

Ramon Lapiedra

Els dèficits de la realitat i la creació del món

*2a edició
corregida i augmentada*



Encuadres

Ramon Lapiedra Civera

**Els dèficits de la realitat
i la creació del món**

«Bookwire»

Civera R.

Els dèficits de la realitat i la creació del món / R. Civera —
«Bookwire», — (Encuadres)

Tot el que s'esdevindrà en aquest món està escrit en algun lloc o, al contrari, podria ser previst perquè hi ha els antecedents que ho predeterminen? El doctor Lapiedra, en un esforç reeixit per fer-nos entenedora la qüestió, aborda el tema del determinisme des de la mecànica quàntica, una disciplina física que únicament permet fer prediccions estadístiques d'acord amb el que s'anomena la interpretació ortodoxa de la teoria. Descriu l'essència dels experiments dels darrers cinquanta anys que han permès confirmar aquesta interpretació indeterminista de la mecànica quàntica contra una escapatòria residual, la qual s'acaba de bandejar amb el concurs del problema que planteja l'origen del món i amb el concurs de la cosmologia actual del Big Bang. Finalment, l'autor raona la possibilitat de magnificació macroscòpica de les incerteses quàntiques i les conseqüències que això podria tenir per a la naturalesa de la vida, de la vida humana en particular, i de la història.

ELS DÈFICITS DE LA REALITAT I LA CREACIÓ DEL MÓN

Ramon Lapiedra

ELS DÈFICITS DE LA REALITAT I LA CREACIÓ DEL MÓN

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

EN
8
CUADRES



Aquesta publicació no pot ser reproduïda, ni totalment ni parcialment, ni enregistrada en, o transmesa per, un sistema de recuperació d'informació, en cap forma ni per cap mitjà, sia fotomecànic, fotoquímic, electrònic, per fotocòpia o per qualsevol altre, sense el permís previ de l'editorial.

1a edició: 2004

2a edició, corregida i augmentada: juny 2020

© Del text: Ramon Lapiedra i Civera, 2020

© D'aquesta edició: Universitat de València, 2020

Producció editorial: Maite Simon

Disseny interior i maquetació: Inmaculada Mesa

Correcció: Elvira Iñigo

Disseny de la coberta: Celso Hernández de la Figuera i Maite Simon

ISBN: 978-84-9134-615-9

Edició digital

Per a Carme

If you really want to hear about it...

(Si de debò els interessa el que vaig a contar-los...)

J. D. SALINGER, *The catcher in the rye*

Índex

[Pròleg a aquesta edició, per Armando Pérez Cañellas](#)

[Pròleg a la primera edició, per J. Bernabeu Alberola](#)

[Nota de l'autor a aquesta edició](#)

[Nota de l'autor a la primera edició](#)

Introducció

1. Què sabem de bàsic sobre la realitat física o la mecànica quàntica

[1.1 La funció d'ona](#)

[1.2 Les relacions d'incertesa](#)

[1.3 La coherència dels estats i l'experiment de la doble escletxa.](#)

[1.4 L'espín](#)

[1.5 La indiscernibilitat de les partícules idèntiques](#)

2. El gat de Schrödinger i la interpretació del procés de mesura en mecànica quàntica

[2.1 L'experiment mental del gat de Schrödinger](#)

[2.2 El col·lapse de la funció d'ona com a fet objectiu](#)

[2.2.1 Encara el gat de Schrödinger](#)

[2.2.2 Les possibles raons d'una confusió](#)

2.2.3 *Col·lapse d'un sistema aïllat*

2.2.4 *Col·lapse sense amplificació macroscòpica? La resposta dels experiments*

2.2.5 *L'experiment mental del gat de Schrödinger amb temps de vol diferents: consideració final*

2.2.6 *A tall de resum*

2.2.7 *La interpretació dels diversos mons*

2.2.8 *La interpretació estadística de la mecànica quàntica.*

2.2.9 *Els dos tipus de mesures en mecànica quàntica*

2.3 Decoherència i món macroscòpic

2.4 Del descrèdit als dèficits ontològics de la realitat quàntica

3. La violació experimental de les desigualtats de Bell

3.1 Consideracions preliminars

3.2 L'experiment d'Einstein-Podolsky-Rosen

3.3 Discontinuitats quàntiques i propagació d'informació

3.4 Les desigualtats de Bell

3.5 Les desigualtats de d'Espagnat i altres dificultats per al realisme

4. Consciència, realisme i mecànica quàntica

4.1 Matèria i consciència

4.2 Ordinadors i consciència

4.3 Determinisme psicològic i mecànica quàntica

4.4 La vida i la història

4.5 Sistemes vius i mecànica quàntica: respostes aleatòries i desigualtats de Bell

5. La creació primigènia

5.1 Consideracions preliminars

5.2 L'Univers actual

5.3 El model del Big Bang. De la primera deumil·lèsima de segon a la recombinació de l'hidrogen

5.3.1 *Consideracions generals. L'aniquilació muó-antimuó.*

5.3.2 *El desacoblament dels neutrinos*

5.3.3 *L'aniquilació electró-positró*

5.3.4 *La síntesi de l'heli*

5.3.5 *La recombinació de l'hidrogen i el desacoblament matèria-radiació*

5.4 Abast i dificultats de la versió ordinària del model del Big Bang

5.4.1 *El problema de la planor*

5.4.2 *El problema de l'homogeneïtat global*

5.4.3 *El problema de les inhomogeneïtats locals observades.*

5.5 L'Univers inflacionari i la solució de les tres dificultats

5.6 Les dades observacionals i la determinació del model

5.7 Energia de l'Univers, creació i escuma quàntica

Consideracions finals

Apèndix. Demostració de les desigualtats de d'Espagnat

Referències bibliogràfiques

Índex analític

Sobre l'autor



Pròleg a aquesta edició

La mecànica quàntica és, com s'explica en aquest llibre, un dels pilars més sòlids de la física actual. Constitueix la base de nombroses disciplines, també exitoses, com ara la física de partícules,

la teoria nuclear, la descripció de l'estat sòlid i altres. Aquesta teoria ha rebut un interès renovat en els últims anys, degut al grau excepcional de control que hem assolit sobre un gran nombre de sistemes quàntics. Juntament amb aquest vessant experimental, la nostra curiositat teòrica al voltant dels processos que tenen lloc en aquells experiments també s'ha reforçat. No és que mai s'haja relaxat la nostra perplexitat davant del món quàntic, sempre ple de sorpreses, però la capacitat d'interaccionar de forma immediata amb nous experiments reviscola el nostre interès i ens motiva fortament per a proposar uns altres dispositius on comprovar si realment hem entès el que esdevé en aquests muntatges experimentals.

Així, una nova disciplina teòrica, que tracta en especial d'entendre com s'emmagatzema i manipula la informació continguda en els sistemes quàntics, rep el nom d'*informació quàntica*. Al cap i a la fi, la informació és inseparable dels sistemes físics: utilitzem sempre suports físics per a gravar-la i llegir-la, ja siga un full de paper o un disc dur. No és, doncs, gens sorprenent que, per tal d'adaptar-nos als sistemes quàntics, haguéssim de desenvolupar una nova teoria de la informació.

Com sempre, gràcies a la col·laboració entre teoria i experiments, podem dur a terme nous projectes. Des del punt de vista teòric, podem intentar, sota la perspectiva de la informació quàntica, noves idees al voltant de sistemes com els forats negres o sistemes complexos en estat sòlid. Des d'un punt de vista totalment pràctic, la majoria de països estan fortament interessats a dur a terme noves tecnologies quàntiques, com ara el desenvolupament dels ordinadors quàntics, la criptografia quàntica o nous aparells de mesura amb precisió sense precedents (metrologia quàntica). En alguns mitjans de comunicació es refereixen a aquest desenvolupament com a la *segona revolució quàntica*, sent la primera la que va donar lloc a la mecànica quàntica durant el segle passat.

Com veiem, la mecànica quàntica està d'actualitat. Però, tot i el desenvolupament teòric i experimental assolit, encara molts aspectes ens causen perplexitat i ens fan preguntar-nos fins a quin punt podem anar més enllà d'aquesta perplexitat. El fet que la teoria funcione tan bé mai ens pot aturar a l'hora de reflexionar sobre ella. Potser no trobarem una teoria alternativa, o tal vegada sí. En qualsevol cas, segur que aprendrem més sobre la pròpia teoria. Aquest és, al meu parer, el propòsit d'aquest llibre: una sèrie de reflexions sobre els aspectes més fonamentals de la mecànica quàntica, així com sobre les seues implicacions, no només a nivell subatòmic, sinó a escales més grans, fins i tot còsmiques.

Uns dels aspectes bàsics i més debatuts de la teoria és aquell que té relació amb la mesura d'un sistema quàntic. El fet que la dinàmica relacionada amb el procés de mesura (descriu per l'anomenat col·lapse de la funció d'ona) siga tan diferent de la que segueix l'evolució sense aquestes mesures, ha provocat moltes discussions. El debat més conegut està il·lustrat per l'experiment imaginari del gat de Schrödinger, sobre el qual s'han vessat rius de tinta. Com comenta Ramon Lapiedra, la possibilitat que fora necessària la presència d'un observador extern per tal de produir el col·lapse ens porta a absurds, i aleshores conclou que la mesura és un procés objectiu deslligat de l'observador, conseqüència de la interacció entre el sistema quàntic i un aparell de mesura macroscòpic. No puc deixar de manifestar el meu acord amb aquesta interpretació, la qual es veu ampliada amb la discussió de l'experiment del gat amb dos temps de vol diferents que apareix en aquesta nova edició.

I quin és el resultat d'una mesura sobre un sistema quàntic? És ací quan aprofundim en el cor de la mecànica quàntica, i ens obliguem a replantejar-nos el concepte de *realitat*, que constitueix l'eix central d'aquest llibre.

En psicologia, en sociologia i, per descomptat, en política, la realitat té uns límits difusos. Per a l'individu, una al·lucinació pot ser molt real. Els drets socials no tenen una realitat objectiva, ja que són construïts per conveni, varien d'una societat a una altra i, fins i tot, varien en el temps dins d'una mateixa societat. I si parlem de ciències? Ací esperem respostes més clares. Per al biòleg, una cèl·lula té una existència i una realitat molt evident. En la física clàssica, els objectes tenen també una realitat molt clara: darrere de cada un d'ells hi ha unes propietats prèvies a la mesura. Així, d'una pilota sabem que té una mida, un color, o una velocitat que existeixen fins i tot si no la mesurem.

Totes aquestes propietats tenen una realitat que no està limitada per la voluntat de l'observador per a determinar-les, una a una o totes alhora, o cap d'elles.

Aquesta realitat està minvada en els sistemes quàntics. El sistema posseeix una funció d'ona definida, però aquesta no determina el resultat d'una mesura de la posició, la velocitat o la direcció de l'espín. Excepte en casos particulars, el resultat no es pot predir: només sabem que en serà un entre un conjunt, però no podem predir quin de tots. Si tornem a preparar el sistema amb la mateixa funció d'ona, el resultat pot ser diferent. Al final, només podem predir que els diferents resultats es produiran amb una certa probabilitat. Aquesta probabilitat sí que és calculable amb les lleis de la mecànica quàntica, i podem contrastar-la amb els resultats obtinguts en qualsevol experiment. Com sabem, l'acord entre la predicció d'aquestes probabilitats i els resultats experimentals és total. Fins ara, no hem trobat cap desacord entre teoria i experiment.

La mecànica quàntica és, doncs, una teoria probabilista *per se*, a diferència de la mecànica clàssica. Com Ramon Lapiedra discuteix de forma detallada, en els sistemes clàssics podem trobar una dificultat major o menor per a determinar-ne el comportament futur, en especial si el sistema es caòtic, però es tracta d'una dificultat purament tècnica, d'un problema de precisió. En el cas del sistema quàntic, no es tracta d'una dificultat, sinó que la teoria és probabilista. Aquesta naturalesa impedeix parlar de trajectòries quàntiques, i té implicacions en el tractament de sistemes de partícules idèntiques, entre altres exemples. Jo invite el lector a què es detinga en les profundes reflexions que es fan en l'apartat 3.1 d'aquest llibre.

No és d'estranyar que molts científics s'hagen alçat contra aquesta descripció probabilista i l'hagen atribuït a una manca de coneixement sobre el sistema quàntic, tot insistint en una peça de realitat que no observem, i que explicaria aquesta naturalesa probabilista. És el cas del famós article d'Einstein, Podolsky i Rosen, discutit en l'epígraf 3.2, i que ha donat lloc a l'intent de formular *teories realistes*, on la peça que manca rep el nom de *variables ocultes*.

Hom podria pensar que, com en el cas d'un joc de màgia, es poden dotar aquestes variables ocultes de totes les propietats que desitgem, de manera que, jugant amb elles, podrem reproduir les mateixes prediccions que fa la mecànica quàntica. Doncs no! Justament això és el que mostra el teorema de Bell, basat en les desigualtats que porten també el nom del mateix científic, tal i com s'explica en l'epígraf 3.4. Si l'experiment viola aquestes desigualtats, o d'altres equivalents, hem de descartar el realisme local.

Durant molts anys, s'han dut a terme experiments dissenyats per comprovar si els sistemes quàntics verifiquen, o no, aquestes desigualtats. El resultat sempre ha mostrat que les desigualtats no se satisfan i que, en canvi, les dades estan d'acord amb les prediccions de la mecànica quàntica. Els experiments realitzats al llarg de 2015 han sigut decisius a l'hora de descartar definitivament el realisme local. És veritablement sorprenent i grandios que es pugui contrastar amb l'experiment una teoria que conté variables que, per definició, no són visibles. Aquesta és la potència de les desigualtats esmentades.

Quedaria, encara, una possible escapadòria per a la supervivència del realisme (òbviament, una mena de realisme *no local*). Aquesta forma de realisme és poc atractiva, per dir-ho d'una manera suau, per a la col·lectivitat científica, ja que implica una mena d'organització a nivell còsmic (una *conspiració*, en paraules de l'autor) des del començament del món, de manera que tota la maquinària d'aquest estaria dissenyada per tal de poder reproduir els resultats dels experiments amb sistemes quàntics, i que tan exitosament descriu la mecànica quàntica. Podem, com en el cas de les teories locals, contrastar aquesta teoria no local amb l'experiment? Ramon Lapiedra ens fa una proposta, en l'epígraf 3.5, basada en un altre tipus de desigualtats: les desigualtats de d'Espagnat. Si els experiments violen aquestes desigualtats, tal vegada podríem posar a prova alguns models no locals i deterministes, alternatius a la mecànica quàntica, que han estat proposats recentment. Es tracta, doncs, d'una proposta interessant, sobre la qual tornarem en la discussió sobre l'epígraf 4.5.

La discussió sobre un possible determinisme en les lleis de la natura té conseqüències importants a nivell psicològic i social. La responsabilitat davant dels nostres actes quedaria minvada, o fins i tot desapareixeria, si totes les nostres actuacions passades, presents i futures, estiguessen ja predeterminades. Queda clara la preocupació de Ramon Lapiedra per aquest aspecte, i crec que serà compartida pels lectors d'aquest llibre.

En canvi, si les lleis naturals no són deterministes, haurem d'assolir la nostra capacitat de prendre decisions, i la nostra responsabilitat en elles. D'on podria sorgir aquesta capacitat d'acció, aquesta absència de determinisme en el cervell humà? Lapiedra apunta la possibilitat que, darrere de la consciència humana, es manifeste alguna mena d'amplificació d'efectes quàntics a escala macroscòpica. De fet, aquesta és una idea central en el llibre, desenvolupada en el capítol 4.

La dificultat de comprovar aquesta hipòtesi amb sistemes macroscòpics, com ara el cervell humà, ens porta a una meta més modesta. Podríem, en primer lloc, tractar de fer aquestes comprovacions sobre una escala intermèdia entre el món microscòpic, clarament governat per les lleis quàntiques, i el macroscòpic, que descrivim utilitzant la mecànica clàssica. Aquests sistemes intermedis, anomenats mesoscòpics, també plantegen tota una sèrie de dificultats, que són discutides en l'epígraf 4.5, juntament amb propostes per tal de encarar-les, fent ús novament de les desigualtats de d'Espagnat comentades adés.

La discussió anterior ens porta a una reflexió prou inquietant, ja que, si la consciència pot aparèixer relacionada amb l'amplificació d'efectes quàntics a escala macroscòpica, què podríem dir dels ordinadors quàntics de què parlàvem al principi? Podríem, per aquest raonament, esperar que aquests ordinadors poguessen arribar a desenvolupar algun tipus de consciència? O, tal i com preguntava Philip K. Dick: *Somien els andròides amb ovelles elèctriques*? Davant d'aquesta inquietud, Lapiedra ens argumenta, amb alguns exemples, què l'ésser humà és molt més que un programari, la qual cosa impedeix la comparació entre la consciència humana i un ordinador, tot i que aquest siga quàntic. El futur ens dirà fins a quin punt aquesta comparació és entre dos conceptes molt llunyans, o pot haver-hi alguna mena d'apropament inquietant.

L'últim capítol ens porta a escales molt més grans que les macroscòpiques ja esmentades abans. De fet, són les escales més grans de què podem parlar, per definició, ja que això és justament l'Univers. Ramon Lapiedra ens descriu l'aventura més gran que podem imaginar, quant a grandària i duració temporal, guiats per la mecànica quàntica. Després de discutir què vol dir un principi per a l'evolució de l'Univers, i de introduir el concepte de isotropia, l'autor raona que aquest concepte és, de fet, compatible amb la idea de finitud.

Què ens aporten els conceptes quàntics a la nostra concepció de l'Univers? La idea central en la descripció que ens fa Ramon Lapiedra és que el balanç d'energia total és zero. D'aquesta manera, podem concebre l'Univers com una fluctuació, o tot un conjunt de fluctuacions, del buit mateix: l'autor es refereix a aquest conjunt de fluctuacions com a l'*escuma quàntica*, que podria constituir el bressol de múltiples universos, dels quals el nostre seria només una part. La història posterior és complexa i amb múltiples etapes, des de la formació de les partícules elementals fins a la formació d'estels i galàxies, amb una estructura jeràrquica i moltes qüestions per resoldre, com ara la composició de la matèria fosca o la, encara més desconeguda, *energia fosca*.

Vull acabar aquest pròleg simplement amb un intent de compartir la fascinació davant el ventall de situacions en què hem pogut discutir conceptes quàntics de la mà de Ramon Lapiedra, des del món de les partícules elementals fins a l'evolució de l'Univers. Espere que el lector pugui gaudir amb les reflexions que l'autor ens ha posat davant i les implicacions d'aquestes com jo ho he fet.

ARMANDO PÉREZ CAÑELLAS

Universitat de València

Octubre de 2019



Pròleg a la primera edició

El lector d'aquest llibre del professor Lapiedra hi trobarà una quantitat d'aspectes molt interessants de la física que en alguns moments el mantindran en suspens, per la discussió freqüent de situacions contradictòries amb el sentit comú dels sers humans. Però, globalment, el llibre podria considerar-se com un assaig de tipus epistemològic. El plantejament de com una teoria actual del coneixement ha d'incorporar una visió de la realitat objectiva de la natura capaç de satisfer tots els ingredients de la mecànica quàntica conduirà necessàriament a la conclusió d'uns dèficits ontològics, en paraules de l'autor Lapiedra. Contràriament al sentir d'Einstein, no sempre es poden assignar elements de realitat als objectes de la natura perquè, en la mecànica quàntica, no sempre es pot fer una descripció separada i ben definida d'aquests objectes; hi ha correlacions insalvables que no permeten identificar-ne les parts separatament.

Però l'anàlisi del llibre no es queda solament en aquest punt sinó que, a partir de la descripció quàntica de la realitat, l'autor s'embarca en un doble exercici de plantejar preguntes i suggerir problemes que han ocupat les ments de el ser humà al llarg de la història de la civilització: en què consisteix la consciència? En què, el lliure albir? Com pot haver-hi un origen de l'Univers a partir del buit, del no-res?

En la història de l'avanç del coneixement, el descobriment de la mecànica quàntica en el segle XX –que explica tot un conjunt de nous fenòmens coneguts com a física quàntica–, es col·loca al nivell de la revolució científica originada en el segle XVII per la nova metodologia de descriure la natura iniciada per Galileu i Newton: el mètode científic. Al voltant del 1900, molts fenòmens físics coneguts experimentalment no podien ser explicats per la física clàssica. En un principi, la mecànica quàntica va sorgir per a proporcionar una descripció de la matèria i la radiació sobre una escala microscòpica de l'ordre d' $1\text{\AA}=10^{-10}$ metres,¹ molt més enllà del que els nostres sentits son capaços de percebre i de resoldre. Per poder penetrar en aquestes lleis fonamentals de la natura, van caldre un gran enginy i imaginació. L'acceptació per part de la comunitat científica d'idees tan revolucionàries com les propietats ondulatòries de la matèria (els electrons són difractats!) o les propietats corpusculars de la radiació (els fotons!) va desencadenar en uns quants anys un avanç conceptual i fenomenològic sense precedents. D'acord amb la física clàssica, donat un conjunt definit de condicions inicials i el coneixement de les forces que hi actuen, és possible determinar el comportament del sistema físic sense ambigüitat; és a dir, si hi ha un conjunt de mesures repetides en condicions idèntiques, els resultats d'aquestes mesures seran idèntics. Al contrari, la mecànica quàntica prediu que el comportament de la natura és indeterminista i que tota la informació sobre esdeveniments físics ve donada en termes de probabilitats. El desenvolupament de la física quàntica al llarg del segle XX ha mostrat que el seu domini d'aplicació s'estén al comportament de la matèria a totes les escales i que fenòmens macroscòpics de la grandària de l'escala humana com la incompressibilitat de la matèria agregada, la superconductivitat o la superfluïdesa, només poden ser comprensibles en termes quàntics.

La teoria quàntica va nàixer en 1900, quan Max Planck va necessitar incorporar en la fórmula que explicava la radiació emesa per un cos calent un ingredient contrari a la física clàssica: l'energia emesa o absorbida per les vibracions dels àtoms del cos calent només pot prendre valors múltiples d'una energia elemental, un quàntum energètic proporcional a la freqüència de la radiació. Això significa que la natura és selectiva en les quantitats energètiques que un cos pot absorbir o emetre! i que no tots els valors de l'energia són possibles.

A partir de Planck, es va produir un moviment irresistible que va dur a aplicar el concepte de salt energètic als fenòmens microscòpics dels àtoms i la radiació. En 1905, Albert Einstein va ser consistent quan proposà que, si l'energia dels oscil·ladors atòmics en emetre o absorbir radiació prenia valors discrets, la radiació hauria de consistir en quàntums energètics: els fotons. Amb els fotons,

Einstein explica l'efecte fotoelèctric, l'emissió d'electrons d'un metall a partir de radiació incident. Aquest fenomen presentava propietats radicalment contràries a la física clàssica, i la idea dels fotons va aconseguir explicar-les. En 1913, Niels Bohr incorpora les noves idees quàntiques a la seua teoria de l'àtom d'hidrogen. Aquests i altres èxits inicials de les idees quàntiques van preparar el camí per al naixement de la nova teoria quàntica, desenvolupada ràpidament a partir de 1924.

La mecànica quàntica s'ha revelat com la ferramenta més poderosa per a comprendre i predir tot tipus de fenòmens físics i està en els fonaments dels desenvolupaments tecnològics de més èxit de la segona meitat del segle XX. Aplicada a àtoms i molècules, la mecànica quàntica és la base i el futur de la química moderna pel fet que explica l'enllaç químic. En els sòlids, els electrons són atrets pels ions que formen part de la xarxa cristal·lina; quan aquesta interacció és tractada quànticament, els nivells d'energia del material formen sèries de valors molt junts, les bandes energètiques separades entre si per salts d'energia prohibida. La teoria de bandes permet explicar el comportament dels conductors, dels aïlladors i dels semiconductors, tan usats en la tecnologia electrònica dels temps actuals. El transistor és un dispositiu que permet una gran amplificació del corrent elèctric en petites dimensions. Les tècniques modernes de manipulació de materials permeten l'elaboració d'heteroestructures el comportament de les quals depèn de fenòmens quàntics. Han aparegut tot un conjunt de nous dispositius: els làsers de semiconductors, els pous quàntics, els microscopis d'efecte túnel... Més coneguts socialment són instruments com el TAC o la ressonància magnètica d'aplicació en medicina. La connexió entre la física quàntica i la tecnologia en l'àrea de materials és tan estreta que una distinció real entre els dos camps quasi ha desaparegut. El segle XX és identificat com el segle quàntic. En la física de partícules elementals s'han arribat a explorar distàncies de l'ordre d'una centmilionèsima part (10^{-8}) de les distàncies atòmiques, i no s'hi ha pogut detectar cap desviació dels postulats de la mecànica quàntica.

Però, paradoxalment, a pesar del vast domini en què hem aconseguit utilitzar la física i la tecnologia quàntiques, la interpretació del nucli bàsic de la teoria segueix sotmés a múltiples debats. És en aquest punt on el present llibre aporta components interessants, des de la difusió dels problemes continguts, passant per la discussió de com la mecànica quàntica aborda el coneixement de la realitat objectiva i quines són les implicacions sobre aquesta realitat, fins arribar a plantejar si aquesta nova realitat permet abordar vells problemes com la consciència humana o l'origen de l'Univers. El primer aspecte quàntic que es discuteix en el llibre és el caràcter probabilista, indeterminista, en la predicció científica del resultat de mesura d'una magnitud física observable: dos sistemes físics preparats idènticament poden donar lloc a resultats diferents de mesures repetides. Això no vol dir que la mecànica quàntica no és predictiva; ho és, però en termes de distribucions de probabilitats per a cadascun dels resultats possibles de la mesura. Els límits a la predictibilitat estan exemplificats en les famoses relacions d'incertesa de Heisenberg: l'especificació de la posició d'una partícula amb una incertesa està correlacionada amb un límit a la precisió amb què l'impuls d'aquesta partícula pot ser simultàniament conegut. La manera quàntica de comprendre probabilitats quan es tenen dues alternatives per a un procés és ondulatoria, segueix les lleis de superposició lineal que tenen les ones. D'aquesta manera es fan aparents les propietats ondulatories que la mecànica quàntica assigna a les partícules, contràriament a la física clàssica. El comportament ondulatori que De Broglie va postular en 1924 correspon a ones de probabilitat.

Un segon aspecte —que potser continua tenint força dificultats conceptuals encara avui—, és el de l'evolució acausal d'un sistema físic associada amb el problema de la mesura. És el famós problema de la dicotomia sistema físic-observador. Potser ningú discuteix la consistència lògica d'exigir que, després del resultat de mesura de l'observable, el sistema físic, siga quin siga l'estat abans de la mesura, haja de col·lapsar en l'estat propi associat amb el corresponent resultat de mesura. És l'única manera de garantir que, si es torna a mesurar després (una mesura successiva, no una mesura repetida), ha de donar el mateix resultat. El problema conceptual és quan i com es produeix el col·lapse des de l'estat immediatament abans a immediatament després de la mesura. Aquest aspecte de falta de realitat

objectiva en un sistema quàntic –que quedarà més patent després– molestava Einstein molt més que la falta de determinisme. Les solucions més buscades a aquest problema, que permeten donar una solució a la paradoxa (i a la salut!, segons Omnès) del gat de Schrödinger –extensament discutida pel professor Lapiedra en aquest llibre–, reconeixen que en la interacció amb un objecte macroscòpic –l’aparell de mesura– hi ha aspectes d’irreversibilitat i decoherència que no permeten reconstruir la història anterior. El professor Lapiedra, com altres autors, assenyala que aquest comportament podria ser degut a la mera interacció entre el sistema quàntic i l’objecte macroscòpic que és l’aparell de mesura. John Bell considerava plausibles totes aquestes explicacions, però no contingudes en la pròpia teoria. Segons ell, consistien en un FAPP –per a tots els propòsits pràctics. Almenys, en aquestes interpretacions, el comportament és objectiu i no cal que un observador humà prengui nota conscient del resultat per a provocar en el gat de Schrödinger l’estat col·lapse de viu o de mort, el que està d’allò més d’acord amb la lògica quotidiana. L’aspecte més allunyat dels prejudicis –o de la filosofia– de la física clàssica, és el que avui en diríem no separabilitat dels sistemes quàntics correlacionats. La civilització occidental, des dels grecs, i la mateixa ciència metòdica, des del segle XVII, han suposat que per a entendre el comportament d’un objecte compost podem dividir-lo en parts. Això suposa que, no sols l’objecte sencer sinó també cadascuna de les parts, tenen una realitat ben definida: els elements de realitat, en paraules d’Einstein. Doncs bé, no és cert! Einstein li va negar la categoria de completesa a la teoria quàntica perquè és impossible assignar un estat quàntic ben definit a cadascuna de les dues partícules correlacionades i només es pot assignar un estat quàntic al sistema compost. Aquesta discussió, encapçalada per una famosa publicació d’Einstein, Podolsky i Rosen el 1935, era més bé filosòfica o epistemològica, i tampoc tenim una vareta màgica per a establir de manera definida –és a dir, sense matisos– què és el que vol dir *realitat*. La publicació en 1964 de les desigualtats de Bell va traslladar aquest debat interpretatiu i filosòfic al camp de la física, en demostrar el caràcter observable i mesurable d’aquestes correlacions quàntiques capaces de prendre valors més grans que els límits exigits per una descripció realista separable de tipus clàssic. Tots els experiments realitzats en els últims trenta anys per procedir a un test de les desigualtats de Bell han confirmat, més enllà de qualsevol dubte, les prediccions de la mecànica quàntica amb valors clàssicament prohibits.

I l’últim capítol en aquesta discussió de la no separabilitat de sistemes correlacionats, on el tot és més que la suma de les parts, està encara per escriure. O millor, està escrivint-se: és la nova teoria quàntica de la informació. L’ús d’estats quàntics entrellaçats no separables per a tecnologies de la informació i les comunicacions, ara en els seus balbuçigs, pot obrir desenvolupaments revolucionaris en criptografia, teleportació i computació quàntiques que no es podien imaginar fa tan sols uns quants anys... De la filosofia a la física, de la física a la tecnologia!

És la mecànica quàntica una teoria objectiva? És realista? La primera qüestió és, en part, pròpia de la física, mentre que la segona entra de ple en la filosofia. Segons Kant, diem que alguna cosa és objectiva si existeix fora de la ment humana, és a dir, com un objecte independent de la ment. La qüestió de l’objectivitat en mecànica quàntica prové sobretot del problema del col·lapse de l’estat quàntic com a producte de la mesura. Avui es pot dir que la interpretació subjectiva d’aquest col·lapse no és obligatòria i que existeixen interpretacions objectives que semblen plenament consistents. No és clar, però, que aquesta interpretació objectiva siga única; no obstant, almenys ens permet donar una resposta positiva a la primera pregunta. Quan s’especifica una propietat o s’arriba a una conclusió, la teoria quàntica només fa ús de fets ben establerts. La teoria no fa referència a cap cosa que tinga a veure amb la ment humana.

La definició de realisme no és tan clara, i l’autor d’aquest llibre assenyala acuradament que la realitat quàntica presenta dèficits ontològics. Parlar de realisme suposa una postura filosòfica, i no és clar que tot el món estiga d’acord en què vol dir que alguna cosa és real. És el contingut de les matemàtiques real i no merament un producte del raonament humà? A pesar de les dificultats que té definir el concepte de realisme, és clar que la mecànica quàntica hi imposa limitacions. En la discussió d’Einstein, Podolsky i Rosen podem canviar les propietats d’un sistema físic a través d’una acció que es

fa molt lluny sobre un altre sistema –i recordem que es fa quan els dos sistemes ja no interaccionen. És fins i tot probable que la ciència no tinga per missió dir què és la natura, sinó donar una representació de la realitat natural. La construcció de la ciència és associada a la filosofia en tant que parlem d'una teoria del coneixement capaç de descriure la natura. És cert que hi ha altres representacions de la realitat, com la religió, la filosofia o l'art. Però hi ha un aspecte distintiu, el mètode científic, que va permetre separar la ciència de la filosofia natural. No és tampoc evident establir tots els detalls d'aquesta metodologia, però la comunitat científica potser estaria d'acord a dir que: *a)* la realitat ha de ser explorada per l'experiment i establir fets, classificar propietats i trobar regularitats; *b)* cal trobar un esquema conceptual capaç d'englobar tots els fets coneguts i ordenar-los; *c)* l'esquema ha de predir nous fenòmens que són descrits de manera definida; *d)* les prediccions han de ser sotmeses a verificació experimental. Els apartats *a* i *d*, és a dir, els experiments, pertanyen a la pura realitat. Per contra, *b* i *c*, és a dir, la teoria, són probablement representacions de la realitat. En el cas de la mecànica quàntica, l'acord impressionant entre teoria i experiment diu que, probablement, la representació de la realitat proporcionada per la teoria és, potser, la més pròxima imaginable a la realitat de la natura. Com hem vist, hi ha limitacions per a establir descripcions ben definides d'un sistema quàntic correlacionat i, per tant, la natura no segueix el camí d'un filòsof realista extrem. La situació oposada al realisme és el positivisme, on la clau del coneixement és l'acord entre les consciències humanes. No sé si el fet que la mecànica quàntica continga alguns components de positivisme és el que ha mogut l'autor a invertir el problema i pretendre arribar a la consciència humana a partir de la mecànica quàntica. És aquest un pas endavant que serà interessant seguir. Alguns deixebles de Niels Bohr van argüir, en les albers de la teoria quàntica, la possibilitat d'explicar el lliure albir com a conseqüència de la realitat quàntica. Però han hagut desenvolupaments tan importants en temps recents sobre la fonamentació de la mecànica quàntica que fins i tot propostes antigues apareixen avui amb una nova força.

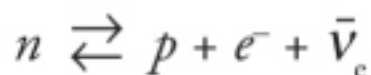
Parlant de la realitat de la natura, el llibre també discuteix els avanços recents de la cosmologia. Fins al segle XX, la descripció de l'Univers com un tot pertanyia als dominis de la religió o de la filosofia. El descobriment, en la dècada de 1920, del desplaçament al roig de la llum emesa per les galàxies i, en conseqüència, de l'expansió de l'Univers, va iniciar l'entrada de la cosmologia com a disciplina científica en disposar, a més a més, de la relativitat general d'Einstein per a descriure l'espai-temps. Però només en temps recents ha deixat de ser un parent pobre de la família de la ciència fonamental, caracteritzat per les paraules de Landau: «sempre errant, però no mai dubtant». Potser, avui, la cosmologia és la ciència més interessant, plena de misteris, problemes no resolts, fenòmens no albirats, etc. Molts són els factors que han contribuït a aquest canvi radical, i m'agradaria comentar-ne dos: 1) el desenvolupament de nous mètodes teòrics, presos de la física de partícules, en la descripció de l'Univers primordial; 2) les noves tècniques i dispositius observacionals que van, més enllà dels telescopis òptics convencionals, a la radiació electromagnètica de totes les longituds d'ona, a les ones gravitacionals, als neutrinos, als raigs còsmics de molt alta energia, etc. En contra de l'argument que diu que la gravitació atractiva hauria d'estar frenant-ne l'expansió, les últimes mesures sobre l'expansió de l'Univers ens diuen que la velocitat d'expansió està accelerant-se. Quin és l'origen de l'energia fosca responsable d'aquesta acceleració? En el moment actual estem en plena revolució cosmològica, i l'autor del llibre prepara el camí per especular sobre les raons de l'origen de l'Univers, que en els primers 10^{-45} segons després del Big Bang va estar regit per les lleis de la gravitació quàntica, encara desconegudes avui en la física fonamental. De l'Univers primordial tenim informació directa a través dels fòssils que ens han quedat d'aquella època: la radiació de fons de microones present a tot arreu i la proporció de nuclis atòmics lleugers sintetitzats en l'època del Big Bang.

Quan l'Univers, en l'expansió i en el refredament, va arribar a temperatures tan baixes que els electrons ja no podien escapar de la seua atracció elèctrica amb els protons, l'àtom d'hidrogen va ser format. Al mateix temps, la radiació electromagnètica es va desacoblar de la matèria pel fet que aquesta era neutra i va quedar per al futur com una radiació de fons. Aquest desacoblament va ocórrer

300.000 anys després del Big Bang, i la radiació, que conté informació detallada d'aquella època, és estudiada avui després de 14.000 milions d'anys. La mesura de les petites anisotropies de la radiació de fons permet obtenir els paràmetres cosmològics responsables de l'evolució de l'Univers amb molta precisió. A més d'una energia fosca que representa el 73 % del total, hi ha una matèria fosca també desconeguda que en representa el 23 %, i així queda tan sols una proporció del 4 % de matèria agregada del tipus conegut però, en gran part, encara no observada directament. El contingut total de matèria-energia proporciona una densitat crítica que prediu un Univers sense curvatura espacial.

Retrocedint en el temps, quan la temperatura de l'Univers donà als protons i neutrons energies típicament nuclears –és a dir, dels nuclis atòmics, amb valors cent mil vegades més grans que les energies atòmiques–, es van poder sintetitzar els nuclis lleugers. La presència avui d'aquests nuclis en l'Univers és un fòssil d'aquella època: la síntesi de nuclis lleugers només ve de l'Univers primitiu, quan aquest tenia un segon de vida. Contràriament al cas dels nuclis lleugers, els nuclis mitjans se sintetitzen avui a partir dels lleugers per reaccions de fusió nuclear en els estels, i els nuclis pesants, en els mecanismes de col·lapse i explosió de supernoves.

De les èpoques anteriors a un segon de vida es pot inferir informació sobre l'Univers a partir d'efectes molt subtils en les fluctuacions de temperatura que s'observen avui en la radiació de fons, però, sobretot, a partir de la física de partícules elementals desenvolupada en la segona meitat del segle XX. A 10^{-5} segons va tenir lloc una transició de fase en què els quarks de la matèria fonamental van quedar confinats en els hadrons, particularment protons i neutrons. La temperatura era encara suficientment alta per a mantenir una situació d'equilibri dinàmic entre protons i neutrons a través del procés d'interacció feble



Pròxima a l'època de la nucleosíntesi (~ 1 segon), aquest equilibri es va trencar, i els neutrons, o bé es van desintegrar o bé van formar part dels nuclis lleugers. Els neutrinos, que només tenen interaccions febles, es van desacoblar, i han quedat com una altra radiació de fons, aquesta de neutrinos. La detecció d'aquests és molt més difícil que la de microones abans comentada, i qui trobe un mètode apropiat per a descobrir-la i estudiar-la, té garantit el premi Nobel. Retrocedint més en el temps, la física de partícules elementals ens diu que, als 10^{-11} segons després del Big Bang, es va produir una altra transició de fase, aquesta electrofeble, en què la simetria de la interacció unificada es va trencar, els mediadors febles van desaparèixer i només van quedar, a més de les partícules de matèria, quarks i leptons, els fotons com a mediadors de la interacció electromagnètica. Del temps anterior als 10^{-11} segons no tenim encara informació a partir de la física de partícules; el nou projecte del CERN, amb la construcció de l'accelerador LHC, s'endinsarà en aquesta regió. Hi ha moltes propostes teòriques per a omplir la regió entre els 10^{-11} segons i els 10^{-45} segons de la gravetat quàntica, però manquen de verificació experimental. Pensem que, en termes d'energia, aquest interval arriba fins a una energia 100.000 bilions –milions de milions– de vegades més gran que l'energia avui explorada en la física de partícules. El professor Lapiedra utilitza la descripció de la realitat proporcionada per la mecànica quàntica per exposar mecanismes possibles sobre l'origen de l'Univers i els seus primers instants del Big Bang.

Bé, ha arribat el moment en què jo deixi de parlar i li passe el testimoni al professor Lapiedra. Com el lector comprovarà, el llibre representa un esforç considerable de l'autor per comunicar els conceptes quàntics en un nivell interpretatiu; però –com deia abans– també ha de ser considerat un assaig de teoria del coneixement; és a dir, d'aquest pont entre la filosofia i la ciència que aborda com la mecànica quàntica afecta les nocions d'objectivitat i realitat en la natura, la consciència humana, el lliure albir i, a més a més, l'origen de l'Univers. Gràcies, Ramon, per aquesta peça de reflexió

epistemològica i enhorabona! I, al lector, li desitge que gaudisca, pensant i raonant, del contingut del llibre com jo n'he gaudit.

JOSEP BERNABEU ALBEROLA

Universitat de València

València, juliol de 2003

1. La potencia negativa de 10 significa un nombre decimal on es troba un 1 en la posició indicada per l'exponent. Per exemple: $10^{-1}=0,1$; $10^{-2}=0,01$; etc.

Nota de l'autor a aquesta edició

Aquesta és la segona edició, corregida i augmentada en algunes qüestions cabdals, del llibre del mateix títol editat per primera vegada l'any 2004. Les novetats que conté aquesta edició no radiquen en els canvis que durant aquests darrers quinze anys s'haurien pogut acumular en el tema que es tracta, el tema dels fonaments de la mecànica quàntica i de les conseqüències epistemològiques que se'n deriven. En efecte, poques novetats substancials han aparegut en l'àrea de coneixement corresponent en aquest període de temps, si més no al meu parer i pel que en conec. Per això he renunciat d'entrada a fer una posada al dia de la bibliografia citada en la primera edició: les mancances substancials que intente superar en l'edició present no venen d'ací. Tot i això, he fet dues excepcions importants quant a l'absència de noves cites bibliogràfiques. La primera, un article de caràcter divulgatiu sobre tres experiments de l'any 2015 (Abellan, Amaya i Mitchell, 2016), tots tres tancant el *loophole* que encara quedava obert fins aleshores: l'escapatòria de l'exigència conjunta de localitat, per una banda, i de capacitat de detecció total o suficient, per una altra (veg. § 3.4). La segona, en el mateix epígraf 3.4, un article recent (2018) amb el títol «Challenging local realism with human choices», en què diversos subjectes humans separats per distàncies planetàries realitzen a l'atzar les tries consecutives de les diferents direccions de mesura de l'experiment, amb un intent d'evitar raonablement qualsevol correlació mútua indesitjable. Totes les referències bibliogràfiques apareixen ara al final del llibre.

Això aclarit, em referiré a les novetats de contingut introduïdes en aquesta segona edició.

Per començar, només iniciar el llibre he precisat la diferència entre realisme i determinisme, a fi de fer més entenedor tot el que es diu sobre els dos termes en la resta del llibre.

En segon lloc, he introduït un nou subepígraf (§ 2.2.5), substancial, amb el títol «L'experiment mental del gat de Shrödinger amb temps de vol diferents: consideració final», on es neutralitza un cert raonament contra el caràcter objectiu del col·lapse de la funció d'ona.

En tercer lloc, he avançat a l'epígraf 3.1 l'advertiment de l'existència d'una escapatòria fantàstica a fi de preservar el realisme, abans de comentar amb detall la qüestió en els epígrafs 3.4 i 3.5, i encara en les consideracions finals, on argumente perquè no crec que hauríem de validar aquest intent d'escapatòria.

En quart lloc, distingesc amb cura entre les desigualtats originals de Bell (veg. § 3.4) o les posteriors, dites desigualtats CHSH (veg. § 4.5), d'una banda, i les desigualtats de d'Espagnat (veg. § 3.5 i l'apèndix), d'altra banda. La violació de les unes o les altres desigualtats comporta el fracàs de tipus de realismes diferents: del realisme local, en els dos primers casos, o del realisme simultani, en el tercer cas.

Finalment, l'antic epígraf 4.5 ha estat completament reformulat i ha vist canviar el títol, que ara esdevé «Sistemes vius i mecànica quàntica: respostes aleatòries i desigualtats de Bell».

Naturalment, s'ha aprofitat l'avinentesa d'aquest canvis substancials per a introduir tot de petites correccions, la majoria lingüístiques o d'estil, a banda de les que comporta la consistència exigible d'un únic text final.

Per una altra banda, he preservat la nota de l'autor de la primera edició del llibre, amb els comentaris que s'hi fan sobre la naturalesa d'aquest i sobre algunes indicacions de lectura, i amb els

diversos agraïments a col·legues i amics, alguns dels quals ens han deixat un buit immens en haver faltat en aquests darrers anys.

Així mateix, he volgut mantenir el sucós pròleg del professor Josep Bernabeu a la primera edició, a qui vull agrair el permís que m'ha donat per a fer-ho, com també vull agrair al professor Armando Pérez el pròleg a aquesta segona edició i les abundoses, enriquidores i grates discussions que hem tingut en el darrers anys sobre els temes del llibre.

Encara vull agrair al professor Vicent Quilis una informació cosmològica substancial i al professor José M. Senovilla la lectura crítica que va fer, fa anys, de la primera edició. D'aquesta lectura es va derivar en particular una esmena puntual, però d'entitat, que he incorporat a l'actual capítol 5.

Abans d'acabar la nota, el meu agraïment als membres del Departament d'Astronomia i Astrofísica de la Universitat de València, Felicidad Pellicer i Enric Marco, per l'assistència informàtica, i a tot el Departament per l'acollida tan grata que sempre m'ha dispensat, abans i després del meu nomenament com a professor emèrit de la Universitat de València.

També al Servei de Publicacions de la Universitat de València i a qui, fins no fa gaire, en fou el director, el professor Josep Lluís Canet, el reconeixement per haver volgut atendre la meua proposta de publicar aquesta segona edició.

Finalment, el meu agraïment a Maite Simon, cap d'Edició, als correctors Elvira Iñigo i David Lluch, i encara a Inmaculada Mesa i Celso Hernández, per la professionalitat i l'amabilitat del tracte.

València, novembre de 2019

Nota de l'autor a la primera edició

El caràcter d'aquest llibre és el d'un assaig divulgatiu adreçat a qualsevol persona mínimament atenta i sensible als grans interrogants que ens han acompanyat des de sempre als humans; és també un llibre per a qualsevol filòsof, professional o *amateur*, atent a les vicissituds de la ciència, i encara per a un físic professional interessat en qüestions fonamentals de la física i del coneixement. Així doncs, he intentat que el to i els pressupòsits del discurs s'acomoden a un públic general, enllà de la colla restringida dels físics en actiu, encara que la consideració de la somera bibliografia que propose a la fi de cada capítol pugui fer semblar que determinades referències són innecessàriament especialitzades. És per això que voldria aprofitar aquesta nota per donar alguna indicació, evident d'altra banda, sobre com s'hauria de consultar aquella bibliografia: el lector amb pocs coneixements de física farà bé d'ignorar totes les referències més tècniques de revistes científiques i limitar-se a aquelles que són estrictament revistes de divulgació científica com és ara, per exemple, *Investigación y Ciencia*. Les referències que estan destinades a aquest lector són les de caràcter general que apareixen al final de la introducció o, també, amb el mateix caràcter, en la bibliografia d'altres capítols, generalment en forma de llibres.

No obstant això, com entre els destinataris d'aquest llibre es troben també els físics que prossegueixen, en un camp o en un altre de la física, una tasca investigadora, he volgut consignar igualment alguns llibres tècnics o alguns articles apareguts en revistes d'investigació en allò tocant a la mecànica quàntica i la cosmologia. Tot i així i pel que fa a aquests articles, sempre que he pogut he seleccionat aquells apareguts en revistes científiques un punt generalistes com *Physics Today*, *Nature*, *Science*, etc. En qualsevol cas, la bibliografia presentada és molt somera, i l'he citada sempre amb l'esperança de servir millor les necessitats informatives i de comprensió del lector sense acudir per sistema als treballs originals en cada tema. Això ha fet que, en alguns casos, haja citat referències molt modernes amb l'esperança que el lector interessat hi pugui trobar noves referències d'interès.

Encara tres indicacions per a una bona lectura del text:

1) En general, cada nou concepte introduït que necessita d'algun tipus de definició figura en cursiva en la primera aparició i, com a norma general, en lletra redona en aparicions ulteriors.

2) Molt freqüentment, el terme *mecànica quàntica* apareix abreujat com a MQ.

3) Un índex analític a la fi del llibre facilitarà al lector la localització en el text dels termes rellevants que li interessin en un moment donat.

No voldria acabar aquesta nota sense donar les gràcies a tots els col·legues que, amb els seus suggeriments i crítiques i amb les seues informacions, m'han ajudat en la redacció d'aquest llibre.

En primer lloc, al meu admirat col·lega, el professor Josep Bernabeu, qui no solament ha redactat el pròleg d'aquest llibre, sinó que n'ha fet una lectura atenta, plena d'observacions i crítiques impagables, que li vull agrair ací. També al professor Diego Sáez, que ha fet el mateix amb el capítol 5.

Al professor Guillermo García Alcaine, amb qui durant mesos he mantingut una intensa relació epistolar sobre fonaments de mecànica quàntica que ha estat per a mi d'allò més informativa i aclaridora.

Als professors Eliseu Borràs, Tolo Coll, Chus Martín, Josep Ros i Emilio Santos, amb qui he discutit sovint profitosament, ara i fa anys, sobre algunes de les qüestions d'interpretació de la mecànica quàntica i de qui he rebut indicacions bibliogràfiques valuoses. També al professor Paco Montes, a qui dec una lectura crítica d'alguns capítols del llibre i amb qui he prosseguit i prossegueix investigacions sobre algunes qüestions relacionades amb el contingut d'un d'aquests capítols. Finalment, he d'agraciar encara als professors Enric Casaban, Vicent Martínez Sancho, José Luis Sánchez Gómez, José Manuel Sánchez Ron i Toñi Sánchez Macarro altres indicacions bibliogràfiques útils per a la finalitat d'aquest llibre i al professor Quico Botella, l'amabilitat d'una visita guiada al laboratori docent de física quàntica de la Universitat de València.

Però, després d'haver gaudit del concurs crític de tants col·legues, els errors que encara puga contenir aquest llibre s'haurien d'atribuir únicament a la contumàcia de l'autor.

A un altre nivell, vull agrair a la meua universitat, la Universitat de València, l'any sabàtic que, dins del programa d'anys sabàtics que té la institució, em va concedir per al curs 2002-2003. Sense aquesta llicència el llibre no hauria vist la llum, o hauria tardat encara molt a veure-la. Que se'm permeta, doncs, expressar des d'ací la meua admiració per tots aquells col·legues que, sense cap any sabàtic, són capaços d'atendre les seues obligacions docents i investigadores ordinàries i alhora enllestir un llibre. I que se'm permeta, a punt d'acabar aquesta nota, donar les gràcies, mentre tre me'n congratule, a tots els meus companys i companyes del Departament d'Astronomia i Astrofísica per l'atmosfera plaent de treball i companyonia que hem sabut crear entre tots, pel regal abundós de discussions científiques enriquidores i per la paciència que m'han dispensat des de fa anys corregint la meua imperícia per a tractar amb els ordinadors.

Finalment, he d'agraciar a Dolors Sanchis, Lluís Miró i Celso Hernández, del Servei de Publicacions de la Universitat de València, la professionalitat i l'interès a l'hora d'editar aquest llibre.

València, setembre de 2003



Introducció

Déu veié que la llum era bona,
i separà la llum de les tenebres

Gènesi

Aquest llibre tracta de l'enigma de l'origen del món, un enigma que ha intrigat des de sempre els humans. Tracta, doncs, de la creació o, si es vol, de l'autocreació que aquest origen suposa. De la creació primordial i de la creació que persevera fins avui com una manifestació permanent, quotidiana fins i tot, de la pròpia naturalesa del món. El llibre s'ocupa alhora de dues qüestions, diguem-ne epistemològiques, més lligades que no sembla a l'enigma esmentat: per una banda, la qüestió del determinisme –això és, la qüestió de si tot en l'esdevenir natural i humà està prèviament determinat per uns antecedents– i, per una altra banda, la qüestió del realisme –això és, la qüestió de si hi ha una

realitat prèvia a l'experiència i independent d'aquesta, que en determinaria el resultat, l'experiència d'observar, mesurar o pensar aquella realitat.

A primera vista, el determinisme i el realisme així definits podrien semblar el mateix. En realitat, en el sentit més precís que donarem a aquests dos termes, el primer és més exigent que el segon. En efecte, mentre que en un llenguatge una mica més tècnic, el determinisme parlaria per definició de tota una trajectòria dinàmica determinada per unes condicions inicials úniques, el realisme deixaria la porta oberta a què, per exemple, la mesura pertorbés la suposada realitat preexistent de manera imprevisible. Amb això, l'antiga realitat perdria qualsevol caràcter predictiu en favor de la predictivitat lligada al coneixement d'una nova realitat que la mesura hauria produït.

Totes aquestes qüestions han estat objecte de reflexió filosòfica des de fa més de 2.000 anys, durant els quals han rebut uns tractaments i unes respostes d'allò més divers i, fins i tot, contradictori. D'altra banda, aquests desacords reiterats són més aviat comprensibles atesa la dificultat, o encara la impossibilitat, si més no fins fa ben poc, d'un contrast diriment amb l'experiència. En qualsevol cas, la voluntat d'aquest llibre no és la d'acumular més interrogants ni més confusió sobre uns problemes epistemològics tan permanents afegint-hi gratuïtament una nova versió d'aquells tractaments i respostes. Una versió que, si no fos tan nova, podria ser del tot innecessària en un camp d'intents de resposta tan espés i, per això, tan necessitat d'aclariment. Però, una versió que, encara que poguéssim adjudicar-li aquella novetat, no crec que fos un bon servei a la causa d'aquest aclariment si en la seua fonamentació, una vegada més, no atén més que a intuïcions i parers subjectius i poc contrastats. Dit en positiu, la voluntat d'aquest llibre és la d'encarar aquests problemes epistemològics mil·lenaris a partir d'allò que sabem avui de més bàsic sobre les propietats del món físic; és a dir, a partir d'aquesta teoria física que és la mecànica quàntica i de la seua interpretació, i de fer veure —o això espere— que una correcta interpretació d'aquesta disciplina física és capaç de dirimir de manera convincent dilemes epistemològics que s'havien mantingut indecidibles durant 2.500 anys.¹ Si al llarg d'aquestes pàgines he estat capaç de plasmar en actes convincents aquella voluntat d'aclariment en un camp del coneixement aclaparat per una confusió comprensible, el lector interessat ho jutjarà per si mateix. Em resta, però, l'esperança que el seu veredict final no siga essencialment negatiu.

En consonància amb tot això, diré en particular que l'origen de l'Univers com un tot planteja un problema singular de comprensió que ha estat un motiu recurrent de la reflexió humana. Un problema que podríem exposar en aquests termes: o bé l'Univers existeix des de sempre, o bé ha tingut un començament. Si és allò primer, això vol dir un nombre infinit d'esdeveniments lligats a aquella existència des de tota l'eternitat passada. Però, què vol dir un nombre *infinit* de fets esdevinguts? Té realment això algun sentit? Contràriament, si l'Univers ha tingut un començament, què hi havia abans? Si no hi havia res, d'on va eixir després tanta cosa com hi ha hagut i hi ha arreu del món? Però, si es pretén que de fet hi havia alguna cosa prèvia a aquell començament, caldrà concloure de seguida que ens havíem precipitat a l'hora d'anunciar-lo i que hem de remuntar-nos encara cap enrere a la recerca de l'origen de debò, de l'origen d'aquella cosa prèvia. Si comencem amb la qüestió del determinisme, que més endavant lligarem curt amb l'enigma de l'origen del món, cal dir que la qüestió ha estat encarada des de sempre amb una singular ambivalència: en oposició al «tot està escrit» o «és el destí», o encara al ferri encadenament de les causes i els seus efectes del pensament científic tradicional, fa el seu camí la vida personal i social basada, implícitament o explícita, en la responsabilitat, l'esforç personal i els fruits que se n'esperen, la moral, la llei i els tribunals, el juí i les sancions. ¿És tot açò un fantàstic malentés en què uns individus, en tot determinats, secreten de manera espúria i ineluctable la fantasia que fan i desfan des de la seua decisió irreductible i responsable mentre tot, en la seua vida personal i social, es desenvolupa segons el programa d'un pla prescrit? Segons un programa que ja conté l'autoengany i la falta d'advertiment dels seus executors, o encara si es vol la consciència més o menys explícita d'aquest destí, sense que això últim pugui canviar-hi res?

Potser, però, podríem separar en aquest punt la vida natural de la vida humana i pensar que és únicament en aquella on tot està determinat. Podríem pensar també que cada fet natural té els

seus antecedents, coneguts o ignots, tant se val, que el fan ineluctable, però que, en canvi, les nostres decisions s'apartarien d'aquest ferri encadenament causal per a acordar-se amb el nostre sentiment interior de llibertat i de responsabilitat i dotar, així, de sentit la moral, la llei i la punició.

Els científics naturals han tret un gran rendiment heurístic d'aquella tesi determinista segons la qual per a cada fet existeixen els antecedents, les causes, que el fan inevitable. Aquesta tesi els ha dut a la recerca d'aquests antecedents, i uns èxits nombrosos han resultat d'aquesta recerca. Uns èxits tan importants i nombrosos a l'hora de comprendre el món natural que han pogut donar lloc a la tesi, àmpliament compartida fins ben entrat el segle XX, que tot el que hi havia sota la capa del cel, exceptuant tal volta els humans o, potser, la vida en general, discorria d'una manera perfectament previsible en principi. Segons aquesta tesi, només ens caldria conèixer l'estat actual dels sistemes naturals, allò que se'n diu *les condicions inicials*, perquè poguéssim conèixer sense esmena l'evolució ulterior d'aquells sistemes. El fet que, en la pràctica, siga sovint tan difícil determinar exhaustivament les condicions inicials d'un sistema físic no canviaria en res la bondat epistemològica de l'opció feta: el món natural, en el seu esdevenir, estaria perfectament determinat i, en principi, hom podria plantejar-se l'objectiu de determinar més i més fiablement els antecedents que haurien fet ineluctable qualsevol esdeveniment.

Tanmateix, si d'aquest ferri encadenament causal es lliurés, per exemple, la vida conscient, quina podria ser-ne la raó? Quina podria ser la substància específica de què estaríem fets els humans que ens sostrauria a les forques caudines d'un determinisme que abastaria la resta del món? Estaríem, llavors, en presència d'un dualisme matèria-esperit, diguem-ho així, que li llevaria unitat a la nostra comprensió del món i que necessitaria més d'una explicació. Perquè, a mesura que avancem en la comprensió de la natura i del funcionament del nostre cos, i del nostre cervell en particular, no sembla que aparega res que no estiga descrit i regulat per les lleis i els supòsits últims de la química i la física. Però, si persistim en la hipòtesi de singularitzar la nostra vida anímica dins del món com un tot per alliberar-la d'un determinisme estricte, on caldria posar el límit? En l'estricta vida anímica de l'*Homo sapiens*, o podríem aventurar la hipòtesi que ens hi caldria incloure la de l'home de Neandertal? Què fer, llavors, amb la resta de la cadena dels nostres antecessors en la llarga evolució dels homínids? Potser caldria encara arribar als ximpanzés i a d'altres animals superiors? O bé, atabalats per tanta pregunta que no sabem com contestar, acabarem adjudicant a la vida en general la propietat d'escapar de la presó de la causació estricte?

Però avui estem molt lluny de l'*élan vital* i de les tesis vitalistes del segle XIX que esperaven posar de manifest un dia la substància vital específica que, més enllà de la química i la física, constituïria l'essència de la matèria viva com a tal. Com més avancem en la comprensió del funcionament íntim de la matèria viva, del codi genètic en particular, més reula la frontera que ens indicaria la presència d'una substància vital, la que siga, que se situaria enllà de la física i que, per ara, ni es veu enlloc ni portem traça d'albirar.

Així, al final d'aquesta indagació preliminar, estem tan lluny com abans d'imaginar-nos per què el nostre comportament humà podria romandre enllà d'un determinisme estricte que abastaria la resta del món natural, o una part substantiva d'aquest món. No és, doncs, gens estrany que, de vegades, renunciant a concertar un mínim de coherència amb la nostra assumpció pràctica de l'ètica i del seu sentit, alguns autors hagen adoptat en algun moment l'actitud radical d'un determinisme psicològic estricte; més endavant (§ 4.3) en donarem un exemple paradigmàtic.

Però ara és el moment de referir-nos, a títol introductori, a la segona qüestió epistemològica que hem esmentat adés: la qüestió del realisme, que conjuntament amb la qüestió del determinisme que també acabem de comentar, havíem lligat a l'enigma de l'origen de l'Univers. Com es veurà més endavant, la resposta a ambdues qüestions subministra de fet la base conceptual per a una comprensió de l'enigma. Això dit, la qüestió del realisme –ço és, la qüestió de si, més enllà de les nostres percepcions, encara podem parlar d'una altra realitat prèvia i predictòria que hi és al darrere de manera independent– gaudeix d'un passat venerable al llarg de la història de la reflexió filosòfica,

deixant a banda el fet que donar per descomptat l'existència d'aquesta realitat independent forma part de la nostra intuïció espontània, una intuïció no exempta, tanmateix, d'una certa perplexitat. «Ser és ser percebut», s'ha arribat a dir en aquella història, des del bisbe Berkeley fins al solipsista Stirner i a alguns filòsofs posteriors, tot passant altrament per Plató, per a qui la realitat habitual no era més que la pobra imatge del món de les idees.

Durant els últims 2.500 anys els debats sobre la qüestió del realisme no han deixat de succeir-se, fins i tot de repetir-se; però avui ha arribat el moment –o això pense– que el filòsof, el científic advertit i encara qualsevol persona amb un mínim de curiositat per les qüestions del coneixement, no ignoren per més temps el que aquesta teoria física que és la mecànica quàntica té a dir d'innovador sobre l'eterna qüestió del ser i la percepció. Perquè, des del 1964, any en què es publica l'article de John S. Bell sobre les seues famoses desigualtats i després des del 1982, any en què l'experiència, de la mà d'Alain Aspect, viola definitivament aquelles desigualtats i barra el pas a un realisme exhaustiu, la qüestió del ser i la percepció ja mai no podrà plantejar-se en els mateixos termes que fins aleshores: l'ontologia ha penetrat en el domini de la física, i una mena de *metafísica experimental* ha pujat des de llavors a l'escenari, segons tindrem ocasió de considerar en el capítol 3.

Caldrà, doncs, en començar aquest llibre, fer un breu resum d'allò més innovador que aporta la mecànica quàntica (MQ) sobre la realitat i el determinisme, quan ho comparem amb el que en diu la física clàssica i la nostra intuïció ordinària. Després faré una interpretació raonable de la MQ compatible amb el nucli d'allò que s'ha anomenat la interpretació *ortodoxa* de la teoria i criticaré explícitament algunes tesis particularment insòlites, reiteratives en aquest context, com són ara el que els especialistes coneixen com la *teoria dels diversos mons* o com *el col·lapse en la ment de l'observador*, unes tesis que el lector trobarà descrites en el capítol 2.

Amb tot això i des de l'indeterminisme quàntic, abordarem el possible indeterminisme de l'esdevenir macroscòpic i, des d'ací, la falta d'una causació exhaustiva en la vida anímica, en la vida en general i en la història per incidir finalment en l'enigma que anuncia el títol del llibre i que ja hem presentat en aquesta introducció: el problema de l'origen del món.

Com ja he avançat, el llibre té la vocació d'arribar a un públic tan ampli com siga possible, a qualsevol persona amb un mínim d'interès i de curiositat pels temes que s'hi tracten. Així doncs, he intentat defugir qualsevol tecnicisme innecessari en aquestes pàgines, i en particular en aquelles destinades a exposar els fonaments de la MQ, a fi que no hi haja més dificultats de comprensió que les que implica la naturalesa del tema que s'hi aborda. Unes dificultats, d'altra banda, sempre superables per a qui, guiat pel seu gust, estiga disposat, unes voltes, a rellegir allò que en una primera passada s'ha resistit a la comprensió i, unes altres, a tirar-hi endavant, lliure per a tornar enrere quan la destresa adquirida possibilita una nova lectura més fructífera del paràgraf problemàtic. D'acord amb tot açò, he reduït l'aparició de qualsevol fórmula tant com he pogut, i encara més del que la meua intuïció d'autor m'aconsellaria, en captar al telèfon l'esglai d'un editor quan vaig insinuar que, potser i malgrat tot, alguna fórmula elemental seria present en el text. Trobe, per cert, que hi ha un malentès en alguns dels lectors de llibres de divulgació científica quant a la presència de fórmules matemàtiques en aquest tipus de llibres. Un malentès que es tradueix sovint en una inhibició paralitzadora d'aquests lectors, una inhibició que faríem bé de desactivar. En efecte: sovint les fórmules matemàtiques resulten incomprensibles per al no especialista, no per una presumpta incapacitat d'aquest ni per cap raó abstrusa o de difícil enteniment, sinó simplement perquè els símbols que hi figuren no li han estat prèviament definits, al marge de si aquestes definicions són més o menys complicades per elles mateixes. Per això, quan aquests símbols són fàcilment definibles i les operacions que els relacionen són les ben conegudes pel públic en general, una fórmula matemàtica pot ser una manera concisa, entenedora i eficient de dir a aquest públic allò que, altrament, la prosa ordinària fa dispers, reiteratiu i prolix.

En qualsevol cas, en arribar aquí, el to de la dissertació que continua, i que espere que siga el pertinent, ja està decidit. No voldria defraudar les expectatives ni la curiositat del lector; això –es pot

ben creure— em resultaria frustrant, ja que, en la redacció d'aquest llibre, m'he esforçat tant com he pogut a fer-lo amè i engrescador. Només em resta ja convidar el lector curiós perquè iniciï aquesta singladura amb l'esperança que el viatge li resulte intel·lectualment excitant i plaent alhora.

El contingut del llibre es distribueix de la manera que segueix: en el capítol 1, al llarg de cinc epígrafs i de la mà de la MQ, exposem el més fonamental del que sabem avui sobre el comportament del món material, tot remarcant els punts on aquesta nova mecànica difereix de la física clàssica i on les seues previsions contrastades s'allunyen dels comportaments efectius del món de la nostra experiència ordinària. Així, comencem exposant el concepte de *funció d'ona* central en MQ; continuem amb les *relacions d'incertesa* i amb *l'experiència de la doble esclatxa*, per abordar posteriorment la noció d'*espín*, aliena a la física clàssica, i acabar considerant la *indiscernibilitat quàntica de les partícules idèntiques*.

En el capítol 2 abordem la qüestió de la interpretació del procés de mesura en MQ, un punt sobre el qual no hi ha encara un acord general de la comunitat científica del ram malgrat les nombroses confirmacions experimentals, d'una extrema precisió i sense excepció, que fins ara ha rebut la teoria quàntica. La qüestió és abordada mitjançant la consideració, en particular, de la famosa experiència imaginària dita del gat de Schrödinger, que des que va ser formulada fa més de huitanta anys, ha fet córrer veritables rius de tinta. Atesa la diversitat de parers que, com s'acaba de dir, estan presents en la comunitat científica en aquest domini de la teoria quàntica, la interpretació del procés de mesura que fem en aquest llibre no serà tal volta compartida per tots els físics actuals, però està d'acord amb el nucli dur del que podríem anomenar, amb una certa imprecisió, la interpretació ortodoxa de la teoria. En tot cas, aquest autor, al costat d'altres autors, la troba indefugible, com m'esforçaré a argumentar al llarg dels propers capítols.

El capítol 3 conté la formulació definitiva i raonada de les tesis bàsiques d'aquest llibre quant al realisme i el determinisme i des de les quals abordem després certes qüestions relatives a la vida, la consciència i la història en el capítol 4, i a la creació primordial en el capítol 5. En el capítol 3 presentem els experiments tipus Einstein-Podolsky-Rosen, també les desigualtats deduïdes per Bell per als resultats de mesura d'aquests experiments i la violació experimental d'aquestes desigualtats. Analitzem les implicacions d'aquesta violació per a la pervivència del *realisme local* i en mostrem la fallida; i, defugint l'extremisme d'un idealisme epistemològic radical, salvem allò que es pot dels mobles en assignar a la realitat física uns dèficits ontològics indefugibles que la redimeixen d'un descrèdit generalitzat innecessari.

Tornant al capítol final, el capítol 5, la descripció de la creació primigènia, és a dir, la descripció de l'autocreació del món, va precedida, per una banda, d'una descripció de l'Univers actual i, per una altra, del model que a hores d'ara sembla descriure'n millor l'evolució des de poc després dels seus orígens fins ara mateix. Aquest model, que rep el nom de *model del Big Bang*, ha de fer front a certes dificultats ben conegudes que exposem, alhora que exposem també l'intent de superar aquestes dificultats conegut com el *model inflacionari*, que corregeix i completa el model del Big Bang. A continuació fem referència a les darreres dades observacionals que donen suport a aquests models i a l'existència d'una *constant cosmològica*, fins fa ben poc purament hipotètica, i ens endinsem finalment, per acabar, en la peripècia de la creació primordial des de les fluctuacions de la mètrica de l'espai-temps que indueixen les fluctuacions quàntiques del buit.

Unes breus consideracions finals tanquen el llibre. Hi ha també consignat al final un apèndix perquè el lector interessat pugui trobar una demostració tècnica, encara que elemental, d'una de les diverses versions de les desigualtats de Bell; un apèndix que qualsevol lector pot ignorar sense que això suposés la renúncia a la comprensió d'allò essencial que s'exposa al llarg de totes aquestes pàgines.

1. Sobre història de la física en general, vegeu Holton i Brush (2001) i Newman (1969). Sobre història de la física quàntica, vegeu Sánchez Ron (2001).

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.