

Ramon Lapiedra

Els dèficits de la realitat i la creació del món

*2a edició
corregida i augmentada*



ELS DÈFICITS DE LA REALITAT
I LA CREACIÓ DEL MÓN

Ramon Lapidra

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: 978-84-9134-541-1

Dipòsit legal: V-1241-2020

Impressió: Podiprint

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, <i>per Armando Pérez Cañellas</i>	13
Pròleg a la primera edició, <i>per J. Bernabeu Alberola</i>	21
Nota de l'autor a aquesta edició.....	33
Nota de l'autor a la primera edició.....	37
Introducció	41
1. Què sabem de bàsic sobre la realitat física o la mecànica quàntica	51
1.1 La funció d'ona.....	51
1.2 Les relacions d'incertesa.....	62
1.3 La coherència dels estats i l'experiment de la doble esletxa.....	67
1.4 L'espín.....	78
1.5 La indiscernibilitat de les partícules idèntiques.....	85
2. El gat de Schrödinger i la interpretació del procés de mesura en mecànica quàntica	95
2.1 L'experiment mental del gat de Schrödinger.....	95
2.2 El col·lapse de la funció d'ona com a fet objectiu.....	100
2.2.1 <i>Encara el gat de Schrödinger</i>	100
2.2.2 <i>Les possibles raons d'una confusió</i>	109
2.2.3 <i>Col·lapse d'un sistema aïllat</i>	112
2.2.4 <i>Col·lapse sense amplificació macroscòpica? La resposta dels experiments</i>	114
2.2.5 <i>L'experiment mental del gat de Schrödinger amb temps de vol diferents: consideració final</i>	119
2.2.6 <i>A tall de resum</i>	122
2.2.7 <i>La interpretació dels diversos mons</i>	124
2.2.8 <i>La interpretació estadística de la mecànica quàntica</i>	128
2.2.9 <i>Els dos tipus de mesures en mecànica quàntica</i>	136
2.3 Decoherència i món macroscòpic.....	137
2.4 Del descrèdit als dèficits ontològics de la realitat quàntica..	145
3. La violació experimental de les desigualtats de Bell	153
3.1 Consideracions preliminars.....	153
3.2 L'experiment d'Einstein-Podolsky-Rosen.....	158

3.3	Discontinuitats quàntiques i propagació d'informació	169
3.4	Les desigualtats de Bell	175
3.5	Les desigualtats de d'Espagnat i altres dificultats per al realisme	188
4.	Consciència, realisme i mecànica quàntica	201
4.1	Matèria i consciència	201
4.2	Ordinadors i consciència	208
4.3	Determinisme psicològic i mecànica quàntica	216
4.4	La vida i la història	225
4.5	Sistemes vius i mecànica quàntica: respostes aleatòries i desigualtats de Bell	230
5.	La creació primigènia	241
5.1	Consideracions preliminars.....	241
5.2	L'Univers actual	244
5.3	El model del Big Bang. De la primera deumil·lèsima de segon a la recombinació de l'hidrogen	248
5.3.1	<i>Consideracions generals. L'aniquilació muó-antimuó.</i>	248
5.3.2	<i>El desacoblament dels neutrinos</i>	250
5.3.3	<i>L'aniquilació electró-positró</i>	251
5.3.4	<i>La síntesi de l'heli</i>	252
5.3.5	<i>La recombinació de l'hidrogen i el desacoblament matèria-radiació.....</i>	254
5.4	Abast i dificultats de la versió ordinària del model del Big Bang.....	258
5.4.1	<i>El problema de la planor</i>	260
5.4.2	<i>El problema de l'homogeneïtat global</i>	261
5.4.3	<i>El problema de les inhomogeneïtats locals observades .</i>	262
5.5	L'Univers inflacionari i la solució de les tres dificultats	263
5.6	Les dades observacionals i la determinació del model	266
5.7	Energia de l'Univers, creació i escuma quàntica	274
	Consideracions finals.....	283
	Apèndix. Demostració de les desigualtats de d'Espagnat.....	287
	Referències bibliogràfiques	293
	Índex analític.....	297
	Sobre l'autor	303

Pròleg a aquesta edició

La mecànica quàntica és, com s'explica en aquest llibre, un del 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 escapatòria per a la supervivència del realisme (òbviamment, 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 androïdes 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 Lapedra 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 Lapedra 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 Lapedra, 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



2560
FINE

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.

