

L'ÀTOM D'SCHRÖDINGER

Blai PIÉ i VALLS
Enric PÉREZ CANALS

Resum

El paper central d'Schrödinger en l'adveniment de la Mecànica Quàntica és àmpliament reconegut pel relat històric oficial. Menys conegudes són, però, les grans diferències que va mantenir amb el corrent majoritari de la física teòrica un cop establerta aquesta teoria. La seva lluita (1935-1961) es va centrar en revisar les bases de la teoria quàntica, posant un èmfasi especial en la interpretació. En aquest article elaborem un esquema històric dels arguments que va aportar, principalment en relació amb la qüestió de la constitució elemental de la matèria. Argumentem que les idees tardanes d'Schrödinger, sovint mal interpretades, poden aportar contingut útil a un debat encara vigent.

Paraules clau: Schrödinger, Mecànica Quàntica, atomisme, dualitat ona-corpúscle.

The Atom of Schrödinger

Abstract

The central role of Schrödinger in the birth of Quantum Mechanics is widely acknowledged by the official historical accounts. However, his refusal of the main stream in theoretical physics once the quantum theory was established is less known. His struggle (1935-1961) focused in revisiting the foundations of the quantum theory, with special stress on interpretation. In this paper we give a historical outline of his claims, specially with regard to the elementary constitution of matter. We argue that the latter ideas of Schrödinger, often misunderstood, can provide useful insight into a debate which is still alive.

Keywords: Schrödinger, Quantum Mechanics, Atomism, Wave-particle Duality.

Introducció

*Atomism in its latest form is called quantum mechanics.*¹

La figura d'Erwin Schrödinger és força coneguda, no tan sols en l'àmbit de la física, sinó més enllà de les fronteres de l'especialitat. És –recordem-ho– un dels pares fundadors de la moderna Mecànica Quàntica.² En particular, va formular la seva versió ondulatòria l'any 1926, de manera pràcticament simultània a l'aparició de la Mecànica Matricial de Werner Heisenberg.

El que no és tan conegut és el seu distanciament posterior de la visió ortodoxa, sovint referida com la «interpretació de Copenhaguen», atribuïda principalment a l'esmentat Heisenberg, però també a Niels Bohr i a Wolfgang Pauli.³ Tot i ser un dels principals artífexs de la Mecànica Quàntica, Schrödinger sempre va manifestar clarament el seu desacord amb la interpretació imperant. Així, el seu cas manté certes semblances amb el d'Einstein,⁴ que sempre va veure la nova teoria atòmica com un artefacte provisional. Però així com és ben conegut que Einstein va oposar-se obertament a les conseqüències de la Mecànica Quàntica durant dècades, malgrat ser un dels instigadors del seu naixement, no és tan conegut que Schrödinger va ser un dissident de la interpretació establerta a partir de finals de la dècada dels anys 20.⁵ Val a dir que, ja sigui explícitament o implícita, la imatge d'aquest Schrödinger dissident s'associa a una posició de fracàs, potser pel fet d'estar en el *bàndol perdedor* –és obvi que les idees d'Schrödinger han acabat vençudes pel corrent principal i no s'ensenyen més que com una curiositat històrica.⁶

L'estudi detallat del pensament d'Schrödinger mostra que la seva oposició no neix en els últims anys de la seva vida sinó, ben al contrari, al principi de les seves aportacions a la teoria quàntica. Pocs mesos després de publicar l'equació que porta el seu nom, el gener de 1926, les discussions entorn de la interpretació de la nounada Mecànica Quàntica –encara amb el nom dual de Mecànica Ondulatòria, d'una banda, i Mecànica Matricial, de l'altra– eren abundants i enceses. Dos anys més tard, però, la majoria

¹E. SCHRÖDINGER, 1950, p. 109.

²J.M. SÁNCHEZ RON, 2001.

³Amb el terme «interpretació ortodoxa» farem referència a la formulació axiomàtica de la Mecànica Quàntica que va acabar imposant-se en la majoria d'àmbits acadèmics i que ha perdurat fins als nostres dies; vegeu, per exemple, J. VON NEUMANN, 1955. En el que segueix evitarem expressament l'expressió «interpretació de Copenhaguen» pel fet de ser un terme equivòc, tal i com exposen D. HOWARD, 2004 i K. CAMILLERI, 2009, entre d'altres.

⁴Vegeu, per exemple, D. HOME i A. WHITAKER, 2007. També T. SAUER, 2013, p. 105.

⁵Per donar-ne només un exemple, vegeu què se'n diu (i què no) en l'apartat *Measurement and Interpretation* de B.H. BRANSDEN i C.J. JOACHAIN, 2000, p. 759-773.

⁶A R.B. LAUGHLIN, 2010, p. 60-68, hi trobem una breu exposició de la marginació que va patir Schrödinger durant les discussions dels anys 20, així com una possible interpretació de les causes d'aquesta marginació. Vegeu també Y. BEN-MENAHEM, 1989, M. BELLER, 1992 i M. BELLER, 1999, p. 36-39.

d'autoritats de la física teòrica havien signat una pau que intentava relegar aquestes discussions a un segon pla. Schrödinger no es va rebel·lar contra aquestes regles del joc, però mai no va acceptar sincerament la interpretació imperant, i no va ser fins anys més tard que va expressar les seves reserves. La poca transcendència del debat proposat per Schrödinger pot fer-nos plantejar si hem de considerar que va triomfar com a físic teòric, o si per contra és una figura emblemàtica caiguda en l'oblit. Un bon exemple de la mala interpretació històrica que ha patit la seva figura és la famosa *paradoxa del gat*, el conegut «gat d'Schrödinger». Aquest malaurat *Gedankenexperiment*, que Schrödinger va idear el 1935 com una crítica a certes interpretacions de la teoria quàntica, és sovint exposada com un giny de l'autor per exemplificar, precisament, l'intricat funcionament de la Mecànica Quàntica.⁷

En aquest article volem fer un breu repàs d'aquesta posició crítica d'Schrödinger, reivindicant-ne la vigència. En efecte, el debat sobre la interpretació de la Mecànica Quàntica no està, ni de bon tros, tancat.⁸ Abunden, en revistes científiques, discussions sobre la pertinència de plantejar quin és el significat dels objectes matemàtics de què consta la teoria quàntica.⁹ Encara són objecte de discussió qüestions aparentment tan fonamentals com: «Té la matèria una constitució discreta o contínua?». Tot i que existeix clarament un corrent principal de la física teòrica que considera aquestes qüestions sol·ventades, la resposta és lluny de ser única, fet que posa en dubte la completesa de la interpretació vigent. Alguns físics de reconeguda reputació han posat de manifest aquesta problemàtica recentment, però seria erroni considerar que aquestes manifestacions obren una via revisionista. Com bé expressa Robert B. Laughlin, «No existe, sin embargo, científico con una buena imagen de sí mismo que se ocupe abiertamente del significado de la mecánica cuántica, precisamente porque se supone que no es una ciencia».¹⁰

Pensem que molts dels temes i plantejaments que Schrödinger va desenvolupar –sovint sense donar-hi una resposta definitiva, i sovint sense pretendre-ho– encara avui tenen prou interès per donar-los a conèixer, o si més no, per deixar constància de la seva existència. Així, el nostre interès històric en el naixement de la Mecànica Quàntica, i en particular en la figura d'Schrödinger, alimenta el nostre interès en la discussió sobre els fonaments de la Mecànica Quàntica. I a l'inrevés.

⁷A R.B. LAUGHLIN, 2010, p. 70, hi trobem una exposició detallada d'aquesta mala interpretació, així com un recull de citacions (notes 35-39) d'articles –científics o no– que fan un mal ús del *gat d'Schrödinger*.

⁸Per exemple, a S. WEINBERG, 2012, Steven Weinberg comença l'article amb l'asseveració: «There is now in my opinion no entirely satisfactory interpretation of quantum mechanics».

⁹Vegeu, per exemple, N.G. VAN KAMPEN, 2008, R.C. HENRY, 2009, A. HOBSON, 2009, 2013a, SCIAMANDA, 2013, M.S. DE BIANCHI, 2013, M. NAUENBERG, 2013 i A. HOBSON, 2013b.

¹⁰R.B. LAUGHLIN, 2010, p. 72. Hem preferit deixar els fragments citats en l'idioma de la traducció que hem emprat, si es tracta de castellà o d'anglès. Només hem traduït al català els fragments que hem consultat directament de l'alemany. El mateix farem amb els títols dels llibres que esmentem: els escriurem en l'idioma de la versió consultada.

Hem dividit el nostre article en dos blocs. En el primer farem un dibuix de traç gruixut de la figura d'Schrödinger, posant un èmfasi especial en les seves tendències filosòfiques. En el segon, focalitzarem la nostra atenció en un dels aspectes que més li va interessar i sobre el qual Schrödinger més va escriure: la dicotomia ondulatori-discret.¹¹ En la interpretació ortodoxa, la dualitat ona-corpúscle ocupa un paper principal a l'hora de justificar teòricament certs resultats experimentals aparentment incompatibles, en què la natura es manifesta unes vegades ondulatòriament i d'altres vegades en forma corpuscular. Veurem com a Schrödinger aquesta solució li va semblar insuficient, i com va argumentar també contra una solució que es quedés només amb la part corpuscular o amb la part ondulatòria. Acabarem l'article analitzant la seva alternativa, allò que de vegades va anomenar la «partícula real».

Val a dir que la posició d'Schrödinger respecte de la Mecànica Quàntica es presenta considerablement invariable al llarg de la seva vida. Els primers articles de Mecànica Ondulatòria van ser escrits per un Schrödinger de 38 anys amb una llarga experiència laboral i personal, però sens dubte amb un rerefons molt diferent de l'Schrödinger consagrat¹² que, amb 50 i 60 anys d'edat, va escriure els articles amb més càrrega filosòfica. Malgrat aquest ventall temporal, Schrödinger es mostra ferm en les seves opinions i interpretacions de les teories físiques. Això ha fet possible la nostra metodologia de treball: estudiem la seva obra com un tot, intentant transmetre els caràcters més rellevants del seu pensament. Cal destacar que l'evolució d'Schrödinger en el decurs d'aquests anys és, més que conceptual, formal. D'una banda, l'Schrödinger jove dels anys 20 escassament s'atreveix a expressar les seves opinions filosòfiques;¹³ d'altra banda, l'Schrödinger d'edat avançada té un estil més refinat, amb extenses argumentacions i exemples, clarament orientats a intentar fer-se entendre. Sens dubte, és un Schrödinger que vol ser escoltat. És per això que busquem el posicionament d'Schrödinger precisament en aquest període més tardà, sense perjudici de fer incursions en textos anteriors per acabar d'entendre certs matisos de la imatge que intenta esbossar.

¹¹ Bàsicament, aquesta contraposició remet a la vella discussió de si la matèria es pot dividir o no infinitament. És sabut que l'àtom, malgrat el seu nom, s'ha dividit, però això no vol dir que no estigui fet d'uns constituents més elementals indivisibles, com poden ser els electrons, els quarks, etc. D'altra banda, la part ondulatòria de la contraposició cal associar-la a la continuïtat, a la possibilitat de dividir la matèria sense arribar mai a un primordi irreductible. En la secció 3.1 tornarem amb més detall sobre aquesta qüestió.

¹² Schrödinger va rebre el premi Nobel el 1933 (juntament amb Paul A.M. Dirac) «for the discovery of new productive forms of atomic theory». Posteriorment va rebre diversos premis i distincions, i va participar (i organitzar) en alguns esdeveniments de caire divulgatiu, fet que li valgué una considerable reputació en el món intel·lectual, especialment a Irlanda i a Àustria. Per a més detalls, podeu consultar W.J. MOORE, 1989.

¹³ En trobem un bon exemple en *La búsqueda del camino*, escrit de finals de 1925, però que no va publicar fins al 1961, poc abans de morir. Aquest text conforma la primera meitat d'E. SCHRÖDINGER, 1988.

El lector interessat en la figura d'Schrödinger pot adreçar-se a la biografia de Walter J. Moore,¹⁴ que considerem la més acurada. Altres obres especialitzades que són essencials per plasmar el pensament d'Schrödinger són, per exemple, *Erwin Schrödinger: philosophy and the birth of quantum mechanics*,¹⁵ i els treballs de Mara Beller,¹⁶ Michel Bitbol¹⁷ i Linda Wessels.¹⁸ Ocupa també un lloc destacat en la bibliografia secundària el llibre *Schrödinger's philosophy of quantum mechanics*,¹⁹ el qual presenta una anàlisi profunda del pensament d'Schrödinger. Malgrat que l'amplitud i la profunditat d'aquest llibre supera amb escreix els límits del nostre article, els matisos en l'enfocament ens permeten extreure'n algunes conclusions novedoses o, si més no, diferents.

En aquest sentit, l'estudi que hi ha darrere d'aquest article és de caire preliminar. Els documents (articles, llibres, conferències, correspondència) que han permès realitzar-lo comprenen un període que va des del 1925 fins a la mort del nostre autor, el 1961. Atesa l'amplitud temporal d'aquest període, no farem un seguiment exhaustiu de tots els documents consultats, sinó que comentarem amb més detall els que ens han semblat més significatius.

La lluita d'Schrödinger

*I am moving against the stream. But the tide will change.*²⁰

Schrödinger proposa reiteradament reobrir la discussió a l'entorn dels fonaments de la Mecànica Quàntica, especialment en els textos que va escriure després de la Segona Guerra Mundial. Abans, però, d'entrar en aquests detalls, volem comentar breument el seu interès per la filosofia i la teoria del coneixement en general, sempre amb un ull posat en la seva posició concreta respecte de la Mecànica Quàntica.

Responsabilitat filosòfica

L'atracció d'Schrödinger per la filosofia ressalta en el seu àmbit acadèmic natural: la física teòrica. Si bé no és l'únic personatge històricament destacat de la física amb inclinacions vers les qüestions més filosòfiques i, potser, menys pragmàtiques, cal

¹⁴W.J. MOORE, 1989.

¹⁵M. BITBOL i O. DARRIGOL, 1992.

¹⁶M. BELLER, 1999.

¹⁷M. BITBOL, 2007.

¹⁸L. WESSELS, 1979.

¹⁹M. BITBOL, 1996.

²⁰E. SCHRÖDINGER, 1955, p. 12.

remarcant la distància que el va separar de la majoria de col·legues acadèmics contemporanis.²¹

En la biografia de Moore trobem nombrosos exemples d'aquesta atracció d'Schrödinger vers la filosofia.²² Schrödinger mateix, a *Mi concepción del mundo* (1961), explica com de jove va estar a punt d'abandonar la física per dedicar-se exclusivament a l'estudi de la filosofia.²³ Aquí ens volem fixar, però, en el rol que Schrödinger atorga a la física dins el conjunt global del coneixement humà, així com la relació particular entre la física i la filosofia.

El clam filosòfic d'Schrödinger parteix d'un punt essencial: no esquivar qüestions fonamentals escudant-se darrere d'un calculisme pragmàtic. Fa una crida –adreçada als físics teòrics i, sobretot, als pares de la teoria quàntica– a afrontar la qüestió de la interpretació de la teoria, revisar-ne les bases i discutir-ne les conseqüències públicament, de manera que els *no-experts* també puguin tenir-hi lliure accés.

En aquest sentit, afirma que fins i tot l'elusió d'aquestes responsabilitats per part dels físics constitueix, en si mateixa, una posició filosòfica innegable i té com a conseqüència que moltes preguntes quedin sense resposta o amb respostes equivocades, mal interpretades. D'altra banda, fa referència a la interrelació inevitable que existeix entre disciplines, de manera que aquesta irresponsabilitat filosòfica pot tenir conseqüències molt més enllà de l'àmbit directe de la física.²⁴

En un sentit molt més profund, menys físic potser, Schrödinger es planteja també qüestions de la ciència en global. Fa una crítica a la creixent especialització –i separació– que estan patint la ciència i el coneixement en general.²⁵ En un ràpid recorregut històric, Schrödinger viatja fins als grecs mateixos per afirmar que hem de lluitar per recuperar un coneixement complet, talment com el dels filòsofs presocràtics. Així doncs, no tan sols reclama una reunificació de les diverses branques de la ciència, sinó que a més insta a reunificar la ciència –com a fruit de la raó pura– amb la religió o la mística.²⁶

Les seves exigències, però, queden sense resposta. Les poques reaccions que va suscitar negaven la necessitat de reobrir el debat, al·ludint al gran èxit de la teoria quàntica i a la preferència per afrontar nous problemes. Aquest rebuig s'entreu en el breu

²¹ No pretenem aquí analitzar el grau d'implicació filosòfica dels principals físics del segle xx, sinó simplement posar de manifest que Schrödinger va donar sempre més importància a les qüestions filosòfiques que els seus col·legues. Una altra excepció coneguda és Albert Einstein, amb una tendència comparable a la del nostre autor. Vegeu P.A. SCHILPP, 1969.

²² W.J. MOORE, 1989.

²³ E. SCHRÖDINGER, 1988, p. 16 i 137.

²⁴ E. SCHRÖDINGER, 1952b, p. 233-234.

²⁵ «[...] ¿cuál es, para usted, el valor de la ciencia? A lo que respondo: su objetivo, alcance y valor son los mismos que los de cualquier otra rama del saber humano. Pero ninguna de ellas por sí sola tiene ningún alcance o valor si no van unidas». E. SCHRÖDINGER, 1985, p. 14.

²⁶ E. SCHRÖDINGER, 1997, p. 17-37.

intercanvi d'articles que va mantenir amb Max Born a principis dels anys 50,²⁷ però sobretot en les paraules mateixes d'Schrödinger. Expressava aquest sentiment de solitud obertament, sense cap mena d'inhibició, en un article escrit per a un llibre commemoratiu dedicat a Louis de Broglie, el 1953: «The obvious retort would be: Can you do better, sir? Let me frankly avow that I cannot. Still I beg to plead that I am at the moment groping for my way almost single-handed, as against a host of clever people doing their best along the recognized lines of thought».²⁸

Dit en altres paraules: el món acadèmic s'havia oblidat d'aquestes qüestions, i gairebé només Schrödinger les jutjava prou rellevants per dedicar-hi els seus esforços. Einstein feia costat al nostre protagonista: tots dos es plantejaven la necessitat de reobrir el debat, malgrat que diferien profundament en les seves opinions particulars. En comunicacions privades, sovint el posaria com a únic aliat en aquesta lluita contra el corrent principal. Per exemple, en una carta que li va escriure el 1950: «[...] they prohibit our asking what really "is", that is, which state of affairs really occurs in the individual case, that the positivists succeed in making us settle for a kind of collective description. They accuse us of metaphysical heresy if we want to adhere to this "reality"».²⁹

Einstein respondria un mes més tard abraçant aquest camaraderisme:

You are the only contemporary physicist, besides Laue, who sees that one cannot get around the assumption of reality –if only one is honest. Most of them simply do not see what sort of risky game they are playing with reality –reality as something independent of what is experimentally established. [...] It is rather rough to see that we are still in the stage of our swaddling clothes, and it is not surprising that the fellows struggle against admitting it (even to themselves).³⁰

Optimisme epistemològic

Un altre aspecte que pot justificar la motivació d'Schrödinger a reobrir el debat sobre la interpretació de la Mecànica Quàntica és la seva posició epistemològica, que es pot expressar simplificadament com «podem explicar el món». Malgrat tenir una visió peculiar de la realitat en què vivim immersos, creia fermament en la nostra capacitat de

²⁷ E. SCHRÖDINGER, 1952b i 1952c i M. BORN, 1953. En la seva resposta, Born rebutja Schrödinger obviament les seves propostes i pràcticament tractant-lo d'incoherent. Posteriorment, Schrödinger esmenta aquests fets de passada en diverses ocasions, per exemple a E. SCHRÖDINGER, 1955, p. 14. Bitbol estudia amb més detall aquest intercanvi entre Schrödinger i Born a M. BITBOL, 1996, p. 3-8. Vegeu també M. BELLER, 1992, p. 299-303.

²⁸ E. SCHRÖDINGER, 1953b, p. 28.

²⁹ Carta d'Schrödinger a Einstein, 18 de novembre de 1950, K. PRZIBRAM, 1967, p. 37.

³⁰ Carta d'Einstein a Schrödinger, 22 de desembre de 1950, K. PRZIBRAM, 1967, p. 39-40.

conèixer aquesta realitat i descriure-la objectivament mitjançant models i relacions. En contraposició al que afirma el positivisme, aquestes relacions tenen adscrit un significat, una càrrega de valor. Aquest rebuig de Mach³¹ és una constant en els escrits filosòfics de l'última etapa acadèmica d'Schrödinger, però el trobem també, amb matisos, un quart de segle abans.³²

Fixant-nos en els escrits més tardans, veiem que utilitza aquest optimisme epistemològic per atacar frontalment la posició de la interpretació ortodoxa de la Mecànica Quàntica i les seves pretensions d'incontestabilitat. Per exemple, en els *Rencontres Internationales de Genève*, celebrats el 1952, va pronunciar una conferència titulada *La nostra imatge de la matèria*,³³ en la qual trobem al·lusions a aquest optimisme: «Physics stands at a grave crisis of ideas. In the face of this crisis, many maintain that no objective picture of reality is possible. However, the optimists among us (of whom I consider myself one) look upon this view as a philosophical extravagance born of despair».³⁴

Una altra prova contundent de la croada personal d'Schrödinger contra l'ortodòxia quàntica la trobem en un article escrit a finals de 1953, en què ataca sense embuts la formulació imperant.³⁵ Exposava simplificadament un model de funcionament de les teories físiques i la seva construcció a partir dels resultats experimentals i les mesures. Segons Schrödinger, en Mecànica Quàntica res no ens pot garantir la perfecta correspondència entre l'aparell de mesura que fem anar al laboratori i l'operador matemàtic que el representa sobre el paper.³⁶ És per això que anomena el formalisme quàntic «a scheme of the writing desk», això és, un pur formalisme teoricomatemàtic amb escassa correspondència amb la realitat experimental. I afegeix, encara, que la interpretació vigent ens empeny a fer preguntes sense sentit i a plantejar-nos metodologies de treball errònies, quedant així despullada de tot caràcter epistemològic.

La interpretació ortodoxa pretén salvar aquestes contradiccions prohibint-nos qualsevol pregunta més enllà d'un cert punt.³⁷ Dit en altres paraules: el conflicte es resol extirpant l'arrel del problema, però el constructe teòric restant no és més que un esquema buit, pràcticament tautològic. Negant-li aquest suport epistemològic, Schrödinger posa en dubte ni més ni menys que la seva validesa com a teoria física. Per a ell, això és

³¹ Sobre el positivisme de Mach, vegeu, per exemple, el capítol 12 de J.T. BLACKMORE, 1972.

³² E. SCHRÖDINGER, 1988, p. 19-20.

³³ E. SCHRÖDINGER, 2002; transcripció en anglès a E. SCHRÖDINGER, 1953a.

³⁴ E. SCHRÖDINGER, 1953a, p. 37-38.

³⁵ E. SCHRÖDINGER, 1955.

³⁶ *Ibid.*, 6-8.

³⁷ Un bon exemple d'aquesta crítica el trobem a E. SCHRÖDINGER, 1935; versió anglesa a J.A. WHEELER i W.H. ZUREK, p. 158: «We must go on to tell him [the experimenter] how far he could go if only he were clever enough. Otherwise it would be seriously feared that just there, where we forbid further questions, there might well still be something worth knowing that we might ask about».

inacceptable, tal i com exemplifica el següent fragment de *La naturaleza y los griegos* (publicat el 1954 però basat en unes conferències que va pronunciar el 1948), en què explica com cal actuar davant els buits cognitius en les teories científiques:

[...] la búsqueda honesta del conocimiento a menudo requiere permanecer en la ignorancia durante un periodo indefinido. En lugar de llenar los huecos por mera conjetura, la ciencia auténtica prefiere asumirlos; y no tanto por escrúpulos conscientes sobre la ilegitimidad de las mentiras como por la consideración de que, por fastidioso que sea el vacío, su superación mediante impostura elimina el imperativo de perseguir una respuesta admisible. La atención puede quedar tan distraída que la respuesta se nos escape incluso cuando la suerte nos la pone al alcance de la mano.³⁸

Totes aquestes discussions i crítiques neixen en darrera instància de la negativa d'Schrödinger a acceptar les limitacions imposades per la interpretació ortodoxa de la Mecànica Quàntica, ja que les considera una renúncia de nefastes conseqüències. Per això proposa, juntament amb aquest rebuig, una profunda revisió dels elements primitius de la nostra ontologia.

Què és la matèria?

No és fàcil escatir els complexos esquemes ontològics d'Schrödinger. Són escassos els escrits en què exposa obertament les seves reflexions més íntimes a l'entorn d'aquest tema: *Ciencia y humanismo* (1951),³⁹ *La naturaleza y los griegos* (1954)⁴⁰ i, especialment, *Mi concepción del mundo* (1961).⁴¹ De caire generalista, però, aquests escrits responen vagament a la nostra pregunta: què en pensava Schrödinger, de la constitució elemental de la matèria? Per trobar-ne la resposta necessitarem complementar aquests llibres amb alguns dels articles científics que va publicar al llarg de tota la seva trajectòria acadèmica, especialment els corresponents a les dècades de 1940 i 1950.

Rebuig parcial

La principal característica de les concepcions ontològiques d'Schrödinger és el seu rebuig del dualisme ontològic, és a dir, la dualitat ona-corpúscle. Aquesta concepció dual de la matèria és un dels pilars fonamentals de la interpretació ortodoxa, i pretén donar una explicació de resultats experimentals aparentment excloents: si bé en certes

³⁸ E. SCHRÖDINGER, 1997, p. 23.

³⁹ E. SCHRÖDINGER, 1985.

⁴⁰ E. SCHRÖDINGER, 1997.

⁴¹ E. SCHRÖDINGER, 1988.

condicions la matèria i la radiació mostren comportaments ondulatoris (patrons d'interferència; superposició de diversos estats), en altres condicions es manifesta corpuscularment (mesures localitzades quasi puntuals; discretització de la massa i la càrrega; transferència d'energia discontinua).

L'exemple paradigmàtic d'aquest comportament dual és, sens dubte, l'experiment de la doble esclatxa, o experiment de difracció. El muntatge experimental, descrit més fidedignament en altres textos,⁴² consisteix en un feix de llum (o partícules), una mostra i una pantalla, alineades d'una manera tal que la mostra es trobi en la trajectòria del feix. Per observar el fenomen ondulatori, la mostra emprada ha de tenir una estructura regular de dimensions comparables a la longitud d'ona associada al feix incident (per exemple, un material cristal·lí de dimensions adequades, o una barrera amb una obertura en forma de doble esclatxa). En incidir sobre aquesta mostra la llum o la matèria es comporten ondulatòriament, travessant les diverses obertures existents *simultàniament* i obeint a un fenomen d'interferència amb si mateixa. En incidir sobre la pantalla, doncs, esperem un patró d'interferència calculable segons les lleis ondulatòries, amb regions alternades que mostren màxims i mínims d'intensitat.

És precisament a la pantalla, però, on es posa de manifest el caràcter corpuscular. Si la pantalla disposa de sensibilitat (o resolució) suficient i el feix incident és prou feble, s'observa l'aparició successiva de punts ben localitzats. És a dir: malgrat que el feix incident travessa la mostra com si es tractés d'una ona, en incidir sobre la pantalla ho fa partícula a partícula, fent aparèixer paulatinament punts sobre la superfície de detecció.

A banda d'aquest experiment, utilitzat incansablement per exemplificar la dualitat ona-corpuscle, existeixen altres instàncies experimentals o teòriques que mostren o insinuen un comportament dualista. Ja a principis del segle XX trobem, per exemple, el càlcul de les fluctuacions de l'entropia associada a la radiació tèrmica d'un cos negre, de la mà d'un jove Einstein, que mostra un terme ondulatori i un de corpuscular en coexistència;⁴³ la modelització matemàtica d'un gas ideal en una cavitat com a ones estacionàries, feta pel mateix Schrödinger pocs mesos abans de la descoberta de la Mecànica Ondulatòria;⁴⁴ o, utilitzant resultats més recents, els fenòmens de *corral quàntic* i *miratge quàntic*.⁴⁵

Sense negar en cap moment les evidències experimentals, Schrödinger descarta una explicació basada en aquest dualisme pel fet que és excessivament simplista. De fet, fa un ús continuat de les observacions per argumentar els seus dubtes envers la dualitat:

⁴²Vegeu, per exemple, P.A. TIPLER i G. MOSCA, 2010, vol. 2, p. 1173-1202.

⁴³Vegeu L. NAVARRO, 2009, p. 121-133.

⁴⁴E. SCHRÖDINGER, 1926a.

⁴⁵M.F. CROMMIE *et al.*, 1993 i H.C. MANOHARAN *et al.*, 2000.

It is tempting to assign to the two rivals, the particle aspect and the wave aspect, full competences in the limiting cases of extreme «rarefaction» and extreme «crowding» respectively. This would separate them, as it were, with only some sort of transition required for the intermediate region. This idea is not entirely wrong, but it is also far from correct.⁴⁶

Schrödinger no tan sols rebutja la dualitat ona-partícula, sinó també la prevalència d'una de les opcions –corpuscles o ones– per sobre de l'altra. És a dir: ni dualitat, ni corpuscles, ni ones. La solució és un concepte nou, una revisió profunda dels nostres prejudicis filosòfics que suposi un trencament amb la tradició que ha alimentat la (pre-) concepció que tenim de la realitat. I traça els orígens d'aquestes preconcepcions fins a l'època dels grans filòsofs grecs, de qui hem heretat les bases mateixes del nostre pensament racional, i de manera indirecta però inevitable també alguns conceptes: «[...] [los rasgos fundamentales propios de la imagen del mundo que nos proporciona la ciencia de hoy] son fruto de un proceso histórico (y no de una necesidad lógica), siguiendo una pista que se remonta a los primeros estadios del pensamiento filosófico occidental».⁴⁷

Segons Schrödinger, un cop conscients d'aquests prejudicis, hem de deixar-los de banda per formular un nou concepte ontològic, partint d'una visió unitària de la realitat, *monista* podríem dir. Per a Schrödinger, la realitat és un contínuum inseparable, el mateix contínuum que alguns grecs trobaven incompreensible. La hipòtesi atomística –la discontinuïtat– és, segons ell, una recepta –«una arma defensiva»⁴⁸– per domesticar aquest contínuum inconcebible. Però no el fa més comprensible, sinó que ens permet continuar endavant sense enfrontar-nos a l'origen del problema:

Nuestra impotencia en lo que respecta al *continuum*, reflejada en las actuales dificultades de la teoría cuántica, no es una secuela, sino la comadrona del nacimiento de la ciencia y, si les parece, una comadrona diabólica como el hada decimotercera del cuento de la Bella Durmiente. Su mal de ojo ha sido exorcizado durante mucho tiempo con la genial invención del atomismo.⁴⁹

Així doncs, queda clar per què afirma que «Democritos of Abdera, not Max Planck, was the first quantum physicist».⁵⁰ Demòcrit va ser el primer a desafiar el contínuum, *trencant-lo* per poder-lo manipular.

⁴⁶ E. SCHRÖDINGER, 1950, p. 115.

⁴⁷ E. SCHRÖDINGER, 1997, p. 17.

⁴⁸ E. SCHRÖDINGER, 1985, p. 68.

⁴⁹ *Ibid.*, p. 71.

⁵⁰ E. SCHRÖDINGER, 1952c, p. 43.

La màxima amb què hem volgut encapçalar aquest article, «Atomism in its latest form is called quantum mechanics», encaixa perfectament amb aquesta visió de la Mecànica Quàntica com una extensió natural de l'atomisme grec portat fins a les últimes conseqüències: és reconegut que els primers científics moderns que hipotetitzen el caràcter atòmic de la constitució elemental de la matèria ho fan recollint el testimoni dels atomistes clàssics, malgrat els possibles matisos.⁵¹ Així, la hipòtesi atomista salta des dels primers filòsofs grecs fins a la ciència moderna, i aquesta hereta també el concepte (o la preconcepció) de corpuscle. Posteriorment, la seva empremta sobreviu a successius desenvolupaments teòrics i canvis de paradigma: la idea corpuscular apareix immutable dins de la Mecànica Analítica, la Mecànica Estadística o –inevitablement– la Mecànica Quàntica. Segons Schrödinger, tots els maldecaps associats a la Mecànica Quàntica són, doncs, històricament inevitables, i podem traçar-los en el naixement mateix de l'atomisme grec.

Fins aquí la renúncia. Vegem tot seguit per què l'hem qualificat de parcial. Naturalment, la primera pregunta que se'ns acut és: Schrödinger està proposant deixar de banda tots els resultats de la Mecànica Quàntica –o fins i tot, de la física moderna i, per què no, també de la clàssica– per abocar-nos a una cerca desesperada d'aquest nou concepte?

La resposta és rotundament negativa. Schrödinger pretén ser revolucionari, però fins a cert punt. En cap cas proposa que ens desfem de tots els resultats, de tota la maquinària de càlcul, de totes les teories.⁵² Al contrari, n'accepta l'existència i en proposa la preponderància, això sí, des d'un punt de vista purament pragmàtic i per respecte a la continuïtat històrica –de la qual som hereus. Però precisament per aquesta herència històrica, hem de ser fidels a les conseqüències dels nostres descobriments:⁵³ la Mecànica Quàntica ens mostra que els conceptes de corpuscle i ona no són suficients per explicar la realitat que se'ns fa manifesta a través dels resultats experimentals:

It is probably justified in requiring a transformation of the image of the real world as it has been constructed in the last 300 years, since the re-awakening of physics, based on the discovery of Galileo and Newton [...]. That worked out for a while. And now it seems to work no longer. One must therefore go back 300 years and reflect on how one could have proceeded differently at that time, and how the whole subsequent development would then be modified. No wonder that puts us into boundless confusion!⁵⁴

⁵¹ Vegeu, per exemple, R.E. SCHOFIELD, 1981, així com els capítols 5, 6 i 7 d'A. CHALMERS, 2009.

⁵² «Con esto no quiero decir que haya que tirar el atomismo por la borda. Sus inapreciables hallazgos [...] son logros imperecederos». E. SCHRÖDINGER, 1985, p. 71.

⁵³ E. SCHRÖDINGER, 1952a, p. 111.

⁵⁴ Carta d'Schrödinger a Einstein, 18 de novembre de 1950, K. PRZIBRAM, 1967, p. 38.

Aquest fragment d'una carta enviada a Einstein el novembre de 1950 mostra parcialment l'esperit revolucionari, de revisió, que Schrödinger ja havia expressat en les seves obres sobre els grecs.

Així doncs, un cop entès el caràcter revisionista de la proposta d'Schrödinger, es capgira l'argument i hem de passar a parlar, no pas d'una renúncia, sinó d'una reacceptació dels conceptes d'ona i corpuscle. Malgrat que aquesta argumentació pot semblar paradoxal, l'únic que pretén Schrödinger és recopilar tota la informació possible de dues aproximacions que, tot i ser incompletes, durant dècades o segles han resultat molt útils com a model de realitat física.

Artefactes provisionals: corpuscle

Schrödinger proclama l'èxit històric de l'*atomisme*: en primer lloc, pel triomf de la teoria cineticocorpuscular en el segle XIX, atorgant definitivament el rol de constituent elemental als corpuscles microscòpics; i en segon lloc, per la discretització dels estats quàntics, en el sentit que la peça elemental de la nostra imatge material continua associada a un concepte discret, més que no pas a un contínuum. O sigui, en termes més abstractes, al paper del límit en la descripció de la natura, l'existència de mínims, ja sigui de matèria o d'energia.

Si bé hom podria pensar que la teoria atomista dels Dalton, Boltzmann o Maxwell queda desqualificada per la teoria de de Broglie i la posterior confirmació de la dualitat ona-corpuscle per part de la Mecànica Quàntica, simultàniament apareixen en la teoria nous conceptes de discretització inel·ludibles. És per això que Schrödinger no dubta a mantenir l'*atomisme*, en aquest nou sentit, en una posició privilegiada: primerament amb els salts quàntics, i més endavant amb les excitacions del formalisme de segona quantització.⁵⁵ Aquesta darrera és l'única manifestació de la discretització que salva en última instància –i sempre amb reserves.⁵⁶ Així, l'*atomisme* entès com a discretització queda parcialment salvat per Schrödinger; però només parcialment, ja que és un fenomen emergent a partir d'alguna llei més fonamental.

I l'*atomisme* corpuscular? Fins i tot aquí Schrödinger acaba cedint, i sembla disposat a acceptar l'existència de corpuscles com una mera eina de càlcul:

In spite of everything we cannot completely banish the concepts of quantum jump and individual corpuscle from the vocabulary of physics. We still require them to describe many details of the structure of matter. How can one ever determine the weight of a carbon nucleus [...] without accepting for the time being the view that these particles are something quite concrete and real? This view is so much more convenient than the

⁵⁵ E. SCHRÖDINGER, 1952a i 1952b.

⁵⁶ E. SCHRÖDINGER, 1953b, p. 28.

roundabout consideration of wave trains that we cannot do without it, just as the chemist does not discard his valence-bond formulas, although he fully realizes that they represent a drastic simplification [...].⁵⁷

La comparació del corpuscle amb la valència química és de fet una metàfora recurrent:

The chemist used the valency stroke for building models of complicated molecules. It represented very real facts of observation. [...] The [subsequent] discoveries were illuminating to the chemist, indeed they removed some difficulties caused by interpreting the valency strokes too naively. But, of course, the valency strokes were retained as an extremely convenient shorthand.⁵⁸

Però, més enllà d'aquest ús pragmàtic, Schrödinger ens alerta reiteradament dels perills que això comporta: «We have taken over from previous theory the idea of a particle and all the technical language concerning it. This idea is inadequate. It constantly drives our mind to ask for information which has obviously no significance. Its imaginative structure exhibits features which are alien to the real particle».⁵⁹

Noteu la referència al concepte de «real particle». De seguida l'analtzarem. Quedem-nos encara un moment amb el corpuscle i tornem sobre les preguntes: d'on sorgeix la idea, per què és errònia? A *What is an Elementary Particle?*, de 1950, respon aquesta pregunta de manera detallada i extensa.⁶⁰ Per brevetat, només en citarem un fragment essencial:

If a familiar article, say an earthenware jug, disappears from your room, you are quite sure somebody must have taken it away. If after a time it reappears, you may doubt whether it really is the same one –breakable objects in such circumstances are often not. You may not be able to decide the issue, but you will have no doubt that the doubtful sameness has an indisputable meaning –that there is an unambiguous answer to your query.⁶¹

Aquest concepte de continuïtat temporal, d'identitat, de «sameness», és la característica essencial del corpuscle macroscòpic. I s'extrapola al món microscòpic: «Up to recently, atomists of all ages, for I know, had transferred that characteristic [individuali-

⁵⁷ E. SCHRÖDINGER, 1953a, p. 57.

⁵⁸ E. SCHRÖDINGER, 1952a, p. 119.

⁵⁹ E. SCHRÖDINGER, 1950, p. 111.

⁶⁰ Hi dedica tres seccions senceres: 6, 7 i 8. Per a una anàlisi detallada de les idees d'Schrödinger sobre la construcció del concepte d'objecte macroscòpic, vegeu M. BITBOL, 1992.

⁶¹ E. SCHRÖDINGER, 1950, p. 113.

ty] from visible and palpable pieces of matter to the atoms, which they could not see or touch or observe singly». I aquí rau l'error, ja que «the elementary particle is not an individual; it cannot be identified, it lacks “sameness”». ⁶² Això és el que han mostrat els experiments que han acabat provocant el naixement de la teoria quàntica: l'aproximació corpuscular mai no és exacta. Fins i tot en els casos en principi més favorables, tindrem efectes ondulatoris: «even an isolated particle, which gives us the illusion of transitory individuality, must yet not be likened to a classical particle». ⁶³

Artefactes provisionals: ona

L'altra cara de la dualitat ona-corpuscle és la visió ondulatoria de la realitat, la visió d'una matèria (o energia) infinitament divisible. En altres estudis historiogràfics ⁶⁴ trobem la imatge d'un Schrödinger purament continuista, per a qui l'ondulatoria pot explicar-ho tot. Si bé és cert que Schrödinger atorga innegablement més pes a l'ona que al corpuscle, creiem que aquesta conclusió és excessivament simplista i distorsiona el missatge final que volia transmetre. Val a dir que durant els anys de joventut, al voltant de la concepció de la Mecànica Ondulatoria el 1926, sí que trobem un Schrödinger convençut que el substrat de tota realitat material és purament ondulatori. ⁶⁵

Des de bon principi, però, va rebre nombroses crítiques, entre les quals són destacables la inevitable dispersió del paquet d'ones que substituiria –en aquesta visió– les partícules, i la impossibilitat de representar –visualitzar– aquestes ones. ⁶⁶ Una prova il·lustrativa i ben primerenca d'aquestes crítiques es pot trobar en els intercanvis de cartes que Schrödinger va mantenir arran dels articles fundacionals de la Mecànica Ondulatoria. El maig de 1926, per exemple, Hendrik A. Lorentz li escrivia una carta

⁶² E. SCHRÖDINGER, 1950, p. 109. A E. SCHRÖDINGER, 1952b, p. 241 ho exposa de manera similar: «[...] what a particle certainly is *not*: it is *not* a durable little thing with individuality».

⁶³ E. SCHRÖDINGER, 1950, p. 115.

⁶⁴ M. BELLER, 1992, M. BITBOL, 2007, L. WESSELS, 1979, p. 339.

⁶⁵ Entre els articles fundacionals de 1926 podem trobar moltes al·lusions a aquesta posició. Per exemple a E. SCHRÖDINGER, 1926b: «What I now categorically conjecture is the following: The true mechanical process is realised or represented in a fitting way by the wave processes in q -space, and not by the motion of image points in this space. The study of the motion of image points, which is the object of classical mechanics, is only an approximate treatment [...]». E. SCHRÖDINGER, 1982, p. 25.

⁶⁶ La funció matemàtica que representa el sistema (funció d'ona) es defineix mitjançant les variables canòniques, les quals habiten a l'espai de configuració. Sense entrar en detalls, el que aquí ens interessa destacar és que la dimensionalitat d'aquest espai depèn del nombre de graus de llibertat del sistema estudiat, és a dir, del nombre de partícules. Per exemple, un sistema d' N partícules es representa per un espai en $3N$ dimensions. En aquesta representació, no és possible fer-se una imatge del sistema. Malgrat que el corrent principal de la física denega entitat ontològica a aquesta representació, diversos filòsofs de la ciència proposen una interpretació realista de la Mecànica Quàntica que es fonamenta en la realitat d'aquest espai de configuració; aquesta discussió ha rebut recentment una atenció creixent. Vegeu A. NEY i D. ALBERT, 2013. Agraïm a un revisor anònim tant aquesta darrera puntualització com la cita que l'acompanya.

que contenia alhora felicitacions per la nova teoria i un llarg llistat de qüestions i crítiques.⁶⁷ El llistat de crítiques d'aquesta primera reacció a la Mecànica Ondulatòria ja conté les dues que hem esmentat.

Les respostes d'Schrödinger a aquesta pluja de crítiques són significatives per veure el seu aferrament a la idea ondulatòria. Per contrarestar la manca de visualització de la funció de l'ona que representa un sistema d' N partícules, proposa un mètode d'integració per reduir-la a N objectes tridimensionals.⁶⁸ I pel que fa a la dispersió del paquet d'ones, escriu un article⁶⁹ en què demostra la seva estabilitat per al cas de l'oscil·lador harmònic.⁷⁰

Que aquestes respostes d'Schrödinger no van dissipar els dubtes es reflecteix parcialment en la nova carta que Lorentz li va enviar aquell mateix any,⁷¹ però sobretot queda palès en el resultat final de les discussions històriques de 1927-28, de les quals podem considerar que sorgeix –malgrat la ferma oposició d'Schrödinger– gran part del que avui es considera la interpretació ortodoxa de la Mecànica Quàntica.

En pocs anys la voluntat d'Schrödinger és doblegada per les nombroses i reiteratives objeccions que rep, així com per la impossibilitat de rebatre-les amb contundència. Deixant-se portar pel corrent principal, a principis dels anys 30 sembla abandonar la defensa pública de la seva visió ondulatòria i acceptar parcialment la versió de Copenhagen-Göttingen.⁷²

Més endavant, ja en els anys 40, quan Schrödinger entra en l'etapa més reflexiva i filosòfica, trobem nous detalls de la seva visió particular del rol de l'ondulatòria com a teoria fonamental, tot i que aquesta perd l'exclusivitat i passa a conviure amb el corpuscle. Així, a *Are there quantum jumps?*, de 1952, desqualifica tant la idea d'«estat quàntic» com la de «salt quàntic».⁷³ Anteriorment hem comentat el crèdit històric que Schrödinger dona a aquests «salts quàntics» com a èxit temporal de l'atomisme. Ara la seva validesa queda descartada, i passen a ser un fenomen emergent a partir d'altres lleis –ondulatòries– més fonamentals: «Discreteness arises merely as a structure from the laws governing the phenomena»⁷⁴ De fet, continua rebutjant frontalment les interpretacions no realistes de les ones:

⁶⁷ Carta de Lorentz a Schrödinger, 27 de maig de 1926, K. PRZIBRAM, 1967, p. 43-54.

⁶⁸ Carta de Lorentz a Schrödinger, 6 de juny de 1926, *Ibid.*, 1967, p. 55-56.

⁶⁹ E. SCHRÖDINGER, 1926c.

⁷⁰ Aquesta solució particular no resolva la qüestió general, i Schrödinger ho sabia prou bé. K. PRZIBRAM, 1967, p. 59.

⁷¹ Carta de Lorentz a Schrödinger, 19 de juny de 1926, *Ibid.*, p. 67-75.

⁷² Així ho expressa en una carta a Planck en què després de rebutjar la interpretació probabilística de Born, acaba afegint: «Well, as God wills; I keep quiet. That is, if one really *must*, I too will get accustomed to such things». Carta d'Schrödinger a Planck, 4 de juliol de 1927, *Ibid.*, p. 20.

⁷³ E. SCHRÖDINGER, 1952b, p. 115.

⁷⁴ E. SCHRÖDINGER, 1953a, p. 52.

[...] no pattern of thought has yet been discovered to get on in these matters even one step without regarding the wave functions [...] as describing something real. Here «real» [...] means that the wave acts simultaneously throughout the whole region it covers, not either here or there. That would fail to account for the interference phenomena.⁷⁵

Així, tot i l'acceptació pragmàtica de la dualitat ona-corpúscle, sempre continua assignant a l'ona un pes més gran:⁷⁶ «It certainly seems easier to explain particle tracks in terms of waves than to explain the wave phenomenon in terms of corpuscles». Un altre exemple d'aquesta subjugació dels corpuscles a les ones el trobem en la idea que les lleis que governen les partícules neixen, precisament, de les ones, que per tant han de ser subjacents als corpuscles: «The mass and the charge of particles, defined with such precision, must then be counted among the structural elements determined by the wave laws».⁷⁷

Certament, els últims fragments citats semblen adscriure a les ones un paper fonamental, tot quedant els corpuscles relegats a «artefactes de càlcul». Allò que els falta als corpuscles per arribar a correspondre's amb la realitat, els ho haurien de donar les ones.⁷⁸ Però aquesta interpretació final tornaria a posar dempeus les crítiques contra l'ondulatòria que acabem de revisar breument, i considerem que Schrödinger ho tenia massa present per passar per alt unes qüestions de tan nefastes conseqüències.

La «partícula real»

Tal com ja hem esmentat de passada, Schrödinger mai no arriba a donar una solució concisa com a alternativa. Entre aquest batibull de crítiques i comentaris, s'hi entreu una interpretació original, una mena de preconcepció que empenyia Schrödinger a reobrir el debat i negar tota fe en el sistema establert. No hem pogut trobar cap referència en què l'autor expressés aquesta idea de manera formal, explícita, i per tant només en donarem una imatge difusa, borrosa; la mateixa que Schrödinger insinua en els seus escrits i conferències. Ara bé, ens hem volgut aventurar a reconstruir aquesta idea, la «partícula real», la qual prendrà certa forma a partir de fragments escampats per moltes de les obres que hem anat citant al llarg d'aquest article. Alguns ja han aparegut més amunt.

Recordem que la dualitat ona-corpúscle era parcialment acceptada per Schrödinger com un artefacte provisional, aproximat, però que al cap i a la fi no resolía el problema fonamental. Novament, el garant d'aquesta necessitat d'anar més enllà és el catàleg de

⁷⁵ E. SCHRÖDINGER, 1952b, p. 242.

⁷⁶ E. SCHRÖDINGER, 1953a, p. 56.

⁷⁷ *Ibid.*, p. 57.

⁷⁸ Aquesta conclusió, que es destil·la fàcilment dels fragments citats –i de molts més–, donaria suport als autors que adjudiquen una visió purament *ondulatòria* a Schrödinger, i que hem esmentat en la nota 64.

resultats experimentals: «A vast amount of experimental evidence clinches the conviction that wave characteristics and particle characteristics are never encountered singly, but always in a union; they form different aspects of the same phenomenon, and indeed of all physical phenomena. The union is not a loose or superficial one».⁷⁹

Així, acceptar separadament els dos aspectes (ona i corpuscle) i aplicar-los en cada cas segons les condicions no és una bona solució. Al contrari, hem de modificar tant l'ona com el corpuscle per adaptar-los mútuament i unir-los en el que Schrödinger anomena una «amalgama».⁸⁰ En altres instàncies aquesta «amalgama» rep el nom de «partícula real».

Malgrat que Schrödinger expressa de paraula la intenció d'unir –amalgamar– els conceptes d'ona i corpuscle, a la pràctica no planteja enlloc aquesta unió de manera formal. Hem de pensar, doncs, que més enllà de la idea conceptual, mai no va arribar a construir un objecte matemàtic concís d'aquesta unió. Així ho expressa en la conferència *La nostra imatge de la matèria*, de 1952: «Both the particle picture and the wave picture have truth value, and we cannot give up either one or the other. But we do not know how to combine them».

I tot seguit reconeix aquestes limitacions en el seu propi discurs: «I shall briefly sketch the connection [between wave and corpuscle]. But do not expect that a uniform, concrete picture will emerge before you; and do not blame the lack of success either on my ineptness in exposition or in your own denseness –nobody has yet succeeded».⁸¹

Aquest fragment és remarcable per tal d'entendre la posició i els arguments d'Schrödinger. Volem posar un doble èmfasi en la frase final: «nobody has yet succeeded», en primer lloc perquè justifica el que nosaltres hem volgut anomenar «la lluita d'Schrödinger», aquest intent de reobrir un debat que els físics teòrics de primera línia de l'època havien deixat enrere. En segon lloc, volem fixar-nos en una paraula molt significativa: «yet». Encara. Aquí Schrödinger deixa entreveure –sigui deliberadament o involuntària– les seves esperances de poder trobar aquesta resposta. És una manifestació més del seu optimisme epistemològic.

Des d'un punt de partida completament independent, centrat en la idea de corpuscle, proposa abandonar les aproximacions *excessives* que separen els corpuscles i la seva interacció. Si considerem les dues coses com una de sola, l'aproximació corpuscular deixa de tenir sentit, i així mateix deixa de tenir validesa el tractament purament ondulatori de la interacció:

⁷⁹ E. SCHRÖDINGER, 1950, p. 110.

⁸⁰ *Ibid.*

⁸¹ E. SCHRÖDINGER, 1953a, p. 54.

L'àtom mateix en moviment i l'energia-impuls que intercanvia quan interactua amb un altre són del mateix tipus. Ja no queda cap rastre de substància i accident, sinó que l'un és tan substancial i tan accidental com l'altre. Fins aquí la llei d'equivalència. I a través d'aquesta equivalència la llei quàntica es transforma en quelcom molt més general i que inclou com a cas particular l'estructura corpuscular de la matèria ordinària, com sovint se l'anomena. D'aquesta manera, de rebot, les porcions d'energia que abans només hem presentat vagament se'ns transformen en quelcom de familiar: ens aventurem a pensar-les com a partícules amb tanta, i tan poca, realitat com les partícules postulades originalment, de les quals en transporten els intercanvis energètics. La interacció s'ha reduït a un joc de pilota amb partícules.⁸²

Quan considerem alhora interacció i corpuscle, com un conjunt inseparable, ens estem acostant a la «partícula real». És com si el corpuscle *discretitzés* la interacció, alhora que aquesta interacció *ondularitza* el corpuscle: «Les dues idees fonamentals, la partícula i la seva interacció, a través de la seva unificació s'han contagiats l'una de l'altra; si d'una banda la interacció ha esdevingut atomitzada, d'altra banda les partícules s'han difós en una estructura de tipus camp».⁸³

Aquesta amalgama inseparable explicaria algunes de les característiques poc intuïtives que presenta la «partícula real».⁸⁴ La principal d'aquestes característiques és la manca d'identitat, fet que s'acostuma a explicar com un efecte quàntic. Per a Schrödinger no és tant una característica *extra* que apareix per efectes quàntics, sinó una característica sempre present que clàssicament ens havia passat per alt: «[...] the thing which has always been called a particle and, on the strength of habit, is still called by some such name is, whatever it may be, certainly *not* an individually identifiable entity».⁸⁵

En conclusió, la «partícula real» d'Schrödinger no és una solució última, sinó un intent d'obertura d'un debat que es va tancar massa aviat. La diferència entre la doctrina de la dualitat on-corpuscle i la «partícula real» que Schrödinger proposa entre línies no rau en cap característica en particular, sinó en la posició filosòfica que adopta el físic davant les llacunes de coneixement: tant la dualitat on-corpuscle com la «partícula real» prescriuen els comportaments corpuscular i ondulatori en els límits experimentals adequats; però mentre que la primera es presenta com la solució definitiva al problema de diferents observacions experimentals mútuament excloents, la segona es presenta en clau d'obertura, de revisió. Així, quan Schrödinger parla de «partícula real» no pretén

⁸² E. SCHRÖDINGER, 1948, p. 46.

⁸³ *Ibid.*

⁸⁴ Aquí cometem, conscientment, un petit abús de llenguatge: la «partícula real» de què parla Schrödinger no ens pot evocar cap intuïció ni preconcepció; per tant, les seves característiques són «poc intuïtives» només quan les comparem amb les expectatives que tindríem per a un corpuscle.

⁸⁵ E. SCHRÖDINGER, 1953b, p. 24. Sobre la revisió del concepte d'identitat que suposa la teoria quàntica, vegeu E. Pérez, 2012.

referir-se a cap solució concreta, sinó a la necessitat d'acceptar que la dualitat ona-corpuscle és un artefacte provisional amb un poder explicatiu limitat, i emprendre l'aventura cap a la cerca de nous conceptes ontològics que permetin explicar –i entendre– tot el ventall de resultats experimentals sense xocar frontalment amb la nostra intuïció o incórrer en contradiccions lògiques.

Val a dir que no hem trobat literatura secundària que reconegui explícitament l'existència d'aquesta «partícula real» en els textos d'Schrödinger. Ja hem anticipat que els treballs de Beller, Bitbol i Wessels⁸⁶ atorgaven a Schrödinger un model ontològic purament ondulatori. És d'especial interès el llibre de Bitbol, perquè és el que aprofundeix més en el pensament d'Schrödinger: en diversos fragments l'autor s'acosta a la idea de «partícula real» en les seves descripcions del pensament d'Schrödinger, però en totes acaba ometent la menció explícita d'aquest concepte, ja per si mateix prou elusiu.⁸⁷

Comentaris finals

El ràpid ascens de la que hem anomenat interpretació ortodoxa de la Mecànica Quàntica va afeblir les discussions i els debats de principis de la dècada de 1930, i va donar pràcticament per tancades les preguntes sobre els fonaments de la nova teoria. Aquesta prevalença va ser també una clara derrota per a Schrödinger, el qual va veure impossibilitats els seus intents de reobrir el debat un cop passada la Segona Guerra Mundial.

Schrödinger va mantenir una posició ferma i ben fonamentada al llarg de la seva vida acadèmica, raó per la qual considerem infundat el maltractament històric del qual és víctima. Creiem que l'heterodòxia que va caracteritzar la seva posició filosòfica no justifica el rebuig generalitzat que va rebre per part de la comunitat de físics teòrics, alguns dels quals eren amics amb qui mantenia una estreta relació personal. Pensem que, malauradament, la vigència de la seva crítica segurament explica l'actual desconeixement de les seves aportacions posteriors a la fundació de la Mecànica Ondulatòria. Historiogràficament i filosòfica, volem refermar la vigència de la posició d'Schrödinger. Les seves propostes, ja siguin de «partícula real» o de substrat fonamental ondulatori, van ser fetes en clau d'interrogant més que no pas com a respostes finals. Actualment es podrien readoptar i se'n podrien considerar les conseqüències, potser amb una visió ampliada gràcies a més de mig segle d'acumulació de coneixement experimental i desenvolupaments teòrics. Com hem suggerit, creiem que la resistència a aquesta reobertura prové de la inèrcia de la comunitat científica, especialment en l'àmbit de la física teòrica, que resta en general aliena a aquesta possibilitat tot perpetuant la mateixa ne-

⁸⁶ Vegeu la nota 64.

⁸⁷ M. БИТБОЛ, 1996, p. 55-56; p. 125; p. 265.

gativa que ja es va trobar Schrödinger en els anys 40 i 50. Des de l'àmbit de la filosofia aquestes qüestions sí que han ocupat una posició destacada en les discussions acadèmiques; ara bé, considerem que han tingut una influència baixa sobre l'opinió dominant en l'àmbit de la física, que es manté pràcticament inamovible.

En efecte, actualment és innegable l'hegemonia de la interpretació ortodoxa, malgrat que hem vist que –segons Schrödinger– deixa sense resoldre gran part de les qüestions més fonamentals de la física i de la filosofia. Així, concloem que la qüestió de l'atomisme –De què està fet el món? Què passaria si dividíssim la matèria en fragments cada vegada més i més petits? Arribaríem a un límit indivisible, o podríem continuar indefinidament?– resta encara avui oberta.

Tot i que el present article constitueix només una primera aproximació al pensament d'Schrödinger, l'estudi de la seva obra ens ha revelat un pensament complex, ple de matisos, que al nostre parer no es presenta amb total fidelitat en part de la literatura secundària consultada i citada; esperem que el present treball reflecteixi amb més precisió algunes d'aquestes peculiaritats oblidades de la filosofia d'Schrödinger.

I volem acabar citant un fragment privat,⁸⁸ escrit poc més d'un any abans de morir, en què Schrödinger expressa la seva sensació d'exclusió i aïllament, així com les justificacions del seu fracassat intent de reobrir el debat sobre els fonaments de la Mecànica Quàntica. Considerem que resumeix a la perfecció la motivació del nostre article:

With a very few exceptions (such as Einstein and Laue) all the rest of the theoretical physicists were unadulterated asses and I was the only sane person left ... The one great dilemma that ails us ... day and night is the wave-particle dilemma. In the last decade I have written quite a lot about it and have almost tired of doing so: just in my case the effect is null ... because most of my friendly (truly friendly) nearer colleagues (... theoretical physicists) ... have formed the opinion that I am –naturally enough– in love with «my» great success in life (*viz.*, wave mechanics) reaped at the time I still had all my wits at my command (1926 at the age of 39) and therefore, so they say, I insist upon the view that «all is waves». Old-age dotage closes my eyes towards the marvelous discovery of «complementarity» [Niels Bohr]. So unable is the good average theoretical physicist to believe that any sound person could refuse to accept the Kopenhagen oracle...

Agraïments

Volem deixar constància del nostre agraïment a Nemrod Carrasco, Blai Garolera i Guillermo García-Pérez per la lectura atenta d'una versió preliminar d'aquest article; els seus comentaris ens han estat de molta utilitat. També volem deixar constància que les observacions d'un revisor anònim han contribuït a millorar la versió final d'aquest text.

⁸⁸ Carta d'Schrödinger a John Synge, 9 de novembre de 1959, citada a W.J. Moore, 1989, p. 427.

Bibliografia

- M. BELLER, «Schrödinger's dialogue with Göttingen-Copenhagen physicists – 'quantum jumps' and realism». A: BITBOL i DARRIGOL (1992), p. 277-306.
- M. BELLER, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*. Chicago: The University of Chicago Press, 1999.
- Y. BEN-MENACHEM, «Struggling with causality: Schrödinger's case». *Studies in History and Philosophy of Science (Part A)*, 20, 1989, p. 307-334.
- M. BITBOL, «Esquisses, Forme et Totalité». A: BITBOL i DARRIGOL (1992), p. 41-79.
- , *Schrödinger's philosophy of quantum mechanics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- , «Schrödinger Against Particles and Quantum Jumps». A: EVANS i THORNDIKE (2007), p. 81-106.
- i O. DARRIGOL (eds.), *Erwin Schrödinger: philosophy and the birth of quantum mechanics*. Gif-sur-Yvette: Editions Frontieres, 1992.
- J.T. BLACKMORE, *Mach: His Work, Life, and Influence*. Berkeley: University of California Press, 1972.
- M. BORN, «The interpretation of quantum mechanics». *The British Journal for the Philosophy of Science*, 4, 1953, p. 95-106.
- B.H. BRANSDEN i C.J. JOACHAIN, *Quantum Mechanics*. Essex (Anglaterra): Pearson, 2000.
- K. CAMILLERI, «Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation». *Perspectives on Science*, 17 (1), 2009, p. 26-57.
- A. CHALMERS *The scientist's atom and the philosopher's stone*. Dordrecht: Springer, 2009.
- M.F. CROMMIE, C.P. LUTZ i D.M. EIGLER, «Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface». *Science*, 262 (5131), 1993, p. 218-220.
- M. S. DE BIANCHI, «Quantum fields are not fields; comment on "There are no particles, there are only fields," by Art Hobson [Am. J. Phys. 81(3), 211-223 (2013)]». *American Journal of Physics*, 81, 2013, p. 707.
- J. EVANS i A.S. THORNDIKE *Quantum Mechanics at the Crossroads*. Berlín: Springer, 2007.
- A. GEORGE (ed.), *Louis de Broglie, physicien et penseur*. París: Albin Michel, 1953.
- H.U. GUMBERTH *et al.*, *Mente y materia. ¿Qué es la vida? Sobre la vigencia de Erwin Schrödinger*. Madrid: Katz Editores, 2010. Traducció de: *Geist und Materie – Was ist Leben? Zur Aktualität von Erwin Schrödinger*. Frankfurt: Suhrkamp Verlag, 2008.
- R.C. HENRY, «The real scandal of quantum mechanics». *American Journal of Physics*, 77, 2009, p. 869-870.
- A. HOBSON, «Response to "The scandal of quantum mechanics", by N. G. van Kampen [Am. J. Phys. 76, 989-990 (2008)]». *American Journal of Physics*, 77, 2009, p. 293.
- , «There are no particles, there are only fields». *American Journal of Physics*, 81, 2013(a), p. 211.
- , «Response to M.S. Bianchi and M. Nauenberg». *American Journal of Physics*, 81, 2013(b), p. 709.
- D. HOME i A. WHITAKER, *Einstein's Struggles with Quantum Theory: A Reappraisal*. Nova York: Springer, 2007.
- D. HOWARD, «Who invented the "Copenhagen Interpretation"? A Study in Mythology». *Philosophy of Science*, 71, 2004, p. 669-682.
- R.B. LAUGHLIN, «El problema de Schrödinger: Lo que no se consideró lógicamente en todos sus aspectos cuando se creó la física cuántica». A: GUMBRECHT *et al.* (2010), p. 57-78.
- H.C. MANOHARAN, C.P. LUTZ i D.M. EIGLER, «Quantum mirages formed by coherent projection of electronic structure». *Nature*, 403, 2000, p. 512-515.
- W.J. MOORE, *Schrödinger, life and thought*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- M. NAUENBERG «Comment on "There are no particles, there are only fields," by Art Hobson [Am. J. Phys. 81(3), 211-223 (2013)]». *American Journal of Physics*, 81, 2013, p. 708.

- L. NAVARRO *Einstein, profeta y hereje*. Barcelona: Tusquets, 2009.
- A. NEY i D. ALBERT, *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- E. PÉREZ, «La identidad cuántica». A: J.M. URKIA (ed.): *Actas del XI Congreso de la SEHCYT. Palacio de Insausti (Azkoitia, Gipuzkoa), 8-10 septiembre 2011*, Sant Sebastià, 2012, p. 775-787.
- K. PRZIBRAM (ed.), *Letters on Wave Mechanics*. Nova York: Philosophical Library, 1967.
- J.M. SÁNCHEZ RON, *Historia de la física cuántica, I. El periodo fundacional*. Barcelona: Crítica, 2001.
- T. SAUER, «(How) Did Einstein Understand the EPR Paradox?». A: SAUER i WÜTHRICH (2013), p. 105.
- i A. WÜTHRICH (eds.), «New Vistas on Old Problems». *Max Planck Research Library for the History and Development of Knowledge*. Proceedings, 3. Berlín: Edition Open Access, 2013.
- P.A. SCHILPP (ed.), *Albert Einstein: philosopher-scientist*. La Salle (Illinois): Open Court, 1969.
- R.E. SCHOFIELD, «Atomism from Newton to Dalton». *American Journal of Physics*, 49, 1981, p. 211-216.
- E. SCHRÖDINGER, «Zur Einsteinschen Gastheorie». *Physikalische Zeitschrift*, 27, 1926 (a), p. 95-101.
- , «Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung)». *Annalen der Physik*, 384, 1926(b), p. 489-527. Traducció a l'anglès a: SCHRÖDINGER (1982), p. 13-40.
- , «Der stetige Übergang von der Mikro- zur Makromechanik». *Die Naturwissenschaften*, 14, 1926(c), p. 664-666. Traducció a l'anglès a: SCHRÖDINGER (1982), p. 41-44.
- , «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik». *Die Naturwissenschaften*, 23, 1935, p. 807-812, 823-828 i 844-849. Traducció a l'anglès a: J.A. WEEHLER i W.H. ZUREK (1983), p. 152-167.
- , «2400 Jahre Quantentheorie». *Annalen der Physik*, 438, 1948, p. 43-48.
- , «What is an Elementary Particle?». *Endeavour*, 9, 1950, p. 109-116.
- , «Are there Quantum Jumps? Part I». *The British Journal for the Philosophy of Science*, 3, 1952(a), p. 109-123.
- , «Are there Quantum Jumps? Part II». *The British Journal for the Philosophy of Science*, 3, 1952(b), p. 233-242.
- , *Statistical Thermodynamics*. Nova York: Dover, 1952(c).
- , «What is Matter?». *Scientific American*, 189, 1953, p. 52-57. Transcripció traduïda a l'anglès de SCHRÖDINGER (2002).
- , «The meaning of wave mechanics». A: GEORGE (1953), p. 16-32.
- , «The philosophy of experiment». *Il Nuovo Cimento*, 1, 1955, p. 5-15.
- , *Collected Papers on Wave Mechanics. Four Lectures on Wave Mechanics*. Nova York: Chelsea Publishing Company, 1982. Traducció de *Abhandlungen zur Wellenmechanik*. Leipzig: Barth, 1927 (3a edició) i reedició de *Four Lectures on Wave Mechanics*. Londres: Blackie and Son, 1928.
- , *Ciencia y humanismo*. Barcelona: Tusquets Editores, 1985. Traducció de *Science and Humanism*. Cambridge: Cambridge University Press, 1951.
- , *Mi concepción del mundo*. Barcelona: Tusquets Editores, 1988. Traducció de *Mein Leben, meine Weltansicht*. Viena: Verlag Zsolnay, 1985.
- , *La naturaleza y los griegos*. Barcelona: Tusquets Editores, 1997. Traducció de *Nature and the Greeks*. Cambridge: Cambridge University Press, 1954.
- , *Was ist materie?* Colònia: Supposé, 2002. Enregistrament sonor.
- R.J. SCIAMANDA, «There are no particles, and there are no fields». *American Journal of Physics*, 81, 2013, p. 645.
- P.A. TIPLER i G. MOSCA, *Física per a la ciència i la tecnologia*. Barcelona: Reverté, 2010.
- N.G. VAN KAMPEN, «The scandal of quantum mechanics». *American Journal of Physics*, 76, 2008, p. 989-990.

- J. VON NEUMANN, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Nova Jersey: Princeton University Press, 1955. Traducció de *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlín: Springer, 1932.
- J.A. WEEHLER i W.H. ZUREK, *Quantum theory and measurement*. Nova Jersey: Princeton University Press, 1983.
- S. WEINBERG, «Collapse of the State Vector». *Physical Review A*, 85, 2012, 062116.
- L. WESSELS, «Schrödinger's route to wave mechanics». *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 10, 1979, p. 311-340.

Blai PIÉ i VALLS
Universitat de Barcelona
blai.pie.valls@ub.edu

Enric PÉREZ CANALS
Universitat de Barcelona
enperez@ub.edu

Article rebut: 6 de febrer de 2014. Article acceptat: 8 de setembre de 2014.