cal formular els enunciats que són conseqüència observacional de la teoria quàntica de manera indeterminista, doncs no tenim cap procediment que ens permeti esbrinar en quin dels universos ens trobem.

Aquestes consideracions, partint de cadascuna de les interpretacions discutides, fan plantejar la qüestió següent: és la teoria quàntica una teoria realment indeterminista? Popper (1982/2011), per exemple, va adreçar el problema tot defensant que la teoria és *tan* indeterminista com les teories clàssiques.²⁴ En cert sentit, té raó quan clama que l'indeterminisme és una posició metafísica que es pot defensar per ser compatible amb el formalisme de la teoria, però no per ser una *conseqüència* del formalisme. En aquest punt, Popper és un defensor d'una interpretació objectiva i indeterminista de la teoria. Ballentine (1998), pel seu costat, fa veure que la teoria quàntica, per ella mateixa, guarda silenci sobre la qüestió de l'indeterminisme: l'absència de determinisme no és una predicció d'indeterminisme.

La probabilitat

De la mateix manera que l'indeterminisme és un concepte metafísic que sovint apareix lligat a les interpretacions de la teoria quàntica, la pròpia noció

²⁴ Segons Popper, la física newtoniana permet el càlcul de trajectòries definides amb tanta precisió com es desitge sempre i quan les condicions inicials de la partícula (posició i velocitat) siguin conegudes al menys amb tanta precisió com la desitjada. Tanmateix, sempre existeix una limitació física a la determinació d'aquestes condicions inicials, la qual imposa al seu torn una limitació a la predictibilitat de la trajectòria de la partícula. Això és suficient motiu, segons la seua argumentació, per a qualificar a les teories clàssiques com a indeterministes, en el mateix sentit que ho és la teoria quàntica.

de probabilitat juga un rol central en la majoria d'aquestes interpretacions. Si bé la teoria quàntica no és l'única ni la primera teoria que fa ús de conceptes probabilístics en la seua formulació (veure el formalisme de la mecànica estadística de partícules), sí es la primera teoria que postula l'existència de probabilitats no sempre com a una manifestació del nostre desconeixement del sistema físic que volem descriure sinó moltes vegades com una mostra de la indeterminació inherent a certs sistemes físics microscòpics. Aquesta és la posició de Bohr quan interpreta el principi d'incertesa de Heisenberg com un principi d'indeterminació (dirà que no és una caracterització únicament del que *podem saber* d'un sistema, sinó que aquestes relacions d'incertesa són una limitació d'allò que *pot estar definit* en un sistema quàntic); d'aquesta forma, la frontera que separa l'epistemologia de l'ontologia queda desdibuixada en moltes de les variants de la interpretació ortodoxa de la teoria quàntica.

En les teories de variables ocultes, torna a interpretar-se, al mode de la mecànica estadística, el càlcul de probabilitats com una mesura *objectiva* del desconeixement, en aquest cas, de la posició *real* de les partícules que intervenen en la descripció del sistema. Aquest desconeixement és un element indispensable en la correcta descripció i predicció del comportament d'un sistema quàntic, doncs la seua evolució depèn de les condicions inicials del sistema i el seu entorn, les quals no és possible conèixer amb absoluta precisió. Tanmateix, el concepte de probabilitat no juga un paper central si ens fixem en l'evolució determinista del sistema. L'indeterminisme en la predicció és només metodològica i un problema pràctic, per sota del qual subjau un comportament plenament determinista i, per tant, no probabilístic, del sistema en qüestió.

En les teories del col·lapse objectiu, la noció de probabilitat és imprescindible per a donar compte del caràcter estocàstic d'aquest tipus de comportament i, per tant, adreça el problema de la probabilitat de manera directa, incloent-la en el formalisme de la nova teoria modifica. La teoria dels molts mons, en canvi, té en el concepte de probabilitat, un dels seus majors desafiaments. Com que resol el problema de la mesura mitjançant l'escissió continuada del nostre univers en molts mons, cosa per a la qual no cal modificar l'equació d'evolució temporal, el col·lapse com a fenomen físic real desapareix i, per tant, l'explicació de les observacions en termes de probabilitats no té una justificació clara. Cada mon és tan *realment* existent com els altres, de manera que assignar un valor numèric a la probabilitat d'ocurrència pot semblar una decisió o bé arbitrària, o fins i tot, inconsistent. Encara que hi ha propostes per a interpretar aquest problema en el context de les teories dels molts mons (WALLACE 2010), és un qüestió oberta i una de les dificultats que comprometen a aquesta interpretació com a candidata a teoria explicativa del formalisme quàntic.

El realisme científic

Quant al realisme científic, en aquesta mateixa línia, la principal separació entre blocs interpretatius enfronta a la interpretació ortodoxa, que freqüentment se sol associar amb una visió anti-realista, constructivista o idealista de les teories científiques, amb la resta d'interpretacions, que parteixen d'un realisme científic comú, al menys pel que fa al caràcter general de les teories científiques.²⁵ A partir d'aquesta arrel comú, cada interpretació considera que allò real són unes coses o unes altres.

En el cas de les teories de variables ocultes, aquestes variables, malgrat ser inobservables, constitueixen part de l'ontologia de la teoria. És a dir, les partícules descrites per la teoria quàntica tenen posicions reals i definides i, per tant, és possible parlar amb propietat de la trajectòria d'aquesta o d'aquella altra partícula. La funció d'ona, en aquest conjunt de teories, pot interpretar-se de forma instrumental (sense tenir cap grau de realitat objectiu) o bé com un altre element de l'ontologia: en aquest cas, hi ha versions de les teories de variables ocultes que interpreten la funció d'ona bé com un camp físic més o menys subtil que guia el moviment de les partícules, bé com una propietat disposicional del sistema quàntic al qual està lligada, o bé com una llei natural que regula l'evolució de les entitats que existeixen substancialment (les partícules).

La teoria dels mons múltiples exagera el significat de la funció d'ona fins al punt de defensar la realitat dels diferents universos que explicarien el col·lapse aparent de la funció d'ona. Com que no hi ha realment col·lapse, la funció d'ona pot interpretar-se o no com una entitat realment existent, que serveix com a descripció d'allò que realment està succeint, com és la múltiple escissió de l'univers en diferents mons.

Finalment, les teories del col·lapse objectiu reserven un lloc important en la seua ontologia a la funció d'ona que, en aquesta interpretació sí, pateix un col·lapse, físic i real i, per tant, juntament amb allò que té existència substancial (la densitat de matèria, per exemple), la funció d'ona ha de tenir cert grau de realitat i no pot entendre's únicament com una eina per a calcular l'evolució futura d'un determinat sistema físic.

ESTAT DE LA QÜESTIÓ

Així doncs, l'estat de la qüestió pel que fa a les interpretacions de la teoria quàntica d'ençà que Planck, Einstein i Bohr van plantejar els primers

²⁵ Segons el realisme científic, els enunciats de les teories científiques diuen coses aproximadament vertaderes sobre el món, tant pel que fa als termes observables, com als inobservables, del qual podem conèixer de forma aproximada com és.

problemes físico-filosòfics que la teoria suggeria, fins al nostres dies, ha tingut un recorregut que ha portat al sorgiment i desaparició de múltiples interpretacions. D'altres, han reviscolat després d'un període de latència. En resum, es pot dir que en l'actualitat, part del debat en filosofia de la física rau en la qüestió quàntica, en part perquè permet il·luminar qüestions relacionades amb la localitat de les teories científiques, el determinisme i l'indeterminisme científics i metafísics, la noció de probabilitat i la qüestió del realisme, entre altres problemes filosòfics i conceptuals.

Des d'un punt de vista històric i també fent una ullada a la situació actual, és possible plantejar el debat sobre la qüestió a partir de blocs de interpretacions possibles, en funció de si adopten un punt de vista determinat o un altre pel que fa a qüestions com la no-localitat, l'indeterminisme o el realisme científic. També és possible traçar una separació objectiva entre aquelles interpretacions que interpreten el formalisme de manera (quasi) literal i aquelles interpretacions que el modifiquen o l'amplien (i, en conseqüència, és raonable pensar-les com a teories alternatives, més que com a interpretacions). Si bé el llistat i les classificacions no són l'única manera de reproduir totes les respostes que s'han donat al problema quàntic durant les darreres dècades, sí indiquen una tendència en l'actualitat a plantejar els problemes de la filosofia de la física en la interfície entre física, filosofia de la ciència i metafísica. No és possible construir una interpretació de la teoria quàntica que no continga elements metafísics, encara que la proposta siga la de minimitzar-los. Per exemple, el projecte defensat per Heisenberg que cristal·litza en la interpretació ortodoxa té com a objectiu eliminar els elements metafísics de la teoria (1932/1949), cosa que, com hem vist, no aconsegueix del tot, encara que sembla minimitzar-los. Altres interpretacions no renuncien al cost metafísic que suposa poblar l'ontologia de la teoria bé de variables ocultes, bé de fenòmens com el col·lapse real efectiu, bé amb universos múltiples que es despleguen a cada instant. La justificació de la introducció d'aquests elements metafísics resulta òbvia si hom aconsegueix una explicació satisfactòria de la teoria quàntica que aconseguisca, d'una banda, reproduir les prediccions de la teoria quàntica segons el formalisme original (la qual es caracteritza per un èxit en la predicció empírica sense precedents) i, d'altra banda, siga capaç de ser continuista amb les teories anteriors (en particular, la mecànica clàssica de partícules) i les teories contemporànies acceptades (en particular, les teories de la relativitat especial i general).

Un aspecte no tractat en aquest escrit que ha començat a desenvolupar-se només en els darrers anys, és l'extensió del debat de la teoria quàntica de partícules no-relativista a la teoria quàntica de camps relativistes. Aquest pas exigeix canvi de domini (passar d'una ontologia de partícules a una ontologia de camps) que sotmet a una gran tensió a la majoria de teories proposades. La

teoria del molts mons deu enfrontar-se a la caracterització d'un temps absolut (o temps còsmic) per a donar compte de forma objectiva del procés d'escissió en molts mons. Les teories del col·lapse objectiu i les teories de variables ocultes, al seu torn, han de modificar de manera notable la seua ontologia per a ser capaces de convertir el formalisme en un conjunt de fórmules amb invariància Lorentz, la qual cosa no és ni directa ni senzilla tècnicament. Això no vol dir que no siga possible desenvolupar una mecànica quàntica bohmiàna o fer una versió invariant Lorentz de la teoria GRW, sinó que cal fer passos més grans que els fets fins al moment per a assolir avenços en aquest terreny.

Agraïments

Agraesc als editors d'aquesta revista la seua acurada forma de treballar i a un revisor anònim les seues correccions i suggeriments, que han permès millorar el text en claredat expositiva, forma i contingut.

REFERÈNCIES

- ALBERT, D. Z. 1992, *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge: Harvard University Press.
- ALBERT, D. i LOEWER, B. 1988, "Interpreting the many-world interpretation", *Synthese*, 77: 195-213.
- ALLORI, V. 2013, "Primitive ontology and the structure of fundamental physical theories", en D. ALBERT i A. NEY (ed.), *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*, Nova York: Oxford University Press, 58-75.
- ASPECT, A. 1976, "Proposed experiment to test the nonseparability of quantum mechanics", *Physical Review D*, 14 (8), 1944.
- BACCIAGULPI, G. i VALENTINI, A. 2009, *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference*, Cambridge: Cambridge University Press.
- BALLENTINE, L. E. 1973, "Can the statistical postulate of quantum theory be derived? - A critique of the many-universes interpretation", *Foundations of Physics*, 3 (2): 229-40.
- BALLENTINE, L. E. 1998, *Quantum Mechanics: A Modern Development*, Singapur: World Scientific.
- BARRETT, J. 2011, "Everett's pure wave mechanics and the notion of worlds", *European Journal for Philosophy of Science*, 1 (2): 277-302.
- BELL, J. S. 1964, "On the Einstein Podolsky Rosen paradox", *Physics*, 1 (3): 195-200.
- BELL, J. S. 1982, "On the impossible pilot wave", *Foundations of Physics*: 159-68.
- BELL, J. S. 1987, "Are there quantum jumps?", en J. S. BELL, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press, 201-12.
- BOHM, D. 1952, "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables", *Physical Review*, 85: 166-79.
- BOHR, N. 1988, *La teoría atómica y la descripción de la naturaleza* (M. Ferrero Melgar, Trad.), Madrid: Alianza. [Obra original publicada en 1984.]
- CARLESSO, M. i DONADI, S. 2019, "Collapse models: main properties and the state of the experimental tests", *Advances in Open Systems and Fundamental Tests of Quantum Mechanics*: 1-13.
- CARLESSO, M.; DONADI, S.; FERIALDI, L.; PATERNOSTRO, M.; ULBRICHT, H. i BASSI, A. 2022, "Present status and future challenges of non-interferometric tests of collapse models", *Nature Physics*, 18: 243-50.
- DE BROGLIE, L. 1927, "La structure atomique de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire", *Journal de Physique*, VI: 8-25.

- DE WITT, B. S. i GRAHAM, N. 1973, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton: Princeton University Press.
- DORATO, M. i ESFELD, M. 2010, “GRW as an ontology of dispositions”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41: 41-9.
- DÜRR, D.; GOLDSTEIN, S. i ZANGHÌ, N. 1992, “Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty”, *Journal of Statistical Physics*, 67: 843-907.
- DÜRR, D.; GOLDSTEIN, S. i ZANGHÌ, N. 1996, “Bohmian mechanics as the foundation of quantum mechanics”, en *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*, Dordrecht: Springer, 21-44.
- DÜRR, D.; GOLDSTEIN, S. i ZANGHÌ, N. 1997, “Bohmian mechanics and the meaning of the wave function”, en R. S. COHEN, M. HORNE i J. STACHEL, *Potentiality, Entanglement and Passion-at-a-Distance - Quantum Mechanical Studies in Honor of Abner Shimony*, Dordrecht: Kluwer.
- EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B. i ROSEN, N. 1935, “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?”, *Physical Review*, 47(10): 777-80.
- ESFELD, M. 2007, “Metaphysics of science between metaphysics and science”, *Grazer Philosophische Studien*, 74: 199-213.
- ESFELD, M. 2014, “The primitive ontology of quantum physics: guidelines for an assessment of the proposals”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 47: 99-106.
- EVERETT III, H. 1957, “‘Relative state’ formulation of quantum mechanics”, *Reviews of Modern Physics*, 29: 454-62.
- FREIRE JR., O. 2015, *The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)*, Berlin: Springer.
- GHIRARDI, G., 2002, “Collapse Theories”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Obtingut de: <https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/qm-collapse/>
- GHIRARDI, G., GRASSI, R. i BENATTI, F. (1995). Describing the macroscopic world: closing the circle within the dynamical reduction program. *Foundations of Physics*, 25(1), 5-38.
- GHIRARDI, G.; RIMINI, A. i WEBER, T. 1986, “Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems”, *Physical Review D*, 34 (2): 470-91.
- HEISENBERG, W. K. 1949, *The physical principles of quantum theory* (C. Eckart i F. C. Hoyt, Trads.), Nova York: Dover. [Obra original publicada en 1930.]
- HOLLAND, P. R. 1995, *The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge: Cambridge University Press.
- LAPLACE, P. S. 1814, *Essai philosophique sur les probabilités*, París: Courcier.
- MAUDLIN, T. 1995, “Three measurement problems”, *Topoi*, 14 (1): 7-15.

- MAUDLIN, T. 2010, "Can the world be only wavefunction?", en S. SAUNDERS, *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality*, Oxford: Oxford University Press, 121-43.
- MAUDLIN, T. 2013, "The nature of the quantum state", en D. ALBERT i A. NEY (ed.), *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*, Nova York: Oxford University Press, 126-53.
- MERMIN, D. 1990, "Simple unified form for the major no-hidden variables theorem", *Physical Review Letters*, 65: 3373.
- NORSEN, T. 2018, "On the explanation of Born-rule statistics in the de Broglie-Bohm pilot-wave theory", *Entropy*, 20 (6): 422.
- PEARLE, P. 1989, "Combining stochastic dynamical state-vector reduction with spontaneous localization", *Physical Review A*, 39 (5): 2277-89.
- POPPER, K. R. 2011, "Volumen II. El universo abierto. Un argumento en favor del indeterminismo", en W. W. BARTLEY (ed.), *Post scriptum a La lógica de la investigación científica* (M. Sansigre Vidal, Trad.), Madrid: Tecnos. [Obra original publicada en 1982.]
- SCHLOSSHAUER, M. 2007, *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition*, Berlin/Heidelberg: Springer.
- SCHRENK, M. 2016, *Metaphysics of Science: A Systematic and Historical Introduction*, Routledge.
- SCHRÖDINGER, E. 1980, "The present situation in quantum mechanics: a translation of Schrödinger's 'cat paradox' paper", *Proceedings of the American Philosophical Society*, 124: 323-38.
- VALENTINI, A. i WESTMAN, H. 2005, "Dynamical origin of quantum probabilities", *Proceedings of the Royal Society of London A* 461: 253-72.
- VON NEUMANN, J. 1955, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton: Princeton University Press. [Obra original publicada en 1932.]
- WALLACE, D. 2008, "The interpretation of quantum mechanics", en D. RICKLES (ed.), *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics*, Burlington: Ashgate, 197-261.
- WALLACE, D. 2010, "How to prove the Born rule", en S. SAUNDERS, J. BARRETT, A. KENT i D. WALLACE (ed.), *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, and Reality*, Oxford: Oxford University Press.
- WALLACE, D. 2012, *The Emergent Multiverse: Quantum Theory According to the Everett Interpretation*, Oxford: Oxford University Press.
- ZEH, H.-D. 1970, "On the interpretation of measurement in quantum theory", *Foundations of Physics*, 1 (1): 69-76.
- ZUREK, W. H. 1981, "Pointer basis of quantum apparatus: into what mixture does the wave packet collapse?", *Physical Review D*, 24: 1516-25.