

# GEOMETRÍA, BIOFÍSICA Y NEUROCIENCIA

## Sobre la naturaleza cuántica de la vida y la conciencia en la confluencia del pensamiento de Erwin Schrödinger y Hermann Weyl

MANUEL BÉJAR GALLEGO

Universidad Pontificia Comillas (Cátedra CTR), Madrid

**RESUMEN:** Los avances teóricos y experimentales en neurociencias proyectan una idea de la conciencia fuertemente arraigada en la naturaleza física. Sin embargo, la conciencia permanece enigmáticamente sin explicación científica. El fenómeno en sí es comúnmente reconocido, pero su definición y encuadre en los actuales marcos científicos son aún escurridizos. Consecuentemente, son numerosas y bien variadas las distintas tentativas que, cargadas de especulación e imaginación, buscan explicar la conciencia. En contrapartida, la búsqueda de una explicación de la conciencia desde el rigor científico es poco frecuente y limitada a un reducido grupo de investigadores que, conscientes de la relevancia de los datos experimentales neurocientíficos, trabajan por encontrar la conexión psicofísica entre la materia física y su actividad psíquica emergente. En este artículo desarrollamos ampliamente una síntesis fundamental contextualizada de las investigaciones fundamentales de dos genios de la ciencia en torno al problema de la relación mente-materia. Aunque rezagados en un cercano pasado, Erwin Schrödinger y Hermann Weyl son dos personalidades paradigmáticas por la seriedad metódica y amplitud de horizontes de investigación, que caracterizan el espíritu fuerte del científico. Sus estilos son recios, sus obras inspiran futuras investigaciones y sus conclusiones conectan con los últimos resultados fronterizos de las neurociencias y la física cuántica.

**PALABRAS CLAVE:** formalismo-intuicionismo, campo-geometría, causalidad-indeterminismo, biogénesis-conciencia, holismo-cuántica.

### *Geometry, biophysics, and neuroscience: On the quantum nature of life and consciousness in the confluence of the thoughts of Erwin Schrödinger and Hermann Weyl*

**ABSTRACT:** The new theoretical and experimental developments in neurosciences project an idea of consciousness deeply bound to the physical nature. Nevertheless, consciousness does enigmatically keep without scientific explanation. The phenomenon *per se* is commonly known, but its definition and position in the modern scientific frames are not well determined. Consequently, there are plenty different interpretations full of speculation and imagination. On the opposite side, the scientific consciousness research is not frequent and it is exclusively done by a reduced group of researchers that works on the psycho-physical connection between physical matter and its psychical emergent activity from the neuroscientific experimental data. In this paper we widely explain a fundamental contextualized synthesis of two scientific geniuses in the mind-matter relationship problem. Although they belong to a near past, Erwin Schrödinger and Hermann Weyl are both paradigmatic personalities because of their methodical rigor and widespread investigations, which characterize the strong scientific spirit. Their styles are stout, their works inspire future researches and their conclusions connect well with the last frontiers results in neurosciences and quantum physics.

**KEY WORDS:** formalism-intuitionism, field-geometry, causality-indeterminism, biogenesis-concioussness, holism-quantum.

Remontarse tan atrás en la historia de la ciencia, hasta los primeros desarrollos de la mecánica cuántica ondulatoria, puede poner en alerta al lector ante nues-

tro objetivo: contextualizar el pensamiento de Erwin Schrödinger y Hermann Weyl sobre la vida y la conciencia, en el marco actual de las neurociencias. Si bien es cierto que ambos son científicos de primera línea en física y matemáticas, resulta también natural cuestionar la necesidad de revivir aquel espíritu pasado de ideas sobre la vida y la conciencia, para orientar el futuro de las ciencias del cerebro y de la mente. Los más estrictos tomarán por superstición o —en el mejor de los casos— mera preferencia filosófica, nuestra propuesta de enlazar estas viejas concepciones mente-materia al torrente actual de producción científica. Es evidente que no es mejorable el análisis neurocientífico con la filosofía de estos autores. Tampoco puede pretenderse mejorar el detalle de los actuales desarrollos experimentales: el tiempo ha introducido un desfase técnico-científico insalvable. Sin embargo, el avance científico-técnico apenas se ha notado en la evolución de conceptos tan importantes como la naturaleza de la materia, la vida y la conciencia. El objetivo de este artículo es, precisamente, servir de nexo propedéutico entre la enorme reserva de nuevos conocimientos experimentales en biología-neurología y los fundamentos físico-matemáticos que Schrödinger y Weyl propusieron como base de una futura bioneurología cuántica. En última instancia, física y matemáticas soportan nuestra idea del mundo físico donde ha emergido la vida psíquica. Y, más allá de creencias desmedidas, es razonable buscar entre los pilares subyacentes un principio básico para explicar este embrollo de materia, vida y mente.

## 1. CONTEXTO MATEMÁTICO-CIENTÍFICO ENTRE 1900-1950

Dos descubrimientos al comienzo del siglo xx han modelado la interpretación científica de la naturaleza hasta nuestros días. El estilo de hacer ciencia y la elaboración filosófica de los conceptos científicos quedaron impregnados de un exitoso modo de proceder, que fue especialmente fructífero durante la década de los años veinte. La confirmación astronómica de la teoría gravitatoria de Einstein y el alcance explicativo de la teoría cuántica para entender el átomo, sustentaron los dos pilares actuales de la ciencia física: la Relatividad y la Teoría Cuántica de Campos. Estos modelos del macrocosmos y el microcosmos, respectivamente, fueron desarrollados en un mismo contexto cultural, político y geográfico.

El desarrollo científico no fue aséptico a las filosofías historicistas, nihilistas y existencialistas, ni a los conflictos bélicos europeos que atormentaron al centro neurálgico y geográfico de la ciencia europea. La ciencia alemana, en la vanguardia mundial, llegó a ser el bien máspreciado para un pueblo militarmente derrotado con una profunda crisis político-económica. Aunque en un nivel inferior, la desorbitada inflación económica afectó también a los científicos austríacos. Sin posibilidad de importar como consecuencia de una moneda devaluada y con necesidad de invertir en bienes para sortear la inflación diaria, la tecnología industrial alemana emergió espectacularmente, haciéndose con el

poder económico frente a un sistema bancario con el capital mermado por el préstamo. La industria alemana favoreció, pues, el avance científico y matemático de unos investigadores comprometidos con el progreso tecnológico-industrial.

El existencialismo dominante acusó a los positivistas de haber provocado la decadencia europea. Los físicos y matemáticos reaccionaron con disimulo para adaptarse a esta presión cultural. Mientras que en política exterior vendían el progreso científico-tecnológico de la mecánica industrial, se mostraban más diplomáticos ante un auditorio nacional criticando el mecanicismo. En consecuencia, se alzó un movimiento físico-matemático contra el principio de causalidad en la ciencia<sup>1</sup>. En ausencia de causalidad, quedaba vía libre para que el indeterminismo físico y el operacionalismo matemático tomaran las riendas del devenir cuántico en las teorías físicas. Filosóficamente, la ontología del ser quedó oculta tras un horizonte historicista-nihilista. En consecuencia, el proceso causal del ser fue sustituido por un devenir irracional que sólo dejaba al ente fenoménico del lado científico, donde todo se reduce a medidas y números. Sin duda, el lema *shut up and calculate* de la epistemológica más dura de la física, defendido por la escuela de Copenhague con Niels Böhr al frente, cosechó innegables y valiosísimos progresos científicos; pero olvidó el proceso mismo de formación del ser físico por considerarlo irracional.

Sin embargo, es nuestro objetivo rescatar en el tiempo este proceso dinamizador del ser para poder explicar un fenómeno evidente del mundo físico: la conciencia, un hecho que difícilmente puede encerrarse entre números y medidas, pero cuya naturaleza empieza a ser desvelada por las modernas neurociencias.

### 1.1. *La generalización Weyl de la geometría relativista del espacio-tiempo*

Como consecuencia de los incidentes de la Segunda Guerra Mundial, el principal centro mundial de actividad científica fue cruzando el Atlántico para trasladarse desde la Alemania nazi a los Estados Unidos de América. Albert Einstein es un ejemplo paradigmático de los aspectos personales del científico de la época (alemán, judío, emigrante) y de los intereses científicos profesionales (gravedad, electromagnetismo y teoría atómica). Su nueva teoría gravitacional, más general y precisa que las fuerzas a distancia newtonianas, dejaba en entredicho la validez de los *a priori* kantianos de espacio y tiempo. Los principios matemáticos de la física newtoniana y los prefijados principios geométricos de filosofía kantiana daban paso a una novedosa concepción dinámica y campal de la realidad. Así, espacio y tiempo perdían su significado individual en favor de una única entidad espacio-temporal de cuatro dimensiones, sensible al contenido de energía-materia y descrita por una alternativa a la geometría clásica euclidiana desarrollada por Riemann.

<sup>1</sup> Cf. SÁNCHEZ RON, J. M., *Historia de la física cuántica I. El período fundacional* (Crítica, Barcelona, 2001). Recogemos una selección de ideas del capítulo 10.

A partir de 1916, Einstein buscó con esfuerzo una teoría del campo unificado que sirviera de marco geométrico común para la interacción gravitatoria y electromagnética, las únicas conocidas hasta el momento. Debemos notar, pues, que en la antesala de una década cuántica que impulsó el reduccionismo operacionalista, el personaje más influyente del siglo xx pretendiera *geometriz*ar la física, partiendo de un fondo causal donde devienen y se determinan los fenómenos físicos<sup>2</sup>. En palabras de Einstein: «la mecánica cuántica obliga a que se la respete, pero una voz interior me dice que todavía no es la cosa real»<sup>3</sup>.

En la época del derrumbamiento de conceptos clásicos como el continuo de la materia o las formas *a priori* de espacio y tiempo, salvaguardar la verdad frente a los recios azotes del escepticismo suponía aferrarse con fuerza a la geometría. Hermann Weyl, uno de los más grandes matemáticos del siglo, demostró que la Relatividad General no permitía unificar la gravedad con el electromagnetismo en una única teoría unificada de campo. Fue el primero en percatarse de la importancia de la denominada conexión afín, que cumplía las mismas funciones que la conexión métrica riemanniana y, además, ofrecía una descripción geométrica del campo electromagnético. Al transportar un vector paralelo respecto a una conexión, su longitud depende del camino seguido y, por ello, es preciso introducir un conjunto de funciones que complementen al tensor métrico de la Relatividad. Como señala en su obra *Raum, Zeit, Materie* de 1918: «en una geometría de lo infinitamente pequeño no es posible utilizar comparaciones a distancia»; en otras palabras: «una dimensión de longitud sólo puede transferirse de un punto a otro infinitamente próximo»<sup>4</sup>. Si la geometría euclidiana sólo se mantiene en lo infinitamente pequeño, como asume la geometría de Riemann, es razonable pensar que las clásicas comparaciones geométricas sólo se mantengan infinitesimalmente. Por esta razón puramente matemática, generalizó los espacios de Riemann hasta purificar los últimos reductos de la geometría clásica euclidiana, y posteriormente, demostró que esta generalización permitía describir una teoría unificada de los dos campos físicos: gravedad y electromagnetismo surgían de la misma estructura métrica del universo.

La pretenciosa idea de unificar geoméricamente los campos físicos —especialmente la generalización Weyl— fue un factor determinante para el futuro científico de Einstein, pues configuró su principal labor investigadora en la madurez profesional. La teoría del campo unificado significaba poder conocer la naturaleza física de la materia y, además, describirla de forma continua, campal, sin saltos. El campo físico era para Einstein una entidad física autónoma, la verdadera identidad física que se manifiesta en su unidad campal. Hablar de la naturaleza física exige el lenguaje del campo físico. El concepto de campo en

<sup>2</sup> Cf. SÁNCHEZ RON, J. M., *Historia de la ciencia. Edad contemporánea* (Espasa Calpe, Madrid, 2008).

<sup>3</sup> Se trata de una manifestación a favor del realismo ontológico contenida en una carta a Max Born. Cf. EINSTEIN, A. - BORN, M. - BORN, H., *Correspondencia 1916-1955* (Siglo XXI, Madrid, 1999).

<sup>4</sup> Cf. WEYL, H., *Space, Time, Matter* (Dover Publications, New York, 1952).

la Relatividad radica en la misma estructura fundamental de la materia, el espacio-tiempo. El campo físico, descrito por el tensor métrico, determina la estructura espaciotemporal. En ausencia de campo, nada quedaría. No es ningún añadido, es la realidad misma que determina su estructura topológica<sup>5</sup>.

En consecuencia, la materia discreta debiera poder explicarse desde la dinámica global del mismo campo. En este marco conceptual, las partículas elementales serían un resultado fenomenológico de la ontología campal de la materia. Schrödinger supuso que las partículas son condensaciones del campo en regiones de alta densidad energética. La estructura del continuo, sujeta a leyes inherentes puramente geométricas, es la causa de la emergencia de pequeñas motas de materia a partir de la localización del tensor de energía-momento<sup>6</sup>.

El sueño romántico de desarrollar la teoría del campo unificado valió a Einstein el calificativo de ser el último físico clásico. Esta epistemología metafísica acerca de una ontología última, continua, à la Spinoza, contrasta con el frenético e imperante desarrollo extraordinario de una teoría de lo discreto que, metafísicamente cegada por los extraordinarios fenómenos físicos, explica exitosamente el régimen cuántico de la materia. A partir de 1925, las exigencias de la teoría cuántica colman la dedicación de una brillante generación de físicos. Uno de los principales, Erwin Schrödinger, retomará la idea del campo unificado e impulsará la empresa de los *caballeros del continuo*<sup>7</sup> desde el nuevo horizonte cuántico.

## 1.2. Más allá del proyecto Hilbert para la axiomatización de las ciencias

En su celeberrima conferencia sobre los 23 principales problemas matemáticos a tratar en el nuevo siglo<sup>8</sup>, pronunciada en París durante el segundo congreso internacional de matemáticas de 1900, Hilbert afirma que la mente humana se hace consciente de su independencia en el desarrollo de las disciplinas matemáticas. El rigor matemático no es enemigo de la simplicidad; al contrario, permite descubrir métodos más sencillos de prueba, que permiten a su vez indagar en los principios subyacentes a las ideas matemáticas y establecer así, un simple y completo sistema axiomático. Hilbert tenía la convicción de que el método axiomático podría resolver cualquier problema, aunque siempre tuvo en mente la cuestión de la suficiencia, completitud e independencia de los axiomas matemáticos. Deseaba la axiomatización de la física. Pensaba que unos pocos fenómenos fundamentales de la física deberían servir como base axiomática para derivar otros hechos físicos por el riguroso método de la deducción

<sup>5</sup> Cf. SÁNCHEZ RON, J. M., *El origen y desarrollo de la Relatividad* (Alianza Universal, Madrid, 1985).

<sup>6</sup> Cf. SCHRÖDINGER, E., *La estructura del espacio-tiempo* (Alianza Universal, Madrid, 1992).

<sup>7</sup> Así se refiere Werner Heisenberg en una carta a Pauli fechada el 4 de noviembre de 1926, para nombrar a los detractores de su filosofía acerca de la existencia de discontinuidades en los procesos físicos (colisiones, radiación...); entre los opositores destacan Einstein y Schrödinger.

<sup>8</sup> Cf. HILBERT, D., «Mathematical Problems», *Bull. Amer. Math. Soc.* 8 (1902) 437-479.

matemática. Desde luego, la propuesta de Hilbert no era el modo de trabajo habitual de los físicos. Por ello, con su carismática arrogancia intelectual, decía que «la física era demasiado dura para los físicos».

Con su publicación de 1912 sobre ecuaciones diferenciales, Hilbert había unido su trabajo matemático a la investigación en las ciencias físicas<sup>9</sup>. Comenzó trabajando sobre los fundamentos matemáticos de la teoría cinética, que describía estadísticamente las propiedades físicas (presión, densidad, temperatura...) de un número grande de moléculas de un gas. Aplicando el método axiomático y sus ecuaciones integrales consiguió conectar las distintas partes de la teoría física y unificarla como herramienta matemática, consiguiendo una comprensión más profunda de su estructura y alcance explicativo. Hilbert había reformado la matemáticas con sus *Fundamentos de geometría* de 1899. Ahora quería abordar la axiomatización de la física y después atacar otras ciencias. De la teoría cinética pasó a la axiomatización de teoría de la radiación, que también encajaba en sus presupuestos de ecuaciones integrales.

En los meses previos al desarrollo nuclear de la Relatividad General, Hilbert se dedicaba principalmente a la formulación matemática de los fundamentales problemas físicos de la materia: un puro quehacer matemático si exceptuásemos esa gran máquina de cálculo que los físicos llaman naturaleza. El trabajo de Einstein despertó gran interés en ese olimpo matemático que era la ciudad de Gotinga en 1915. Hilbert consiguió ligar en una teoría de base axiomática las ideas electrodinámicas de Gustav Mie sobre la materia, sustentadas por el principio de relatividad, con la geometría de la teoría gravitacional de Einstein, basada en las ideas matemáticas de Riemann.

Einstein y Hilbert publicaron resultados formalmente parecidos durante el decisivo mes de noviembre de 1915. En la búsqueda de las ecuaciones del campo gravitatorio relativista, confluían fenómenos físicos, como la precisión del perihelio de mercurio, y una hermenéutica matemática directriz caracterizada por el previo desarrollo geométrico de Gauss, Riemann, Ricci, Levi-Civita... La teoría de Hilbert pretendía abarcar el mundo físico sin referencia a la física. De acuerdo con la filosofía matemática de Hilbert y Minkowski, el puro método axiomático de las matemáticas bastaba para describir las leyes físicas de la naturaleza. Según Einstein, el método axiomático poco puede ayudar para encontrar una clave física de la realidad. En opinión del director del programa matemático de la Universidad de Gotinga, el venerable Felix Klein, la teoría de Einstein podía entenderse como una aplicación física de su programa geométrico de Erlangen<sup>10</sup>. Para Klein, la geometría se reducía al estudio de las invariancias en los grupos de transformación y, precisamente, Einstein había establecido los invariantes físicos bajo transformaciones espaciotemporales. En muchas de sus conferencias, Hilbert admitió que la gran idea de la geometría del campo gravitacional fue de Einstein, quien consiguió abstraer la esencia geométrica de la gravedad.

<sup>9</sup> Cf. REID, C., *Hilbert* (Springer, New York, 1970).

<sup>10</sup> El año 1872, en la Universidad de Erlangen, Klein desarrolló una definición formal de la geometría, tras el desarrollo de las alternativas euclidianas.

Tras el descubrimiento de las antinomias de Russell-Zermelo en la teoría de conjuntos se había generado una crisis en los fundamentos axiomáticos de Cantor y Frege para la teoría de conjuntos. Estas célebres antinomias surgen de la suposición de un conjunto normal que no es miembro de sí mismo, esto es, que no se contiene como elemento del conjunto. Por ejemplo, el singular conjunto de todos los conjuntos es un conjunto, pero el conjunto de todos los matemáticos no es, en conjunto, un matemático. Russell se preguntó si el conjunto de todos los conjuntos que no son miembros de sí mismos forma parte de sí mismo. Si no forma parte de sí mismo, entonces pertenece al tipo de conjuntos que no forman parte de sí mismos y, por tanto, es miembro de sí mismo. He aquí la paradoja: es miembro de sí mismo y no forma parte de sí mismo. El clásico ejemplo es el de un barbero que afeita sólo a todos los que no se afeitan a sí mismos. Si se afeitara por sí solo, se afeitaría a sí mismo y, por tanto, no cumpliría la condición del barbero que sólo afeita a quienes no se afeitan a sí mismos. Por el contrario, si no se afeitara a sí mismo, entonces sería el barbero de sí mismo por definición, y hemos visto que eso no está permitido.

Hilbert no encontró solución a estas paradojas —quizás por estar demasiado ocupado en la teoría de ecuaciones integrales y sus aplicaciones físicas— que dejaban en entredicho la validez absoluta del método axiomático. Otros grandes matemáticos como Russell en sus *Principia Mathematica* y Zermelo en sus *Fundamentos de la Teoría de Conjuntos*, desarrollaron teorías matemáticas alternativas que evitaran las paradojas de la teoría de conjuntos. Ninguna resolvió definitivamente el problema. El ideal de Hilbert, someter todo pensamiento científico al poder del método axiomático, quedaba empañado por un problema de fondo que afectaba a las propias raíces de la demostración matemática. Hilbert comenzó a sentirse alarmado por el avance de la concepción intuicionista de Brouwer entre los jóvenes matemáticos y, especialmente, por la creciente proximidad de Weyl a un intuicionismo moderado, más allá de su plan de axiomatización de las ciencias.

Hilbert siguió defendiendo la formalización axiomática, en contra de los intuicionistas para quienes los axiomas de la teoría de conjuntos no son verdades matemáticas absolutas. Las clarificadoras palabras de Weyl<sup>11</sup> son el manifiesto de su distanciamiento filosófico de Hilbert: «el laberinto de hechos experimentales a tener en cuenta por los físicos es demasiado amplio, su expansión demasiado rápida, su aspecto y peso relativo demasiado dinámico como para que el método axiomático pueda hallar una plataforma suficientemente bien equilibrada, excepto en el fondo de las partes más consolidadas del pensamiento físico». Y continúa: «hombres como Einstein o Böhr anduvieron a tientas en la oscuridad en búsqueda de los conceptos de la relatividad general y de la estructura atómica, a través de otro tipo de experiencia e imaginación distinta a la de los matemáticos». Finalmente, concluye: «aunque no hay duda de que las mate-

<sup>11</sup> Cf. WEYL, H., «David Hilbert and his mathematical work», *Bull. Amer. Math. Soc.* 50 (1944) 612-654.

máticas forman un ingrediente esencial». A nuestro modo de ver estas palabras son la mejor aproximación conceptual a la epistemología del intuicionismo moderado, referido anteriormente.

Y así fue, el sueño de Hilbert se desvaneció cuando conoció los resultados matemáticos de un joven matemático austríaco. Kurt Gödel demostró que no es posible probar la existencia de un conjunto completo y consistente de axiomas para todas las matemáticas. En contra de la pretensión de Hilbert, sus ingeniosos teoremas de incompletitud implican que las matemáticas no son íntegramente reducibles a un esquema de formalización matemática. Cualquier sistema axiomático consistente, capaz de describir la aritmética de los números naturales es incompleto. Esto es, existen proposiciones verdades indemostrables en el sistema formal dado. Ninguno de los sistemas axiomáticos, como los de Russell y Zermelo, son suficientemente completos para poder decidir todas las cuestiones matemáticas expresables en el propio sistema, es decir, formalmente existen proposiciones indecibles. Si el sistema fuese completo, entonces sería inconsistente porque sería posible afirmar todas las verdades del sistema y alguna falsedad que introduce la inconsistencia. Por tanto, ningún sistema consistente es suficientemente completo para demostrar su propia consistencia.

Los teoremas de Gödel no son el final de todo el sistema formal matemático, sino el ocaso de un mito de absoluta formalización, pues no toda proposición es demostrable en una clase de sistemas formales. El plan de Hilbert no es completamente realizable, pero su espíritu investigador de grandes sistemas de conocimiento es ciertamente deseable. Al terminar su carrera profesional, Hilbert se interesó por temas biológicos y su relación con la física-matemática. Mostró gran interés por la genética y, concretamente, por las leyes que rigen la transmisión de los caracteres biofísicos en la mosca de la fruta, que ingeniosamente denominaba el átomo de hidrógeno de la genética por su bajo número de cromosomas. Hilbert entendía que la comprensión de la materia y la vida eran las tareas más nobles.

### 1.3. *La ecuación Schrödinger de la mecánica ondulatoria cuántica*

Aunque no compartimos la filosofía axiomática de Hilbert como método para la explicación de los fenómenos físicos —especialmente, para el complejo fenómeno de la conciencia— negar la valía de sus trabajos matemáticos y su alcance en la ciencia física sería una absoluta necedad. En el fondo, la mente de Hilbert funcionaba también con geniales intuiciones que simplificaban enormemente los problemas y, posteriormente, su pensamiento formal los reducía a puros esquemas axiomáticos. Prueba de ello, fueron los buenos consejos que dio a Werner Heisenberg, uno de los físicos veinteañeros que revolucionaron la física cuántica. En 1925, Heisenberg volvió a Gotinga para enseñar a su antiguo jefe, Max Born, el extraño álgebra que había aplicado a la mecánica cuántica tras un aislamiento por convalecencia. Born, que conocía el álgebra matricial por su estudio de redes cristalina, desarrolló dos meses después junto a Pascual Jordan, los fundamentos matemáticos de esta oscura mecánica cuántica matricial.



El espíritu de Hilbert en Gotinga impulsaba con fuerza hacia la axiomatización de la física cuántica. Born y Heisenberg se acercaron a Hilbert para discutir cómo manipular el álgebra de matrices para obtener resultados físicos. Hilbert les comentó la utilidad de las matrices para hallar los autovalores en los problemas de contorno de las ecuaciones diferenciales, pero dudaron de su interés para su novedosa mecánica cuántica matricial. Unos meses después, Erwin Schrödinger presentó su versión ondulatoria de la mecánica cuántica basada, precisamente, en un problema de autovalores con ecuaciones diferenciales cuyos fundamentos matemáticos había sido recientemente publicados por Hilbert y Courant en sus *Methoden der Mathematischen Physik*. En sintonía con la intuición que Hilbert reveló a Heisenberg, Schrödinger demostró la equivalencia entre la oscura mecánica matricial y su clarificadora mecánica cuántica ondulatoria, más acorde con las matemáticas cotidianas de los científicos.

Heisenberg había unido el formalismo matemático de Born y la filosofía positivista de Böhr en una poco conocida física cuántica de matrices. El influjo de la escuela de Copenhague es notorio en su mecánica matricial, pues su desarrollo se basa en las magnitudes observables del problema cuántico: las amplitudes de transición entre estados cuánticos. En consecuencia, se descarta la posibilidad de tratar con magnitudes como la posición del electrón en el átomo. En una conversación privada, Einstein le hizo ver que su descripción matemática no incluía la órbita del electrón, a pesar de que las trayectorias electrónicas eran experimentalmente detectables en las cámaras de niebla. No hay razón para evadir el movimiento electrónico en el átomo. Einstein veía absurdo no hablar de órbitas de electrones ligados al átomo cuando se había constatado el movimiento de electrones libres. Heisenberg continuó defendiendo la necesidad de abandonar la idea de órbitas electrónicas, porque lo único que podía observarse eran las probabilidades de transición entre estados atómicos, así como la frecuencia e intensidad de la luz emitida en cada salto cuántico. Tal estrategia había seguido Einstein exitosamente veinte años antes, cuando se deshizo del inobservable movimiento absoluto en su teoría especial de la relatividad.

La mecánica matricial de Heisenberg-Born-Jordan fue fiel a la epistemología de incluir exclusivamente observables en la teoría, aplicó los avances matemáticos de Gotinga a la física microscópica, describió con éxito la dinámica del átomo de hidrógeno y sirvió de incentivo para relacionar, generalizar y actualizar conceptos clásicos a la nueva mecánica; pero *olvidó* ofrecer una imagen física de la materia. La ausencia de la noción de campo, tan arraigada filosóficamente a la Relatividad General, fue una de las principales razones que hacían sentir a disgusto a Einstein con la mecánica matricial. Bajo el influjo de la noción geométrica de campo físico y la generalización Weyl para unificar geométricamente gravedad y magnetismo, Schrödinger buscó alternativas a los conflictos cuánticos existentes en la teoría Weyl del campo unificado. Las ideas de Schrödinger alentaban de nuevo a los caballeros del continuo, pues traía a colación las órbitas electrónicas de Böhr y algunas intuiciones sobre un campo cuántico —posteriormente desarrolladas por Louis de Broglie—, con la geometría de Weyl que generaliza la física de Einstein.

Un electrón que transportase consigo un vector momento angular alrededor de la órbita, multiplicaría su módulo por una cantidad en cada vuelta, una fase, que depende del potencial electromagnético atómico. La geometría Weyl, que introducía un factor de calibrado *gauge* en el transporte paralelo de vectores, quedaba relacionada con la teoría cuántica y preparaba el camino para entender las órbitas electrónicas como ondas de fase estacionarias alrededor del átomo<sup>12</sup>. Es decir, comenzaba una nueva interpretación de la física cuántica en términos de una mecánica ondulatoria que incluía la noción de campo de Einstein, la dualidad onda-corpúsculo de de Broglie y usaba unas ecuaciones integrales como las de Hilbert-Courant, mucho más familiares con la teoría clásica de campos. Einstein interpretó estas ondas como un *Gespensterfeld*, un campo fantasma que dirige a las partículas; esto es, una onda-piloto al estilo de Broglie o una teoría de variables ocultas como la desarrollada por David Bohm décadas después<sup>13</sup>.

Interpretaciones al margen, la ecuación de Schrödinger de la mecánica ondulatoria describe los niveles de energía del átomo de hidrógeno en términos de una función de onda que, matemáticamente se asocia con la amplitud de probabilidad de encontrar al electrón en una región espacial y, físicamente con resonancias de la onda de fase en las órbitas electrónicas. La mecánica ondulatoria de Schrödinger es intuitivamente más clara que la mecánica matricial de Heisenberg-Born-Jordan. Planck y Einstein en Berlín, Sommerfeld en Munich, Pauli en Hamburgo y el mismísimo Born en Gotinga señalaron algún aspecto positivo de la imagen ofrecida del mundo microscópico, matizada en varios aspectos por otros científicos. Por el contrario, Heisenberg seguía tan reaccionario como de costumbre y Böhr, siempre intenso pero muy educado, mantuvo una empedernida dialéctica cuántica con Schrödinger sin alcanzar consenso.

A partir del origen de la teoría de Schrödinger, Born comenzaba a marcar las limitaciones de su mecánica matricial y a remarcar el vacío teórico en la naturaleza física de las transiciones cuánticas. De nuevo el problema del continuo salía a la palestra. Born pensaba que la nueva mecánica cuántica podía ofrecer respuestas, aunque carecía de una descripción causal. La mecánica cuántica no determina el estado atómico tras una colisión, sino solamente la probabilidad de que sea un estado determinado. Se abría así un tema de gran calado filosófico: el problema de la causalidad y el determinismo en el mundo físico. Born afirmaba que «desde el punto de vista de la mecánica cuántica no existe una magnitud que fije causalmente el resultado de una colisión en un caso individual arbitrario». De este modo se subrayaba la ausencia de causalidad determinista en la mecánica cuántica, pero quizás no fuera un problema de la teoría misma porque «tampoco experimentalmente tenemos ninguna razón para suponer que

<sup>12</sup> Cf. SÁNCHEZ RON, J. M., *Historia de la física cuántica I. El período fundacional* (Crítica, Barcelona, 2001). Seguimos el esquema histórico del autor en el capítulo 12 y nos servimos de su explicación del factor de calibrado.

<sup>13</sup> Para una introducción al pensamiento físico-filosófico de David Bohm puede consultarse: MONSERRAT, J., «Problema psicofísico y realidad cuántica en la física heterodoxa de David Bohm», *Pensamiento* 187 (1991) 297-312.

existan algunas propiedades internas del átomo que condicionen un resultado definido para la colisión». El problema quedaba planteado con total claridad. ¿Es el indeterminismo cuántico una cuestión meramente epistemológica o existe un indeterminismo natural en la ontología física? «Me siento inclinado a abandonar el determinismo en el mundo de los átomos; pero es una cuestión filosófica donde no bastan los argumentos físicos»<sup>14</sup>.

Al son de la filosofía de los caballeros del continuo, con renovados aires de no-localidad física, Bohm recogerá las palabras de Born, la física de de Broglie y la filosofía campal de Einstein en sus trabajos de 1952 sobre causalidad física. Su célebre teoría de variables ocultas, tan denostada por los epifenomenalistas cuánticos, es una propuesta causal, campal y holista de los procesos cuánticos que, bajo el indeterminismo del Principio de Heisenberg, ofrece posibilidades a la explicación del fenómeno de la conciencia<sup>15</sup>. No expondremos aquí su pensamiento físico-filosófico, pero en el fondo sus ideas sintonizan con la representación biogénica cuántica de Schrödinger y su relevancia para el desarrollo de la mente.

## 2. ERWIN SCHRÖDINGER (1887-1961) Y LA BIOLOGÍA CUÁNTICA

Es un hecho que la vida se manifiesta en seres cuya longitud típica se encuadra entre cuatro y diez órdenes de magnitud por encima de la unidad de referencia atómica. Schrödinger comienza su libro sobre el origen de la vida cuestionando por qué los seres vivos deben tener un tamaño tan superior a la escala atómica. Igualmente, podemos preguntarnos por qué el órgano principal de los sujetos psíquicos, el cerebro, consta de una enorme cantidad de átomos. Las neurociencias han descubierto que los cambios de estado del conjunto de átomos que pueblan el cerebro se corresponden con distintos procesos de pensamiento. Semejante ordenación física en el cerebro exige una organización muy rigurosa, cuya dinámica se describa mediante las leyes de la física. ¿Qué procesos físicos, entonces, deben confluir para producir la vida y la conciencia? A continuación, buscamos respuestas a la pregunta, siguiendo la principal línea argumental de la teoría biogénica de Schrödinger<sup>16</sup> en *What is life?*

### 2.1. ¿Qué es la vida?

Estadísticamente, los átomos se mueven desordenadamente por su actividad térmica. Esta acción caótica se opone al comportamiento ordenado exigido en

<sup>14</sup> Cf. BORN, M., «Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge», *Zeitschrift für Physik* 37 (1926) 863-867.

<sup>15</sup> Cf. BÉJAR, M., «Conciencia, creatividad y libertad. Sobre la naturaleza creativa libre de la conciencia en la correspondencia entre David Bohm y Charles Biederman», *Pensamiento* 241 (2008) 447-471.

<sup>16</sup> Cf. SCHRÖDINGER, E., *What is life? The physical aspect of the living cell* (University Press, Cambridge, 1977).

todo ser vivo. Desde un punto de vista físico, la vida no es posible sin coordinación orquestada entre átomos. Es necesario, pues, una cooperación entre un importante número de átomos cuya dinámica estadística sea distinta de la actividad individual. Bajo ciertas condiciones físicas, con una población atómica numerosa, se producen ensambles de átomos que evolucionan de acuerdo con patrones regulares y ordenados. Nos referimos a unas especiales asociaciones atómicas que desempeñan un papel fundamental en la dinámica de un ser vivo.

En términos generales, la ley termodinámica de los grandes números de partículas domina en un ser vivo. Podemos decir que el comportamiento colectivo ordenado y previsible de un conjunto dado es tanto más probable cuanto mayor sea la raíz cuadrada del número de constituyentes. El comportamiento estadístico de un sistema termodinámico es más predecible conforme crece su número de partículas. Con otras palabras: en un sistema de muchas partículas las magnitudes macroscópicas observables dependen más de la dinámica global que de la irrelevante acción errante de un elemento aislado. En un sistema de unas pocas partículas las leyes físicas son muy inciertas. En orden a servirse de leyes estadísticas más precisas, para que un ser vivo regule tanto sus procesos internos de sustentación como su acoplamiento de intercambio con el entorno, es necesario que la vida se origine en grandes estructuras físicas de muchas partículas.

Un ser vivo debe tener una estructura suficientemente compleja para salvaguardarse del azaroso caos térmico exterior. Sin embargo, sabemos que grupos reducidos de átomos, demasiado pequeños para regirse por leyes estadísticas previsible, desempeñan un papel dominante en los seres vivos; puesto que controlan las principales características genéticas que el organismo adquiere como resultado de la evolución natural. La carga genética de los seres vivos está almacenada en una red de cromatina del interior celular, que contiene la información genética de los eucariotas. Durante el proceso de división mitótica, la red se condensa en un conjunto de fibras cilíndricas denominadas cromosomas, que continúan poblando el interior nuclear en otro estado de agregación biofísica.

Los cromosomas tienen la información genética ordenada en genes. Cada gen posee la unidad mínima de información para sintetizar una proteína. Si dividimos la longitud típica de un cromosoma ( $1,5 \mu\text{m}$ ) de una célula media, entre el número medio de genes (2.000), tenemos que cada cromosoma ocupa una región cúbica de  $300 \text{ \AA}$  ( $0,03 \mu\text{m}$ ), esto es, unas cien veces la distancia atómica. Por tanto, en volumen, un gen consta aproximadamente de sólo un millón de átomos. Es una cantidad pequeña para cumplir la ley de los grandes números y cada átomo sigue un comportamiento distinto al de otros similares. A esta escala y con este comportamiento no es descartable que exista algún proceso cuántico en las funciones biológicas.

Darwin se confundió al atribuir continuidad a las variaciones reguladores del proceso evolutivo de las especies. El verdadero desencadenante de la selección natural es una ruptura discreta en el material genético: una mutación, como la denominó Hugo de Vries. Schrödinger interpreta que estas bruscas irrupciones en el material genético son debidas a saltos cuánticos en las moléculas de

los genes. Las mutaciones almacenadas en el material genético y transmitidas entre generaciones permiten explicar la supervivencia del genéticamente mejor adaptado al entorno y, por tanto, la evolución de las especies. No son efectos progresivamente acumulados en el material genético, sino sucesos energéticos puntuales que modifican la estructura cromosómica. A propuesta de Schrödinger, debemos sustituir las *leves variaciones accidentales* de la teoría de Darwin por *mutaciones*, de la misma manera que en la física cuántica ha dominado el *salto cuántico* en detrimento de las *transferencias continuas de energía*.

El mecanismo hereditario está estrechamente relacionado con los fundamentos de la teoría cuántica. Del mismo modo que un salto cuántico cambia el estado energético de un sistema, una mutación reordena el mismo conjunto de átomos en un estado biofísico distinto. En física-química un isómero es una reordenación atómica en la misma molécula. Cuanto mayor sea la molécula, más isómeros son posibles. Entre dos isómeros existe un umbral de energía. Así, si la diferencia de energía ( $\Delta E$ ) entre los estados de dos isómeros es  $E_2 - E_1$ , entonces la energía necesaria para acceder desde el estado de menor energía ( $E_1$ ) al de mayor energía ( $E_2$ ) es  $\Delta E + \varepsilon$ , siendo  $\varepsilon$  la energía umbral. De este modo, si las condiciones energéticas del entorno no superan la energía umbral, el sistema se mantiene estable en su nivel energético  $E_1$ , independientemente del tiempo de exposición. Por el contrario, ante una fuerte perturbación energética se produce un salto cuántico desde el nivel inferior  $E_1$  al estado excitado  $E_2$  y se forma un isómero de la molécula original; es decir, se reordenan los mismos átomos en una configuración distinta. Las modificaciones en los estados conformacionales de la estructura cromosómica servirían de base física para explicar el alcance de las mutaciones en la evolución natural.

La física describe el mundo macroscópico mediante interacciones cuánticas que moldean los agregados atómicos. La simple repetición continuada y periódica de moléculas en las tres direcciones espaciales forma un cristal, que puede crecer ilimitadamente. Alternativamente, en los compuestos orgánicos complejos, los estados de agregación carecen de la simetría del cristal, de tal manera que pequeños grupos atómicos funcionan distintamente que el resto. Schrödinger los denomina cristales aperiódicos e incluye en este grupo a la estructura cromosómica. Los genes formarían pequeñas agrupaciones en el cromosoma, capaces de sufrir saltos cuánticos entre estados conformacionales distintos de dos isómeros. Para perdurar en el tiempo, es decir, para que la mutación sea estable, la energía umbral que protege al sistema de sufrir un nuevo salto cuántico debe ser suficientemente alta en comparación con la actividad energética del medio.

En sintonía con el también ganador del Premio Nobel, Max Delbrück, Schrödinger concluye que las leyes de la física son parte integral del fenómeno de la vida. La Segunda Ley de la Termodinámica se ajusta sobremanera a la tendencia natural al desorden de los seres vivos. Un organismo que paralice sus funciones vitales básicas tiende progresivamente a confundirse con su entorno. Al morir un individuo, sus constituyentes fundamentales se desperdigan por el medio hasta borrar cualquier rastro que permitiera distinguirlo. Los organis-

mos, como los sistemas físicos, tienden a desordenarse en el universo, salvo que existan procesos reguladores del orden. Es evidente, que un ser vivo necesita mantenerse en un orden para subsistir. La materia viviente evade temporalmente la inercia hacia el inerte estado de mayor desorden o, técnicamente, de entropía máxima. La vida es tan enigmática por ser una constante lucha contra el aumento de entropía. Cuando un organismo vivo se alimenta, generalmente apenas varía significativamente su cantidad de energía. La consecuencia fundamental de la alimentación es reducir el nivel individual de entropía, a costa de incrementarlo en el entorno. Un individuo está vivo mientras logra evitar por un tiempo el irremediable estado de equilibrio que le impone su naturaleza física. Mientras vive, logra esquivar el seguro destino final refugiándose en estados termodinámicos fuera del equilibrio. La vida, pues, aparece como sistemas termodinámicos alejados del equilibrio.

Schrödinger concluye *What is life?* remarcando una distinción entre los procesos físicos para producir orden del desorden (sistemas termodinámicos de no-equilibrio) y otros modos por descubrir para producir orden biofísicamente. La alternativa biofísica, aunque soportada sobre la base estadística de las leyes cuánticas, apunta hacia una mecanización propia del régimen físico clásico. La regulación interna de la entropía de un ser vivo ha alcanzado un sofisticado nivel de mecanización tal, que el entorno puede considerarse neutral durante la mayor parte del tiempo de vida. En cierta medida, podemos decir que la *robótica* de la vida se ha consolidado como un proceso mecánico válido para el desarrollo del individuo y su supervivencia en la especie. En conclusión, las leyes cuánticas de la física debieron desempeñar un papel preponderante durante la biogénesis y sufrir, posteriormente, una aclimatación mecanicista encaminada a la supervivencia. Sin embargo, no podemos olvidar que la base de la vida es la física, cuyas interacciones cuánticas están aún presente en el interior de la *robótica* clásica y, pueden ser clave para entender un fenómeno aún más enigmático: la conciencia.

## 2.2. *El amanecer de la conciencia en la materia viviente*

Schrödinger comenzó sus conferencias Turner en Cambridge<sup>17</sup> subrayando la conveniencia de pensar el mundo como una realidad objetiva por sí misma; aunque, en realidad, no se manifiesta por sí mismo, sino íntimamente ligado a un proceso que involucra directamente a la conciencia. El mundo tal y como se nos presenta es un constructo psíquico de sensaciones, percepciones y recursos de la memoria. Por tanto, la conciencia, tan apegada a las macroestructuras biofísicas de la materia viviente, es la clave para acceder subjetivamente al mundo objetivo.

Si bien es cierto que Schrödinger atribuye ciertas trazas de conciencia en todo el reino animal, no es un pampsiquista al estilo de Spinoza, quien razona-

<sup>17</sup> Cf. SCHRÖDINGER, E., *Mind and matter* (University Press, Cambridge, 1977).

ba que cualquier ser era una modificación de la sustancia infinita de materia y mente. Prueba de ello son los pensamientos inconscientes que abordan constantemente al cerebro o toda esa cantidad de información procesada bajo el nivel mínimo de conciencia. En palabras del autor: «no todo impulso nervioso en el cerebro va acompañado de conciencia».

La conciencia es un fenómeno acaecido en la historia de la evolución. Así como el principal valor biológico de los seres vivos es aprender cómo mejorar las respuestas de adaptación al medio, la conciencia se asocia con el aprendizaje mismo de la materia viviente en su dimensión más subjetiva. Siguiendo la metáfora robótica, un ser vivo ha desarrollado tales estructuras biológicas adaptativas que, constantemente, está diseñado para optimizar inconscientemente los mecanismos óptimos que más se ajustan a la supervivencia. En este sentido, el animal es como un robot programado para desempeñar sus mejores armas en la lucha de la vida. Para Schrödinger, la conciencia es un añadido sobre la armadura biológica. La conciencia permite al sujeto viviente hacer presente su dinamismo vital. En el amanecer de la conciencia, el sujeto viviente se hace dueño de uno entre tantos pensamientos inconscientes cuando resulta beneficioso para su supervivencia. El robot biológico, diseñado evolutivamente para sobrevivir cada vez mejor, repite cual autómatas las acciones más exitosas hasta que consigue dar con una nueva que mejora sus anteriores resultados. Pues bien, la conciencia aparecería en la historia evolutiva en el primer animal que se hizo consciente de esta mejora adaptativa, emergiendo del fondo de pensamientos inconscientes. En esta línea, sin duda, la conciencia es un fenómeno que claramente favoreció la supervivencia del mejor adaptado: no del más fuerte, sino del que se hace consciente de su efectivo comportamiento y puede enseñarlo.

Existe una fuerte conexión entre la funcionalidad y desarrollo de un órgano: si algo se usa y es efectivo para el fin deseado, entonces la naturaleza tiende a mejorarlo. Jean-Baptiste Lamarck estableció este valioso principio evolutivo, aunque erró en la descripción del mecanismo subyacente que lo fundamenta. Pensó equivocadamente que los caracteres adquiridos que mejoran la efectividad del uso de un miembro quedaban inscritos en los descendientes. Hoy sabemos que la vida funciona según este principio lamarckiano, pero el proceso evolutivo se rige por la selección natural de los azarosos mutantes que mejor se adaptan al medio. Sin embargo, Schrödinger remarca que sí existe un tipo de comportamiento que se fija en los descendientes por aprendizaje. Si el mecanismo de aprendizaje es adecuado y el cambio de comportamiento acertado se refuerza el valor adaptativo introducido aleatoria y automáticamente por las mutaciones. Este impulso en el comportamiento no es transmitido a través del material genético. En consecuencia, si las mutaciones cromosómicas no explican una alteración del comportamiento en este sentido, la teoría darwiniana no es completa por sí misma. El comportamiento no es heredado, pero acelera el proceso de selección natural por prueba y error. Con certeza, el hombre ha sido el sujeto consciente privilegiado capaz de acelerar su proceso de adaptación al medio gracias a la modulación de comportamientos, es decir, a la educación consciente.

Buscar una explicación científica de la transmisión de comportamientos entre generaciones pasa por comprender mejor ese salto evolutivo en la aparición del sujeto consciente. La ciencia no impone teorías, sino que propone declaraciones explicativas sobre un fenómeno. La conciencia es un fenómeno peliagudo, porque involucra simultáneamente al sujeto observador y al objeto observado. El propio cuerpo, tan ligado a la actividad sensitiva y psíquica, forma parte del objeto de estudio, que es el mundo real. El mundo es real en tanto que es sentido y percibido por un sujeto psico-biofísico. No hay mundo fenoménico sin sensaciones, percepciones y recuerdos. Sentir, pensar o discurrir sobre un objeto, implica hacer presente al objeto en la conciencia. Tomar conciencia de la realidad del mundo supone que el sujeto psíquico quede enlazado con el propio mundo físico. Un objeto, tal y como se nos presenta, es el resultado de una interacción entre el observador y lo observado. El observador se hace consciente del objeto porque cambia su estado psíquico y, al mismo tiempo, lo observado es perturbado por el sujeto psicofísico que interactúa con ello. De esta manera, Schrödinger afirma que el mundo es dado unitariamente, de una vez, sin fragmentación. Es, en conclusión, una visión holista del mundo donde sujeto y sujeto son unidad en el sujeto consciente.

En consecuencia, no hay una disciplina científica concreta que estudie la conciencia, porque la ciencia en su conjunto es conciencia científica de la realidad. Tampoco es posible explicar la conciencia como la mera suma de las *subconciencias* de las células del cuerpo y, en conexión lógica, Schrödinger rechazaría también la posibilidad de crear un modelo mecanicista de la conciencia. Como hemos hecho presente anteriormente, la conciencia es precisamente una fuga del torrente mecanicista de la vida en el universo. Sin embargo, nada estaría más lejos de sus pensamientos que postular alguna realidad alternativa a la materia para explicar la conciencia o proponer una formulación fiscalista; porque ni hay constancia de un alma, ni la ciencia física por sí sola puede abarcar la definición de una sensación. A nuestro modo de ver, la visión de Schrödinger es más próxima a un emergentismo holista que busca comprender la conciencia en el dinamismo de conjunto de una única ontología de mente y materia.

### 3. HERMANN WEYL (1885-1955) Y LA CONCIENCIA CUÁNTICA

Entre matemáticos y físicos fue una figura honorable. Hermann Weyl contribuyó como pocos al desarrollo conjunto de la Relatividad y la Cuántica. Antes de la Primera Guerra Mundial, Weyl no se resistió a estudiar a fondo la Relatividad y el programa intuicionista de Brouwer que servía de contrapartida al dañado paradigma axiomático de Hilbert. En física, es especialmente conocido por introducir la teoría *gauge* en su intento de unificar los campos gravitatorio y electromagnético. *Grosso modo*, las teorías *gauge* se valen de las simetrías matemáticas de las ecuaciones de campo para describir determinadas cantidades físicas conservadas ante ciertas transformaciones invariantes. Su repercusión



sión en la moderna Teoría Cuántica de Campos ha sido de primer orden. En consecuencia, las partículas no se interpretan hoy como pequeñas esferas macizas, sino como resonancias en la propia geometría del mundo físico. Sus campos gauge son, pues, intentos matemáticos por profundizar en la ontología de la materia.

Weyl fue el verdadero sucesor del gran David Hilbert. Se doctoró bajo su dirección y fue capaz de trascender el planteamiento puramente axiomático de su maestro, con quien compartió gran interés por una gran variedad de temas, desde los fundamentos de las matemáticas hasta el estudio de sus aplicaciones físicas. Fuera del ámbito estrictamente científico-matemático, su interés por la filosofía fue asombrosamente fuerte. Weyl fue un verdadero filósofo, firme conocedor de los pensamientos de Descartes, Leibniz, Locke, Kant, Brentano, Ortega y, por supuesto, de Husserl, quien influyó en su filosofía de la naturaleza. Fruto de este bagaje filosófico se encaró con temas de tal calado filosófico como: la maquinaria de la existencia, los principios subyacentes a la mecánica cuántica, el problema del continuo físico-matemático, el flujo del tiempo, la conciencia... Podemos decir que fue una persona con facilidad para desenvolverse en cualquier ámbito y frontera del conocimiento<sup>18</sup>.

### 3.1. *Filosofía en clave matemática: la estructura geométrica de la realidad*

Weyl define la matemática como la ciencia que trata lo infinito. Conocer en matemáticas supone adquirir constancia de las propiedades de un objeto matemático. Poder abstraer tales propiedades exige la finitud del sistema matemático estudiado. En el caso de conjuntos infinitos, los conceptos *todos* o *algunos* se tornan conflictivos y atañen al corazón mismo de las matemáticas. Pasar de un sistema finito a uno infinito es comparable al significado de las sumas infinitas, que sólo parcialmente guardan relación con las finitas en casos concretos de convergencia. Ante este planteamiento de partida acerca del infinito, Weyl se posiciona en la epistemología intuicionista de Brouwer. Por ello, «creer en un conjunto infinito de proposiciones o en el continuo de la infinidad de números reales grava la fuerza de nuestra fe no menos que las doctrinas de los primeros Padres de la Iglesia o que los filósofos escolásticos de la Edad Media»<sup>19</sup>. El continuo de los números es una idealización, la ilusión de aproximarse al infinito, un sueño del que hemos despertado tras las lecciones de Gödel.

La ausencia de idealismo en la filosofía matemática de Weyl no se traduce en un ingenuo realismo ni en un puro objetivismo. Su epistemología se construye a partir de un término matemático llamado *isomorfismo*. Al realizar una deformación continua del espacio clásico se hace imposible distinguir entre las líneas que, previamente eran rectas o curvas. Sin embargo, los contornos con-

<sup>18</sup> Cf. WHEELER, J. A., «Hermann Weyl and the Unity of Knowledge», *American Scientist* 74 (1986) 366-375.

<sup>19</sup> Cf. WEYL, H., «Mathematics and logic». Preface to a review of «My Philosophy of Bertrand Russell», *American Mathematical Monthly* 53 (1946) 2-13. (Traducción del autor.)

servan la misma estructura, esto es, forman dominio isomorfos. Pues bien, toda propiedad adscrita a un dominio es también válida en cualquiera otro isomorfo. Weyl piensa que este concepto describe bien el modo de proceder de las ciencias. La ciencia determina su ámbito de investigación de la realidad en un mapa isomorfo. Las coordenadas de este mapa son bien distintas a los puntos del dominio espacial real que conocemos mediante percepciones intuitivas inmediatas. La idea del isomorfismo demarca una frontera del conocimiento, de especial importancia para tratar con especulaciones metafísicas de la realidad más allá del puro fenómeno. Bajo la hipótesis del isomorfismo entre el mundo absoluto y el fenoménico, es posible descubrir atributos cognitivos del mundo en sí tal y como se obtienen del mundo fenoménico. Mediante las relaciones isomorfas es posible transferir *insight* entre campos isomorfos. Decimos, entonces, que Weyl desarrolla su filosofía en el marco epistemológico de un realismo limitado.

Así como el infinito sale al encuentro en una sucesión ilimitada de números naturales, es posible encontrarlo en la continuidad de los números reales. El problema matemático de la continuidad de la recta real es isomorfo a la problemática física del espacio-tiempo. La cuestión filosófica del continuo fue claramente planteada por Anaxágoras y se recoge en uno de sus fragmentos: «En lo pequeño no hay un absolutamente pequeño, sino siempre algo más pequeño. De tal manera que el ser no puede dejar de ser por más que se lo divida». La recta real no es infinita solamente por sus *extremos*, sino que cada segmento puede ser subdividido *ad infinitum*. De forma radicalmente opuesta, Demócrito pensaba que el continuo estaba formado por una sucesión finita de elementos discretos indivisibles, cuya relevancia epistemológica actual es notable en física cuántica.

El problema del continuo conduce a un idealismo de corte leibniziano: «del hecho de que un sólido matemático no pueda reducirse a sus primeros elementos, se sigue inmediatamente que no es real sino un mero constructo ideal formado por partes». La cosa real, por tanto, nunca se da íntegramente pues su horizonte interno está plegado por un continuado proceso infinito de nuevas experiencias. En consecuencia, Weyl piensa que es imposible postular la cosa real como existente, cerrada y completa en sí misma. Sin embargo, del mismo modo que Cauchy descubrió criterios matemáticos para sumas infinitas, cuyo resultado numérico es el límite de un proceso infinito, es posible optar a un conocimiento de la cosa real en clave de isomorfismos, como producto cognitivo límite del proceso ilimitado de experiencias fenomenológicas.

En esta línea, el padre del intuicionismo matemático ve la esencia del continuo en la relación entre la parte y el todo. A diferencia de Hilbert que enfatizaba la relación entre el elemento y el conjunto, Brouwer piensa que el continuo es un todo integral que no está formado por partes. Bajo la influencia de estos dos matemáticos, Weyl se posiciona epistemológicamente más próximo a un idealismo Brouwer que reduce el conocimiento a intuiciones que al realismo naíf de Hilbert que no es consciente de la transición cognitiva de lo fenoménico a lo trascendente. A nuestro entender, podríamos ubicar la epistemología de Weyl en un realismo limitado que, sin reducirse exclusivamente a lo fenome-

nológico, es consciente de que la cosa real sólo puede descubrirse en clave isomorfa con la realidad fenomenológica<sup>20</sup>.

Al igual que en la ciencia de lo infinitamente pequeño, la geometría diferencial, las relaciones básicas conciernen a puntos infinitamente próximos, Weyl piensa que el mundo debe comprenderse por medio del comportamiento de lo físicamente pequeño. Con esta reflexión sobre la métrica de la geometría de Riemann, que no es estática ni homogénea sino dinámica, la filosofía de Weyl se interna ya en el mundo físico. Posteriormente, veremos que su filosofía matemática tiene también repercusiones en el mundo psíquico, pues existen problemas que pueden ser planteados formalmente pero sólo resueltos intuitivamente, más allá de la pura deducción formal. El funcionamiento intuitivo de la mente supone un problema que manifiesta las deficiencias del método deductivo axiomático para explicar el fenómeno de la conciencia.

### 3.2. *Filosofía de la física: causalidad, indeterminismo y el continuo físico*

Si el mundo físico se comprende a partir de lo pequeño y la geometría diferencial es la ciencia de lo pequeño, resulta natural que Weyl explique la naturaleza física desde una ontología primaria de marcado corte geométrico. La geometría riemanniana de la Relatividad describe la estructura material del mundo físico. A diferencia de la geometría de Euclides que determina un orden espacial cristalizado, la alternativa de Riemann ofrece una estructura matemática flexible, mejor adaptada a la ontología dinámica del espacio y susceptible al cambio ante perturbaciones materiales. Aunque esta ontología es única, su métrica no es homogénea como en el caso euclidiano, sino que varía según la posición. La métrica del espacio-tiempo está absolutamente dada, pero la orientación mutua entre posiciones es variable y dependiente del contenido de energía-materia.

Desde un punto de vista clásico-relativista, el conjunto de posiciones espaciotemporales integran un continuo cuadridimensional. Todas las posiciones simultáneas conforman un *stratum* tridimensional y todas las posiciones con la misma ubicación forman un *fibrado* unidimensional. De acuerdo con esta descripción matemática, el orbe espaciotemporal consta de una sucesión de estratos atravesado por fibrados, donde cada posición es la intersección de un estrato con un fibrado. Esta geometría del espacio-tiempo es relevante desde un punto de vista físico. La estratificación espaciotemporal tiene un significado físico, pues determina la conexión causal en física.

De acuerdo con esta estructura causal, el mundo físico es bien distinto de la imagen newtoniano-kantiana acerca de un *a priori* universal que establece el carácter absoluto del espacio, tiempo y movimiento. Esta cosmovisión absolutista, construida desde principios teológicos, ha sufrido esenciales modificaciones debido al descubrimiento de la estructura causal del mundo físico. La

<sup>20</sup> Cf. WEYL, H., *Philosophy of Mathematics and Natural Science* (University Press, Princeton, 2009). El apartado 3.1 está basado en las ideas de Weyl de los tres primeros capítulos.

rigidez causal que diferencia absolutamente el pasado del futuro queda relativizada en cada posición con su propia estructura causal e inercial, determinada por un cono de luz. Pasado y futuro son relativos en el siguiente sentido. En el interior del semicono futuro de un punto del espacio-tiempo se encuentran todas las posiciones que se hallan bajo la influencia del observador. Representa, pues, el futuro accesible al observador. En el interior del semicono pasado se incluye todo el espacio que puede examinarse pasivamente por el observador o desde donde es posible recibir comunicación física de algún tipo.

La métrica determina las líneas rectas en un espacio geométrico. En física, la inercia depende del estado conformacional del espacio-tiempo. Al no existir una métrica homogénea, tampoco existe una ley de inercia absoluta. Según la Relatividad, el campo métrico rompe la rigidez euclidiana y permite que su flexibilidad describa la interacción gravitatoria como un campo que guía la materia y depende de ella. En este marco campal, una partícula material, como un electrón, se concibe como un diminuto dominio donde la intensidad de campo asume valores enormemente elevados. Se trata, pues, de una enorme concentración de la energía del campo. Este nudo de energía diferenciado se propaga ondulatoriamente por el campo remanente fundamental al que permanece siempre ligado.

El movimiento del electrón se entiende como desplazamiento de un centro ideal de energía a través del campo. Por tanto, no hay una misma sustancia electrónica que perdura en el tiempo, sino una perturbación sostenida del campo de energías. Esta nueva cosmovisión de naturaleza campal, difícilmente puede describirse conforme al mecanicismo físico característico de las etapas anteriores al desarrollo de la mecánica estadística y la mecánica cuántica. No hay un agente exterior al campo que perturbe el campo. La propia dinámica campal fluye continuamente siguiendo leyes autónomas. La mecánica newtoniana, impregnada de un dualismo de fuerzas y corpúsculos en un espacio absoluto casi-divino, deja paso a una nueva cosmovisión. En realidad, no hay espacio ni tiempo independientes de la materia. El campo electromagnético y el campo métrico de la gravedad se integran en una misma idea de campo unificado, el nuevo éter de la física.

Por otro lado, la mecánica cuántica es incompatible con una teoría estrictamente determinista. No tiene sentido buscar una teoría sub-cuántica para corregir hasta la certeza sus predicciones probabilistas. Un sistema cuántico nunca está absolutamente aislado del entorno y, por tanto, la función de onda que describe su estado cuántico sufre continuas fluctuaciones como consecuencias de las inevitables perturbaciones cuánticas. Ahora bien, supuestas esta esencial dinámica cuántica, no hay razón para dejar de buscar las propiedades metafísicas que, conformes a los modelos físicos de la realidad, expliquen las causas ontológicas de la evolución física. En esta línea, pensamos que las ideas físico-metafísicas de Weyl relacionadas con la naturaleza campal de la materia y unidas con la esencia burbujeante de las fluctuaciones cuánticas, pueden servir de base para explicar la razón de ser del mundo físico, salvando las limitaciones de incertidumbre cuántica. De este modo, conseguiríamos un sustento metafí-

sico, cuántico y campal de la naturaleza física, que permitiera atribuir causas a los fenómenos físicos respetando el indeterminismo propio de las leyes físicas.

Para Weyl, la filosofía de la física está estrechamente unida a la geometría<sup>21</sup>. Hablar de los fundamentos físicos de la naturaleza es remitirse a consideraciones topológicas que elevan la idea físico-metafísica del campo como entidad globalizadora y unificadora, compatible con los presupuestos de la física cuántica. La idea del campo recoge en sí conceptos importantes en física: continuo físico, causalidad e incertidumbre y unificación física. El campo físico se describe a partir del continuo campo métrico de la geometría diferencial, ofrece una explicación metafísica de la causalidad física coherente con el indeterminismo inherente en la medida cuántica y permite tentativas geométricas a la unificación de las interacciones físicas. Así como la geometría del macrocosmos trasciende la coherencia de la teoría euclidiana, la lógica cuántica del microcosmos es bien distinta al denominado sentido común.

La incertidumbre cuántica es la razón de la necesaria alteración de la lógica común y la esencia del desorden microscópico. Semejante dinámica cuántica no acepta las leyes deterministas de la mecánica clásica. Se impone la necesidad de introducir leyes estadístico-estocásticas, basadas en una escurridiza definición de probabilidad cuántica en el límite de muchas partículas, para explicar mediante leyes causales el emergente orden del caos microscópico. Sin embargo, existe una probabilidad cuántica remanente incompatible con un determinismo causal, que no es abarcable por leyes estadísticas-deterministas. Es la probabilidad cuántica en sí misma, el principio físico de la incertidumbre cuántica, que exige racionalmente introducir un factor causal indeterminista.

### 3.3. *Filosofía de la naturaleza biofísica*

La explicación científica de la mayoría de los fenómenos macroscópicos físicos desde las propiedades del azaroso régimen cuántico se construye a partir de leyes estadísticas que no se ajustan a estrictas predicciones exactas; es decir, los valores predichos sufren un grado de incertidumbre. La dinámica general de un sistema biofísico se explica mediante magnitudes promediadas sin importar las imperceptibles propiedades concretas de cada constituyente, aunque las fluctuaciones inherentes del régimen microscópico se amplifican en la incertidumbre estadística.

Weyl busca una explicación del caos microscópico en el orden biofísico de la vida basándose en leyes estadísticas. Las leyes estadísticas desempeñan un papel tan importante como las leyes deterministas en el régimen macroscópico de los seres vivos. Aunque las leyes clásicas fundamentales determinan el entorno infinitamente próximo de cada punto al resolver sus ecuaciones diferenciales, los valores estadísticos promedio de sus magnitudes experimentan una dinámica más versátil, de conjunto, afectada por las condiciones globales del

---

<sup>21</sup> Cf. WEYL, H., *Philosophy of Mathematics and Natural Science* (University Press, Princeton, 2009). El apartado 3.2 está basado en los capítulos cuarto, sexto y noveno.

sistema. Estas propiedades estadísticas se caracterizan por producir grandes efectos a partir de causas sencillas. Si existe alguna diferencia esencial entre la vida y la muerte no es atribuible al sustrato material, sino a las nuevas propiedades biofísicas emergentes en las complejas estructuras macroscópicas, reguladas por principios termodinámico-estadísticos. El origen de la vida no es cuestión de puro azar, sino un producto de la ordenación de la materia en estructuras biofísicas que obedecen leyes termodinámicas emergentes del comportamiento estocástico-estadístico de sus constituyentes en interacción cuántica.

Weyl comenzó su estudio físico del origen de la vida siguiendo las ideas de Oparin sobre una azarosa reunión molecular en estructuras replicativas. Por la reducida probabilidad de tales agregados biofísicos, Weyl se vio tentado hacia una biogénesis teleológica, pero buscó alternativas en la física cuántica que, sin duda, es el principal distintivo de las ciencias físicas. Los procesos cuánticos son relevantes para entender el ciclo vital de un organismo, siempre que las acciones de un número moderado de partículas generen un proceso emergente con repercusiones a escala macroscópica. El desarrollo de la estructura, forma y función de un ser vivo es una clara manifestación macroscópica de las implicaciones genéticas a escala molecular. El hecho de que la acción física de rayos X cause mutaciones genéticas prueba que los genes son estructuras físicas. Una alteración conformacional de su ordenación biofísica a nivel cuántico, se traduce en importantes modificaciones de la morfología o funcionalidad macroscópica. Los efectos de las mutaciones son consecuencia de una transición isomérica molecular, fruto de la readaptación de la estructura cromosómica tras un proceso electrónico de absorción energética.

La conexión genotipo-fenotipo es un ejemplo paradigmático, subrayado por Weyl y Schrödinger, acerca de la amplificación a gran escala de un proceso cuántico y sus trascendentes repercusiones en el desarrollo de la vida. Weyl sabía que la teoría de la información era relevante para entender el papel que juega el gen en la maquinaria de la vida y la evolución. Existe un amplísimo abanico de posibles combinaciones atómicas además de la estructura génica, pero son escasas las posibilidades de que funcionen como un gen. Por ello, Weyl remite el origen del gen a un proceso selectivo. Cuanta mayor capacidad para almacenar información, más funcional es esa combinación atómica para el desarrollo de la vida y, por tanto, la estructura óptima de almacenamiento —el gen— será integrada como elemento esencial de los procesos vitales<sup>22</sup>.

A pesar de las tentativas explicativas del origen de la vida, el tránsito de lo inerte a lo viviente es un profundo enigma. Hay un gran abismo entre lo inorgánico y lo animado, sucintamente salvado por un puente de entidades víricas submicroscópicas. Los virus son estructuras biofísicas a caballo entre lo vivo y la materia sin vida, con tamaños que oscilan entre la longitud típica de una proteína compleja y una bacteria. Bioquímicamente son material genético recu-

<sup>22</sup> Cf. WEYL, H., *Philosophy of Mathematics and Natural Science* (University Press, Princeton, 2009). El apartado 3.3 está basado en las ideas de Weyl de los capítulos 8, 10 y 11.

bierto por proteínas, que comportan como objetos inertes cristalizados salvo si recaen en el interior de algunas células vivas. Entonces, manifiestan comportamientos propios de las estructuras de los organismos vivos como la replicación autónoma y la capacidad adaptativa mediante procesos de mutación genética. Esta transición a la fase activa está regulada por interacciones físicas que operan a escala molecular. Las leyes cuánticas de estos procesos se incardinan, pues, en los procesos biofísicos y causan importantes repercusiones biológicas.

Las aportaciones de Weyl al origen de la vida están menos desarrolladas que los trabajos de Schrödinger. Ambos mantienen la relevancia de la estadística de los procesos cuánticos en el proceso de biogénesis. Weyl ofrece una imagen más pincelada cargada de importantes intuiciones acerca de la relación entre física cuántica y biología, información y genética, virus y biogénesis... La trascendencia de sus ideas radica en la unidad de su filosofía matemática, natural y biofísica, que concluye en una aproximación intuitiva a la explicación de la conciencia.

### 3.4. *Filosofía para entender la conciencia*

Hemos comprobado cómo Weyl invirtió esfuerzos en matemáticas, física y filosofía. No fue un matemático puro, sumido en un etéreo mundo de luminosas ideas matemáticas, completamente ajeno a las oscuras profundidades de la existencia humana. Se mantuvo siempre permeable a la relevancia de la filosofía matemática para comprender el mundo en su conjunto y defendió un realismo matemático basado en la confluencia entre lo matemático y lo físico. Fruto de estas reflexiones existenciales, veía al hombre como un ordinario sujeto material vivo con experiencias psicofísicas y, en otro plano, como un intelecto abierto a la coherencia racional del mundo compartido y a la privacidad de su interioridad consciente. La esencia del hombre radica en la combinación de su existencia mundana y su apertura consciente a la realidad.

La realidad, tal y como se presenta fenomenológicamente, existe exclusivamente en el encuentro con un sujeto consciente. No es realidad en sí misma, sino realidad con observador. Las cualidades de esta realidad se descubren en la percepción consciente de las sensaciones psicofísicas. Estas cualidades no son realidad en sí misma, sino realidad para un sujeto que depende de condicionantes físicos y psíquicos. Weyl ejemplifica esta emergencia psicofísica sensitiva con la percepción del color. No existe el rojo si no es en relación con un sujeto que lo percibe bajo unas condiciones lumínicas concretas. Al variar la naturaleza de la luz externa o al perturbar las estructuras psíquicas del observador mediante fármacos, la sensación del color se altera. Por tanto, la percepción no aprehende los objetos en sí mismos, sino unas propiedades físicas subjetivas, resultantes de la interacción psicofísica entre objeto y sujeto, que pueden derivarse racionalmente en cualidades abstractas como la rojez y expresarse mediante símbolos (*r o j o*).

El remanente último del proceso cognitivo es isomorfo a la construcción simbólica de Hilbert en matemáticas. No hay garantía de que la realidad en sí misma se trasluzca en el orden fenoménico. Hasta este punto, Weyl se posicionaría en un puro idealismo. Sin embargo, añade que la pura realidad podría revelarse si existieran leyes fundamentales comprensibles para un sujeto cognitivo. En este sentido, el acceso a la realidad del mundo pasa por el descubrimiento intuitivo de su armonía racional matemática, más allá del conocimiento puramente formal, en el *insight* de la conciencia. Weyl cree que el pensamiento matemático es la reacción creativa por excelencia del hombre ante su universo, enraizada en su esencia natural. Previamente a la formalización debe descubrirse una sustancia matemática<sup>23</sup>.

La unidad del pensamiento filosófico de Weyl puede resumirse sucintamente en su célebre sentencia: *el mundo objetivo simplemente es, no acontece*. La conciencia estratifica la realidad global en una continuidad temporal de planos de simultaneidad, es decir, desdobra el mundo en condicionantes espaciales y temporales. Los objetos de la conciencia existen en la confluencia de sensaciones e intuiciones conscientes. Fenomenológicamente es imposible ir más allá. La física y la matemática difícilmente alcanzan niveles más profundos de la realidad. La física cuántica, en la tradición epistemológica de Copenhague, no se queda siquiera en el puro fenómeno sino en un operacionalismo de sus observables; es decir, prescinde de todo salvo de lo mensurable. Por ello, la física cuántica representa el éxito de una teoría científica y la crisis metafísica de sus fundamentos causales. Sin embargo, la teoría cuántica ofrece un puente entre lo orgánico y lo inorgánico, entre el sujeto consciente y la pura materia, que permite relacionar en un mismo nivel materia, vida y conciencia.

La física cuántica defiende la filosofía de que el todo es mayor que la suma de las partes, pues las probabilidades de cada estado de un sistema cuántico no pueden determinarse de las probabilidades de los estados de sus elementos constituyentes. El estado cuántico de un sistema de dos electrones determina el estado de cada electrón, siendo falso lo recíproco: no es posible derivar el estado global del sistema conociendo los estados de sus partes. El todo es el producto de un proceso emergente a partir del acoplamiento cuántico de sus componentes. Materia, vida y conciencia pueden entenderse mejor como subproductos de un mismo proceso cuántico global. Aunque esta última idea es nuestra interpretación personal tras haber estudiado los escritos de Weyl, pensamos que es una conclusión coherente con su cosmovisión. Otro matemático físico posterior, Roger Penrose, comparte los mismos fundamentos científicos que Weyl y, además, ha conseguido construir un modelo heurístico más concreto acerca del comportamiento cuántico de la conciencia<sup>24</sup>.

<sup>23</sup> Cf. WEYL, H., *Mind and Nature: Selected Writings on Philosophy, Mathematics, and Physics*, edited by Peter Pesic (University Press, Princeton, 2009).

<sup>24</sup> Cf. BÉJAR, MANUEL, «Physics, consciousness and transcendence. The connection between the physics of Roger Penrose and David Bohm as regards a scientific explanation of the workings of the human mind open to reality», *Pensamiento* 242 (2008) 715-739.



#### 4. EVIDENCIAS EXPERIMENTALES PARA UN MODELO CUÁNTICO DE LA CONCIENCIA

Tratar la problemática de la materia, la vida y la conciencia exige un soporte experimental de partida donde basar las disquisiciones científico-metafísicas. Sin referencias al contenido experimental cualquier explicación de la conciencia carecería de la consistencia y fiabilidad características de las ciencias empíricas. Por ello, finalizamos este artículo recogiendo someramente algunas de las principales evidencias experimentales recientes para construir un modelo científico de la conciencia, coherente con los principios de la biofísica cuántica señalados —entre otros— por Schrödinger y Weyl. Puesto que está sobradamente demostrado el comportamiento cuántico de la pura materia, así como el mantenimiento de sus propiedades microscópicas cuánticas a gran escala, no incluimos una exposición detallada de los fenómenos cuánticos de macrocoherencia cuántica. Basta citar, que los fenómenos de superfluidez, superconductividad, condensación Bose-Einstein, no-localidad y fluctuación Casimir son constataciones experimentales de primer orden científico acerca de la naturaleza cuántica de la materia a escala macroscópica<sup>25</sup>. Existe un consenso generalizado entre los científicos a este respecto. No obstante, existe un fuerte disenso al tratar la posible extrapolación de las propiedades cuánticas a la materia viviente y, en mayor grado, a la materia consciente. De un lado u otro, no hay duda de que la conciencia es un fenómeno radicalmente asociado a la materia y como tal, a falta de una hipótesis de trabajo mejor, debe explicarse de acuerdo con las evidencias científicas que presentamos. Pasamos, pues, a resumir brevemente dos descubrimientos relevantes recientes, que avalan la biogénesis cuántica y la evolución cuántica de la conciencia, en la línea de las ideas de Schrödinger y Weyl.

En 2007 se publicó en la prestigiosa revista *Nature* un artículo sobre la significativa interacción cuántica en un proceso vital tan destacado como la fotosíntesis<sup>26</sup>. Algunas bacterias fotótrofas contienen pigmentos fotosintéticos primarios asociados a proteínas FMO<sup>27</sup> —como los existentes en plantas, algas y cianobacterias— capaces de absorber la luz solar y producir un movimiento energético ondulatorio altamente eficiente para su transformación instantánea en la energía química indispensable de los procesos biofísicos. En este proceso sostenido a bajas temperaturas (100 K), un comportamiento cuántico coherente de electrones regula la extraordinaria transducción de energía. Los electrones funcionan conjuntamente produciendo señales puramente cuánticas (*quantum beatings*), que resultan de sus oscilaciones coherentes colectivas a partir de la luz solar. A diferencia de la descripción clásica de la fotosíntesis, en este experimento se remarca un proceso cuántico colectivo de alta eficiencia energética. El comportamiento ondu-

<sup>25</sup> Para una exposición ampliamente desarrollada de los fenómenos macroscópicos cuánticos puede consultarse la tesis doctoral de BÉJAR, M., *La naturaleza física de la conciencia* (Universidad Comillas, 2009).

<sup>26</sup> Cf. ENGEL, G., *et al.*, «Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthesis systems», *Nature* 446 (2007) 782-786.

<sup>27</sup> Cf. OLSON, J. M., «The FMO protein», *Photosynthesis Research* 80 (2004) 181-187.

torio campal de los electrones permite explorar globalmente todas las alternativas físicas de transducción hasta encontrar la que minimiza la degradación energética en el transporte de energía entre sistemas moleculares. El tiempo de decoherencia de estos pulsos cuánticos de energía (500 fs) es muy corto en términos biológicos, pero sostenido en comparación con la coherencia electrónica puramente física. Se sigue, pues, que ciertas estructuras biológicas consiguen incrementar el tiempo de los *latidos cuánticos*.

En la línea de las predicciones de Schrödinger parece cumplirse que la vida surgió del aprovechamiento de las propiedades cuánticas colectivas en sistemas complejos. Conforme avanzó la complejidad y el desarrollo estructural de los sistemas vivos, los procesos cuánticos produjeron la emergencia de nuevas leyes biológicas que terminaron por dominar clásicamente la dinámica de los seres vivos. Sin embargo, pensamos plausible que se formaran pequeños nichos biológicos donde sobrevivieran efectos cuánticos reguladores de la sensibilidad-conciencia en los seres vivos. Estos efectos serían especialmente dominantes en la formación de los estados de conciencia. De esta manera, la evolución se aprovecharía de la cooperación cuántico-clásica para activar la conciencia, en un proceso psicobiofísico que, acorde con las ideas emergentistas de Weyl, es irreducible a la mera suma de las partes.

Como aplicación de la actividad microscópica en el cerebro destacamos la posibilidad de inhibir temporalmente<sup>28</sup> o potenciar<sup>29</sup> la actividad neuronal mediante el uso de proteínas de microorganismos. Recientemente, los neurocientíficos han descubierto un tipo de proteínas en bacterias y hongos que, insertadas en la red neuronal, pueden activarse o desactivarse con pulsos de luz visible<sup>30</sup>. El silencio neural se induce instantáneamente con un fogonazo y es fácilmente reversible al remitir la luz en unos pocos milisegundos. Ya era conocido desde la Antigüedad que algunos agentes químicos como las drogas servían de anestésicos. Igualmente, se sabía que es posible anestesiarse una región cerebral mediante las modernas técnicas físicas de magnetoencefalografía. Ahora, también es posible apagar el cerebro con luz. La anestesia lumínica es el resultado de una investigación que combina genética y técnicas ópticas de control neurológico (optogenética). Se manipulan genéticamente las neuronas de un ratón vivo para que, al iluminarla, una determinada proteína fotosensible funcione bombeando protones a través de la membrana neuronal y altere el potencial eléctrico del medio interneuronal, impidiendo así la emergencia del potencial de acción.

La conciencia se desvanece si falla el funcionamiento biofísico del cerebro. Cada noche se pierde por un tiempo la conciencia al finalizar la etapa de vigi-

<sup>28</sup> Cf. ZHANG, F., *et al.*, «Multimodal fast optical interrogation of neural circuitry», *Nature* 446 (2007) 633-639.

<sup>29</sup> Cf. HÄUSSER, M. - SMITH, S. L., «Neuroscience: Controlling neural circuits with light», *Nature* 446 (2007) 617-619.

<sup>30</sup> Cf. CHOW, B., *et al.*, «High-performance genetically targetable optical neural silencing by light-driven proton pumps», *Nature* 463 (2010) 98-102.

lia. Los anestésicos privan de conciencia a los pacientes. Las drogas inducen estados de conciencia alterados. Campos magnéticos localizados funcionan como anestésicos físicos equivalentes. Pulsos luminosos regulan la actividad consciente. Es evidente la relevancia de los procesos físicos en la emergencia y sustentación de la conciencia. Futuros experimentos permitirán manipular a placer la dinámica de las redes neurales involucradas en las sensaciones, cogniciones y emociones, que integran los estados de conciencia.

## 5. CONCLUSIÓN

Schrödinger y Weyl no pudieron conocer algún experimento que avalara sus intuiciones físicas sobre la repercusión de los procesos cuánticos en el origen de la vida y la conciencia. Las evidencias empíricas de la actualidad son aún insuficientes para determinar con garantía científica que la vida y la conciencia son productos emergentes de la evolución cuántica de la materia. No obstante, sus propuestas marcan un estilo de hacer ciencia que promueve una cosmovisión racional, unitaria e innovadora desde los presupuestos científicos más fundamentales, aprovechando unos pocos indicios experimentales. Hacer ciencia de esta manera no es rentable en la sociedad actual donde priman los intereses económicos, los avances tecnológicos y las investigaciones a corto plazo con efectos sociales inmediatos. Aunque resulta socialmente razonable que los gastos en ciencia reviertan eficientemente en la sociedad, la investigación básica y la reflexión científico-metafísica son necesarias para mantener una hoja de ruta en el desarrollo social. Un avance ciego de las tecnociencias, ajeno a una visión humanista de la realidad, no produce bienestar social, sino una severa fragmentación de la ciencia al servicio de intereses puramente comerciales.

Los trabajos de madurez de Schrödinger y Weyl, propios del hombre de ciencia y pensamiento que ha alcanzado una visión global y unitaria de la realidad, ofrecen simultáneamente una cosmovisión científica, al tiempo que recogen un sustancioso conjunto de intuiciones acerca del futuro de la investigación —nuestro presente—, resultantes de una profunda reflexión filosófica de los datos y teorías científicas. De esta reflexión destacan la idea de un campo físico unificador descrito geoméricamente, la necesidad de trascender el estricto formalismo axiomático abriéndose a un intuicionismo más condescendiente con el funcionamiento cognitivo de la mente y, consecuentemente, la búsqueda de una explicación causal de los fenómenos compatible con el indeterminismo cuántico. Schrödinger destaca por su tendencia a enraizar radicalmente la vida en el corazón de los procesos biofísicos cuánticos. La vida emerge de la actividad cuántica de la materia y evoluciona al son de presión energética del medio, hasta hacerse consciente de su propia evolución. Igualmente, Weyl insiste en la necesidad de explicar la vida y la mente desde la esencia geométrica cuántica de lo microscópico. En este proceso emergente del caos cuántico

tico al orden de macroestructuras biofísicas, destaca la presencia de un factor ontológico, causal e indeterminista, que mantenga el isomorfismo entre el fenómeno y su esencia: entre la neurología de la conciencia y la primitiva raíz material.

Universidad Comillas  
Cátedra Ciencia, Tecnología y Religión  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
c/ Alberto Aguilera, 23. 28015 Madrid

MANUEL BÉJAR

[Artículo aprobado para publicación en noviembre de 2009]