

Schrödinger

La nueva mecánica ondulatoria y otros escritos

Edición de Juan Arana



CLASICOS DEL PENSAMIENTO

Erwin Schrödinger (premio Nobel de Física, 1933) no sólo ha sido uno de los científicos más relevantes del siglo XX, sino que siempre tuvo inquietudes filosóficas que le llevaron a reflexiones cuyo interés no ha decaído desde el momento en que fueron formuladas. Este libro recoge una selección de las muestras más significativas de su pensamiento, así como el texto de las conferencias del curso que impartió en Santander durante el verano de 1934, en la versión que realizó Xavier Zubiri, donde sintetiza los principales aspectos de la entonces recién descubierta teoría cuántica.

INTRODUCCIÓN

I. Erwin Schrödinger y la mecánica cuántica

1. EL TRASFONDO FILOSÓFICO

A fines de la segunda década del siglo XX, los creadores de la mecánica cuántica se vieron implicados en las discusiones filosóficas más intrincadas que se recuerdan en la física desde el nacimiento de la ciencia moderna. No es que tal tipo de controversias haya sido inusual en el campo de la investigación natural, pero normalmente se planteaban como preludio o como corolario al trabajo teórico o experimental propiamente dicho. Esta vez sin embargo surgió toda una corte de incómodas cuestiones en los momentos más cruciales del proceso que cabría llamar convencionalmente «científico», y es justo reconocer que los físicos supieron salir del atolladero con un pragmatismo y una eficacia envidiables, aunque muchas de las cuestiones de fondo quedaron, como es natural tratándose de científicos, aparcadas a un lado. La forma en que Niels Bohr y sus más próximos colaboradores resolvieron el contencioso despertó cierto malestar —un tipo de malestar que podríamos calificar de «filosófico»— entre bastantes colegas, pero la supervivencia contra viento y marea de la llamada «Interpretación de Copenhague», tras más de 70 años de críticas acerbas, demuestra que su planteamiento no era tan *naïf* como se presumía, y que la dificultad que de un modo tan poco convencional superaron no era ni mucho menos baladí. Lo

que sí es verdad es que la formación filosófica de Bohr, Heisenberg, Pauli, etc., era bastante somera; aunque tampoco sus oponentes, empezando por el propio Albert Einstein, estaban mejor pertrechados. No creo que haya que lamentarlo demasiado, porque sospecho que el bagaje al uso, adquirido en las facultades universitarias o leyendo a los clásicos, tal vez no hubiese sido de mucha ayuda: desde 1927 son incontables los filósofos y epistemólogos que han formulado sus propuestas y no parece que hayan conseguido ir mucho más lejos de lo que en un primer momento llegaron los físicos por sí solos. En todo caso, hay una excepción notable a la generalizada falta de formación específicamente filosófica en los creadores de la teoría. Erwin Schrödinger, que realizó una de las contribuciones más decisivas, no se limitó a echar mano de conocimientos filosóficos aprendidos en el bachillerato, a sazonar con consignas tomadas de la metafísica y la teología las convicciones que estaban en la base de su trabajo científico, o a improvisar juicios a partir de ideas espigadas en conversaciones, lecturas y meditaciones ocasionales, propias de los ratos de asueto. Tales pueden ser los casos de Heisenberg, Einstein o Bohr, pero desde luego, no el de Schrödinger. Por propia confesión sabemos que quiso ser poeta antes que científico, aunque desistió por la escasa rentabilidad de tal actividad: «La ciencia, en cambio, me ofreció una carrera»^[1].

En un esbozo autobiográfico realizado poco antes de morir confesó que en 1918, es decir, pocos años antes de los decisivos descubrimientos que le dieron fama, decidió aceptar un puesto de profesor de física sin perspectivas de investigación, porque «tenía la intención de dedicarme, en mi vida privada, más a la filosofía (hacía poco que había conocido con gran entusiasmo a Schopenhauer y a través de él la teoría unitaria de los Upanisads)»^[2]. La lista de los filósofos cuyo influjo ha reconocido comprende —además de Schopenhauer— Spinoza, Richard Semon, Mach y Avena-

rius^[3], lo cual concuerda con la idea de que la filosofía no era para él mero complemento de una formación cultural amplia, sino una actividad ejercida con pasión y con un grado muy fuerte de implicación personal. Esta orientación ni siquiera fue modificada por el hecho de ser distinguido con el premio Nobel. En general, las cuestiones interdisciplinarias ocuparon lo mejor de su tiempo, como refleja la intensa actividad preparatoria de conferencias públicas y libros de temática amplia, incluso de una intención a primera vista — aunque en el fondo no sea así— divulgativa. Más aún: hay que decir que la actitud de Schrödinger ante la ciencia es «filosófica» en sentido explícito, como él mismo afirma en su ensayo *Ciencia y humanismo*: «Parece claro y evidente, pero hay que decirlo: el saber aislado, conseguido por un grupo de especialistas en un campo limitado, no tiene ningún valor, únicamente su síntesis con el resto del saber, y esto en tanto que esta síntesis contribuya realmente a responder al interrogante “¿qué somos?”»^[4].

2. LA POLÉMICA SOBRE EL DETERMINISMO Y EL REALISMO OBJETIVISTA

Creo que no es necesario insistir más en el perfil filsofante de Schrödinger, así que abordaré sin más preámbulos la cuestión central de este trabajo, esto es, ¿cómo condicionó este trasfondo intelectual la postura que adoptó ante los enigmas filosóficos relacionados con la teoría cuántica? Podríamos agrupar éstos en dos grupos; primero, los que se refieren al tipo de conexión causal que se da entre los eventos naturales; segundo, los que tienen que ver con los límites de la inteligibilidad del mundo a partir de los fenómenos de la sensibilidad y los conceptos del entendimiento. En ambos casos Bohr y Einstein adoptaron posiciones opuestas: Einstein optó por el determinismo y por la tesis

de que la teoría física puede y debe reflejar la realidad misma de sus objetos, mientras que Bohr pensaba que la teoría física ha de conjugar conceptos lógicamente incompatibles y que para ello es preciso renunciar al determinismo y a la pretensión de un realismo *objetivista* o —por emplear un adjetivo con otras connotaciones— *ingenuo*. A veces se ha sugerido que el determinismo y el realismo objetivista están estrechamente entrelazados entre sí, y también que las preferencias de los restantes protagonistas de la discusión corresponden a alguna solución intermedia dentro de una escala gradual en cuyos extremos aparecerían los dos autores mencionados. Sin embargo, al menos por lo que se refiere a Schrödinger no es así y tal es el sentido de la anécdota según la cual, cuando se le preguntó a favor de cuál de los dos estaba, repuso que a favor de ambos. No es fácil encasillar su postura ni despacharla con un par de frases; por el contrario, se suele obtener una impresión ambigua al leer los escritos que a lo largo de los años fue publicando al respecto. Con todo, cabe hacer una primera constatación: aunque son muy claras las declaraciones desaprobatorias de la interpretación de Copenhague y de sus extrapolaciones filosófico-epistemológicas, Schrödinger estaba más apegado a la teoría cuántica que Einstein. Parece lógico, puesto que en una proporción apreciable se trataba de su propia criatura; pero también Einstein había hecho aportaciones cruciales a ella, a pesar de lo cual, y sin dejar de reconocer sus méritos, acabó por convencerse de que se trataba de una construcción provisional y que el progreso de la física pasaba por la superación no sólo de sus fórmulas, sino también de sus supuestos más fundamentales. Schrödinger nunca manifestó esta clase de rechazo, porque conservó siempre la esperanza de reconciliar la teoría misma con el ideal objetivista. Es en este sentido en el que se declaraba *optimista*:

Un dogma ampliamente aceptado afirma que no pueda ver un cuadro o objetivo de la realidad en ninguno de los sentidos en que antes se creía. Tan sólo los optimistas que hay entre nosotros (entre los cuales me cuento yo mismo) consideran esto como una extravagancia filosófica, como una medida desesperada tomada ante una gran crisis. Esperamos que lo vacilante de los conceptos y las opiniones sólo revele un violento proceso de transformación, que finalmente nos conducirá a algo mejor que el estéril formulismo que ha paralizado nuestra situación actual^[5].

Esto significa que para él sólo la interpretación de Bohr y Heisenberg constituiría una vía muerta, mientras que Einstein no estaba tan seguro de que fuese posible separarla de la formulación canónica de la teoría alcanzada en los años 1925-1927. El desarrollo posterior de los hechos ha reforzado esta segunda opinión, pero antes de sacar conclusiones conviene examinar las cosas por orden.

3. SCHRÖDINGER Y EL DETERMINISMO

Para empezar conviene advertir que Schrödinger no asimila como tantos otros el indeterminismo y la teoría cuántica, en primer lugar, porque *ya era indeterminista* en cierto sentido *antes* de que surgiera la tesis del indeterminismo cuántico y, en segundo lugar, porque la culminación de la teoría y sus propios descubrimientos dentro de ella supusieron para él una reconversión hacia el determinismo en varios aspectos relevantes. Hay que recordar que Schrödinger se formó intelectualmente en la escuela vienesa de física, que había estado sacudida por las discusiones entre Mach y Boltzmann, siendo paradójicamente deudor de ambos a la vez, del positivismo de uno y del realismo del otro^[6]. La naturaleza y alcance de la teoría física, y su relación con las cosas mismas habían suscitado profundas refle-

xiones por parte de las mentes más lúcidas de aquel entorno, de manera que llegó a cuestionarse el viejo dogma de que el determinismo es un presupuesto ontológico necesario para asentar el valor epistémico de las leyes científicas. La personalidad que llegó a conclusiones más claras a este respecto fue Franz Exner en 1919. Paul Forman ha estudiado esta aparente ola de «irracionalismo» que sacudió la ciencia centroeuropea inmediatamente después de la primera guerra mundial, e incluso ha llegado a ver en este indeterminismo «precuántico» un factor condicionante del que pocos años más tarde se estatuiría en la física^[7].

Lo cierto no obstante es que, salvando las motivaciones personales de cada cual así como la pregnancia del ambiente espiritual reinante, la crítica del determinismo de la física «clásica» descansaba en sólidas consideraciones lógicas y epistemológicas. Schrödinger se hizo eco de ellas en la lección que pronunció al tomar posesión de la cátedra de física en la Universidad de Zurich, el 9 de diciembre de 1922, titulada *¿Qué es una ley de la naturaleza?*, y en la que hace referencia explícita a Exner. Comienza con un análisis muy en la línea de Hume-Mach que pone de descubierto la debilidad de la relación causal desde el punto de vista lógico, análisis que también afecta a la creencia en la necesidad de las leyes naturales. Desmontada la suposición de necesidad apriórica, queda la evidencia fáctica de los éxitos cosechados por las presunciones de vínculos legales tan frecuentadas por los científicos. Si de hecho las leyes parecen estar ahí, si día tras día se refuerza la confianza que nos merecen, nada más natural que postular un *fundamento in re* para tales éxitos. La creencia en vínculos causales objetivos y universalmente necesarios es el postulado más utilizado, pero un examen atento de la evolución de la ciencia en el siglo XIX arroja como resultado que no es la *necesidad causalista*, sino el *azar acausal*, la fuente más fructífera y eficaz de nuevas leyes: «la investigación física ha de-

mostrado clara y definitivamente que el *azar* es, por lo menos en la abrumadora mayoría de los procesos naturales, la raíz de esa regularidad y de esa invariabilidad que nos han llevado a establecer el postulado de la causalidad universal, en vista de su estricto ajuste a las leyes»^[8]. La paradoja se explica teniendo en cuenta que la termodinámica y la mecánica estadística fueron las más preciadas conquistas de la ciencia en el tránsito del siglo XIX al XX, y que en estos ámbitos las leyes encontradas eran de naturaleza *estadística* y dependían de la existencia de distribuciones azarosas, indiscriminadas, en poblaciones numerosas de casos particulares. Es verdad que tales casos particulares se suponían a su vez sometidos a mecanismos deterministas. La confusión latente provenía de pensar que era legítimo, por ejemplo, sacar conclusiones sobre la presión ejercida por un gas, a partir de la suposición de que cada una de sus moléculas estaba regida por fuerzas mecánicas deterministas, y no de la hipótesis simplificadora según la cual hay tantas moviéndose en una determinada dirección como en cualquier otra. De modo implícito se asignaba al azar la simplificación y a la necesidad causal la legalidad resultante. Un análisis más meditado, al que se remite Schrödinger, muestra en cambio que tanto la simplificación de los términos del problema como las leyes en que desemboca su resolución *provienen de la misma fuente*, esto es, el azar, y que por lo tanto no hay que acudir a otra referencia ontológica que a él. Éste es el punto que, nobleza obliga, hay que atribuir a Exner:

Aunque hemos descubierto que las leyes físicas son de carácter estadístico, lo que no implica *necesariamente* la determinación estrictamente causal de los procesos moleculares individuales, sin embargo la opinión general es que, en realidad, descubriríamos que el proceso individual —por ejemplo, la colisión de dos moléculas de gas— está determinado por una rígida causalidad [...] Fue Franz Exner, un físico experimental, quien por primera vez, en 1919, con perfecta claridad filosófi-

ca, lanzó una crítica contra la manera como todo el mundo aceptaba, como *algo dado por sentado*, el determinismo absoluto de los procesos moleculares. Llegó a la conclusión de que aquello era ciertamente *posible*, pero de ninguna manera *necesario* y, examinado más de cerca, *ni siquiera muy probable*^[9].

Por consiguiente, las *leyes estadísticas* no son un subproducto de leyes basadas en el determinismo estricto de los casos individuales. Nada tienen que ver con una presentación resumida y poco detallada de éstas; poseen su propia especificidad y en último término son irreductibles, de forma que *lo problemático* es, curiosamente, que ambos tipos sean conciliables, que pueda haber una legalidad aplicable a los casos individuales por debajo de la que rige sobre los valores promedio. La pregunta pertinente es entonces, ¿por qué motivo seguir creyendo en el determinismo, cuando la ciencia esta siendo colonizada día a día por leyes de tipo estadístico? La respuesta de Schrödinger es fiel una vez más al espíritu de Hume:

¿De dónde ha salido la difundida creencia en que la conducta de las moléculas está determinada por una causalidad absoluta, y la convicción de que lo contrario es *inimaginable*? Simplemente, del hábito, heredado durante miles de años, de pensar *causalmente*, que hace parecer totalmente disparatada, *lógicamente absurda*, la idea de un sucedido indeterminado, de una absoluta casualidad *primaria*^[10].

Descontado este efecto, insistir en la presencia de una duplicidad de dinamismos legales actuando simultáneamente en dos niveles *sin interferencias mutuas* resulta poco verosímil, y *en definitiva es rechazable*:

No sólo falta toda consideración que pudiera *imponernos* esta suposición, sino que debemos ver claramente que semejante *dualidad en las leyes de la naturaleza* resulta sumamente im-

probable. De *un* lado estarían las leyes intrínsecas, genuinas, absolutas, del dominio infinitesimal; del *otro*, esa observada regularidad macroscópica de los acontecimientos que, en sus características más esenciales *no* se debe a la existencia de leyes absolutas sino que, antes bien, está determinada por el concepto del *número puro*, la más clara y simple creación de la mente humana^[11].

Schrödinger no duda más y al término de su alocución apuesta por una ciencia que en un próximo futuro se libere definitivamente del espectro del determinismo riguroso:

Yo prefiero creer que, una vez libres de nuestra enraizada predilección por la causalidad absoluta, lograremos superar estas dificultades, y no que, a la inversa, la teoría atómica —casi casualmente, diríamos— venga a comprobar el dogma de la causalidad^[12].

La teoría atómica se estaba desarrollando febrilmente durante aquellos años, y todavía era prematuro decidir si en definitiva iba a decantarse por el modelo epistémico de las leyes deterministas o estadísticas. En este sentido, Schrödinger no tuvo que aguardar a la formulación de las relaciones de indeterminación de Heisenberg para pronunciarse. Si hubiese que encuadrarlo dentro de algún grupo en estos momentos, sin duda estaría con los más revolucionarios, puesto que la conservación del principio causal riguroso era el punto en que se hacía fuerte la vieja guardia de la física, los Lorenz, Planck, Einstein, von Laue, etc.

4. LA MECÁNICA ONDULATORIA

Pasó algún tiempo y en Navidad de 1925^[13] Schrödinger descubrió la famosa ecuación que inmortalizaría su nombre y abriría paso a una segunda formulación matemá-

tica de la teoría cuántica, la *mecánica ondulatoria*, en una serie de cuatro memorables artículos publicados a lo largo de 1926^[14]. Dejando a un lado los detalles técnicos de esta contribución decisiva, hay varios aspectos destacables. En primer lugar es notorio que Schrödinger fue mucho más revolucionario en el fondo de las ideas que en la forma de la presentación. Ya hemos visto hasta dónde había llegado a alejarse de la filosofía característica de la física clásica. En cambio, su formación era bastante convencional. Con 38 años, no tenía mucho que ver con los imberbes que pululaban por Gotinga y Copenhague: sabía más física que ellos, pero se desenvolvía peor con los nuevos aparatos y las poco convencionales técnicas de cálculo que aquéllos manejaban —o inventaban— con tanta soltura. Como matemático era de lo más tradicional: dominaba las ecuaciones diferenciales —instrumento favorito de la física de *siempre*—, mientras que flojeaba en álgebra y teoría de grupos, los nuevos arsenales lógicos de la física^[15]. En consecuencia, su presentación de la teoría no tenía nada que ver con el álgebra matricial que Heisenberg se había sacado de la manga, sino con el pulcro y sosegado lenguaje de las ecuaciones en derivadas parciales, en perfecta simbiosis con los procesos pulidos y continuos que tanto tranquilizaban a los prohombres de la vieja escuela. Así se explica el entusiasmo que despertó en todos ellos, que pronto vieron en Schrödinger el candidato ideal para suceder a Planck en Berlín y poner de nuevo en orden las cosas en la física. Werner Heisenberg aporta una descripción del clima que se respiraba a raíz de estos descubrimientos al recordar una conferencia pronunciada por Schrödinger en la Universidad de Munich en el verano de 1926:

En la discusión que siguió propuse mis objeciones; especialmente me referí a que con la concepción de Schrödinger ni siquiera podía entenderse la ley de la radiación de Planck. Pero esta crítica mía no tuvo resultado alguno. Wilhelm Wien res-

pondió con agudeza que él comprendía, por un lado, mi pesar de que se acabara ya con la mecánica cuántica y de que no se necesitara hablar más de contrasentidos como los saltos de “quanta” y otras cosas semejantes; pero esperaba, por otro lado, que las dificultades señaladas por mí serían, si duda, solucionadas por Schrödinger en plazo breve. Schrödinger no estuvo tan seguro en su respuesta, pero también él pensaba que sólo era cuestión de tiempo el poder aclarar en su exacto sentido los problemas planteados por mí^[16].

Está claro que los miembros de la vieja generación vieron en Schrödinger un hombre que hablaba su propio idioma y tampoco hay dudas de que cifraron en él sus esperanzas de limpiar la física de las irritantes paradojas cuánticas^[17]. El propio interesado, tal vez disimulando un poco sus heréticas concepciones filosóficas, se dejó arrastrar por el entusiasmo de sus mentores y pareció promover una interpretación de su mecánica ondulatoria que confería algún tipo de realidad física fundamental a lo que su ecuación describía como una variación continua en el espacio y en el tiempo. El tema del determinismo —en el que se había mostrado tan audaz— pasó a segundo plano, y la discusión se centró en los modelos para la comprensión de la materia. Desde medio siglo atrás éste era uno de los puntos más candentes y discutidos. La contraposición entre atomismo y continuismo, las especulaciones acerca del éter electromagnético y más tarde la confrontación entre la materia ordinaria y los campos energéticos habían dejado indiferentes a muy pocos sabios de talla. El debate revistió particular virulencia en el contexto austríaco, con la pugna entre Mach y Boltzmann a que ya me he referido y que tanto influyó en Schrödinger. Más allá de los desconcertantes descubrimientos que dieron lugar a la física cuántica, la teoría matemática que éste consiguió desarrollar y tan bien cuadraba con los hechos, le ofrecía —al menos así lo creyó en un primer momento— la oportunidad de zanjar de una vez por

todas la cuestión de los modelos. Aunque pronto tuvo que desengañarse de ello, un resto de tales ilusiones perdura en su discurso de recepción del Premio Nobel en 1933, titulado *La idea fundamental de la mecánica ondulatoria*. Parte en ese texto de la evocación de los intentos para unificar los fenómenos de la luz y de la mecánica a partir de los principios de mínimos: el Principio de Fermat permite entender el comportamiento de la luz sobre la idea de que la luz sigue una trayectoria que le permite completar su recorrido en un tiempo mínimo. De forma hasta cierto punto análoga, Hamilton mostró cómo los movimientos reales de los cuerpos pueden entenderse bajo el precepto de que minimizan (en comparación con otros movimientos en principio posibles) no el tiempo transcurrido entre la salida y la llegada, sino una magnitud física muy particular, la acción^[18]. Un pequeño déficit de erudición histórica impidió a Schrödinger hacer aún más brillante su alegato, porque Maupertuis, autor del siglo XVIII, pensó que el principio de Fermat y el de mínima acción eran en realidad el mismo principio, aplicado ora a la luz, ora a la materia ordinaria. Con ello tendió por primera vez un puente entre la mecánica y lo que más tarde llegaría a ser la teoría electromagnética. Por desgracia, Maupertuis creía equivocadamente que la velocidad de la luz es mayor en los medios transparentes que en el vacío. Como no es así, la analogía de los dos principios es imperfecta y hasta cabría decir *opuesta*. La mecánica ondulatoria fue, sin embargo, capaz de recuperar y ahondar el paralelismo al generalizar la idea de Louis de Broglie de que tanto la materia ordinaria (en la que dominaba el modelo corpuscular), como las radiaciones electromagnéticas (generalmente imaginadas como «ondas») presentaban aspectos tanto «corpusculares» como «ondulatorios». De alguna manera quedó así asegurado el estrecho parentesco entre las dos grandes provincias de la física. El hecho de que tal hermanamiento fuese a costa de una cre-