

Erwin Schrödinger

¿QUÉ ES LA VIDA?



METATEMAS

LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

¿Viola la vida las leyes de la física? ¿Las respeta, en cambio, aunque no encuentre en ellas la explicación de su existencia y de su evolución? ¿Faltan aún leyes en la física, precisamente las necesarias para describir la vida? ¿Qué es lo característicamente vivo? O dicho más simplemente, **¿qué es la vida?** Quizá sea ésta la pregunta primera, elemental, fundamental, de nuestra existencia, una pregunta que surge con impresionante sencillez, pero que, por la complejidad científica y filosófica que plantea, ha sido siempre motivo de interminables polémicas.

La intención de **Erwin Schrödinger** en este libro es doble: por una parte, apunta hacia un fin científico, procurando acercar el concepto de orden termodinámico al de complejidad biológica, y, por otra, irrumpiendo de lleno en el campo de la filosofía, vuelve a levantar la cuestión del determinismo y el azar frente a conceptos como la libertad, la responsabilidad individual o la creatividad... Y todo ello lo expone con diáfana claridad, de modo que toda persona preparada, aunque no especializada, pueda captar perfectamente la esencia misma de sus investigaciones y de su pensamiento.

¿Qué es la vida? se publicó por primera vez en 1944, y es fruto de una serie de conferencias dictadas por el autor en el Institute for Advanced Studies del Trinity College de Dublín, en febrero de 1943. El revuelo que levantó en su momento entre científicos y pensadores todavía no ha cesado, por lo que ya es considerado, unánimemente, un clásico en la materia.

PREFACIO

Homo liber nulla de re minus quam de morte cogitat; et ejus sapientia non mortis sed vitae meditatio est.^[1]

Spinoza, *Ética*, P. IV. prop. 67

El científico debe poseer un conocimiento completo y profundo, de primera mano, de ciertas materias. En consecuencia, por lo general, se espera que no escriba sobre tema alguno en el cual no sea experto, siguiendo una conducta de *noblesse oblige*. Sin embargo, por esta vez, pido poder renunciar a la «nobleza» y quedar dispensado de las consiguientes obligaciones. Mi excusa es ésta: Hemos heredado de nuestros antepasados el anhelo profundo de un conocimiento unificado y universal. El mismo nombre, dado a las más altas instituciones de enseñanza, nos recuerda que, desde la Antigüedad y a través de los siglos, el aspecto *universal* de la ciencia ha sido el único que ha merecido un crédito absoluto. Pero la propagación, tanto en profundidad como en amplitud, de las múltiples ramas del conocimiento humano durante los últimos cien años nos ha enfrentado con un singular dilema. Por un lado, sentimos con claridad que solo ahora estamos empezando a adquirir material de confianza para lograr soldar en un todo indiviso la suma de los conocimientos actuales. Pero, por el otro, se ha hecho poco menos que imposible para un solo cerebro

dominar completamente más que una pequeña parte especializada del mismo. Yo no veo otra escapatoria frente a ese dilema (si queremos que nuestro verdadero objetivo no se pierda para siempre) que la de proponer que algunos de nosotros se aventuren a emprender una tarea sintetizadora de hechos y teorías, aunque a veces tengan de ellos un conocimiento incompleto e indirecto, y aun a riesgo de engañarnos a nosotros mismos.

Sea esta mi justificación. Las dificultades de lenguaje son importantes. El habla nativa de cada uno es como un traje hecho a medida; nadie se siente cómodo cuando no puede emplearlo y tiene que sustituirlo por otro. Debo dar las gracias al doctor Inkster (Trinity College, Dublín), al doctor Padraig Browne (St. Patrick's College, Maynooth) y, por último, aunque no el menos importante, al señor S. C. Roberts. Todos ellos tuvieron grandes problemas para ajustarme el nuevo traje y, especialmente, para vencer mi ocasional resistencia a renunciar a alguno de mis «originales» modismos. Si, a pesar de todo, alguno de estos ha sobrevivido a las tendencias atenuantes de mis amigos, soy yo, y no ellos, el único culpable.

En un principio, los títulos de las numerosas secciones estaban destinados a servir de resúmenes marginales; el texto de cada capítulo debería leerse sin interrupciones.

Erwin Schrödinger

Dublín, septiembre de 1944

CAPÍTULO 1

PERSPECTIVA DESDE LA FÍSICA CLÁSICA

Cogito, ergo sum
Descartes

1.1. Características generales y propósito de la investigación

Este pequeño libro es el resultado de una serie de conferencias pronunciadas por un físico teórico ante un auditorio de unas cuatrocientas personas, número que no mermó apreciablemente a pesar de haber sido advertido desde un principio de que el tema resultaría difícil y de que las conferencias no serían precisamente populares, incluso renunciando a utilizar el arma más temida del físico, la deducción matemática. No es que el tema fuera lo bastante sencillo como para explicarlo sin recurrir a las matemáticas; más bien al contrario, resultaba excesivamente complejo para ser plenamente accesible a esa ciencia. Otra característica, que al menos prestaba una apariencia de popularidad al asunto, fue la intención del conferenciante de exponer claramente al físico y al biólogo la idea fundamental, que oscila entre la Biología y la Física.

Porque, en efecto, a pesar de la variedad de temas implicados, toda la empresa pretende transmitir una sola

idea: hacer un breve comentario a un problema amplio e importante. Con el objeto de no desviarnos de nuestro camino, puede ser útil presentar de antemano un breve esbozo del plan que vamos a seguir.

El problema vasto, importante y muy discutido, es éste:

¿Cómo pueden la Física y la Química dar cuenta de los fenómenos espacio-temporales que tienen lugar dentro de los límites espaciales de un organismo vivo?

La respuesta preliminar que este librito intentaría exponer y asentar puede resumirse así:

La evidente incapacidad de la Física y la Química actuales para tratar tales fenómenos no significa en absoluto que ello sea imposible.

1.2. Física estadística. La diferencia fundamental en estructura

Esta observación sería muy trivial si lo único que pretendiera fuese alimentar la esperanza de lograr en el futuro lo que no se ha conseguido en el pasado. Pero su sentido es mucho más positivo, porque esta incapacidad, hasta el presente, está ampliamente justificada.

Hoy en día, gracias al ingenioso trabajo realizado durante los últimos treinta o cuarenta años por los biólogos, especialmente por los genetistas, se conoce lo suficiente acerca de la estructura material y del funcionamiento de los organismos para afirmar que, y ver exactamente por qué, la Física y la Química actuales no pueden explicar lo que sucede en el espacio y en el tiempo dentro de un organismo vivo.

La disposición de los átomos en las partes más esenciales de un organismo, y su mutua interacción, difieren de modo fundamental de todos aquellos casos que hasta ahora han ocupado, teórica o experimentalmente, a físicos y químicos. Ahora bien, la diferencia que yo acabo de deno-

minar fundamental tiene tal naturaleza que fácilmente podría parecer insignificante a todo aquel que no sea físico, y que no esté, por tanto, profundamente compenetrado con el conocimiento de que las leyes físicas y químicas son esencialmente estadísticas.^[2] Es en relación con el punto de vista estadístico donde la estructura de las partes esenciales de los organismos vivos se diferencia de un modo absoluto de cualquier otra porción de materia que nosotros, físicos y químicos, hayamos manejado físicamente en nuestro laboratorio o mentalmente frente a nuestro escritorio. Resulta casi inimaginable que las leyes y regularidades así descubiertas puedan aplicarse inmediatamente al comportamiento de sistemas que no presentan la estructura en la que están basadas esas leyes y regularidades.^[3]

No puede esperarse que alguien ajeno a la física capte el sentido (y mucho menos aprecie el alcance) de esta diferencia en la *estructura estadística* si se expresa, como yo lo he hecho, en unos términos tan abstractos. Con el fin de dar vida y color a la afirmación, permítaseme anticipar lo que será explicado posteriormente con mucho más detalle, concretamente, que la parte más esencial de una célula viva (la fibra cromosómica) puede muy bien ser denominada un *crystal aperiódico*. En Física, solo hemos tratado hasta ahora con *crystalas periódicos*. Para la mente de un humilde físico, estos últimos son objetos muy complicados e interesantes; constituyen una de las más complejas y fascinantes estructuras materiales que confunden su comprensión de la naturaleza, pero, comparados con el cristal aperiódico, resultan bastante sencillos y aburridos. La diferencia entre ambas estructuras viene a ser como la existente entre un papel pintado de pared, en el que el mismo dibujo se repite una y otra vez en períodos regulares, y una obra maestra del bordado, por ejemplo, un tapiz de Rafael, que no presenta una repetición tediosa, sino un diseño elaborado, coherente y lleno de sentido, trazado por el gran maestro.

Cuando hablo del cristal periódico como uno de los objetos de investigación más complejos, me refiero a la Física propiamente dicha. La Química orgánica, en efecto, al tratar moléculas cada vez más complicadas, se ha acercado mucho más al «cristal aperiódico» que, en mi opinión, es el portador material de la vida. Por esta razón, no es sorprendente que el químico orgánico haya contribuido ya de modo amplio e importante al problema de la vida, mientras que el físico apenas haya aportado nada.

1.3. La perspectiva del físico ingenuo

Una vez esbozada brevemente la idea general de nuestra investigación (o más exactamente su objetivo último), procedamos a describir la línea de ataque.

Propongo desarrollar en primer lugar lo que podríamos llamar «las ideas del físico ingenuo sobre los organismos», es decir, las ideas que podrían surgir en la mente del físico que, después de haber aprendido su física y, más especialmente, la fundamentación estadística de su ciencia, empieza a pensar en los organismos y en como funcionan y se comportan, llegando a preguntarse conscientemente si él, basándose en lo que ha aprendido, puede hacer alguna contribución relevante al problema desde el punto de vista de su ciencia, tan simple, clara y modesta en comparación.

Resultará que sí puede hacerlo. El caso siguiente deberá ser comparar sus anticipaciones teóricas con los hechos biológicos. Pero, entonces, resultará que sus ideas (a pesar de parecer bastante razonables en conjunto) necesitan ser reestructuradas sustancialmente. De esa manera, iremos acercándonos al punto de vista correcto o, para decirlo con más modestia, al que yo propongo como correcto.

Aun en el caso de tener razón en este sentido, no sé si mi manera de plantearlo es la mejor y la más sencilla. Pero, en resumen, es la mía. El *físico ingenuo* soy yo mismo. Y no

sabría encontrar otro camino hacia esa meta mejor o más claro que el tortuoso que yo he encontrado.

1.4. ¿Por qué son tan pequeños los átomos?

Un buen método para desarrollar *las ideas del físico ingenuo* consiste en partir de una pregunta curiosa, casi ridícula: ¿por qué son tan pequeños los átomos? De entrada, diremos que efectivamente son muy pequeños. Cualquier trozo de materia que manejamos en la vida cotidiana contiene un enorme número de ellos. Se han imaginado muchos ejemplos para familiarizar al público con esta idea, pero ninguno es más impresionante que el empleado por lord Kelvin: supongamos que pudiéramos marcar las moléculas de un vaso de agua; vertamos entonces el contenido del vaso en el océano y agitemos de forma que las moléculas marcadas se distribuyan uniformemente por los siete mares; si después llenamos un vaso de agua en cualquier parte del océano, encontraremos en él alrededor de un centenar de moléculas marcadas.^[4]

El tamaño real de los átomos^[5] está entre $1/5000$ y $1/2000$ de la longitud de onda de la luz amarilla. La comparación es significativa, ya que la longitud de onda indica, aproximadamente, las dimensiones del grano más pequeño observable con el microscopio. De esta manera, se comprueba que un grano de este tipo contiene todavía miles de millones de átomos.

1.5. Pues bien, ¿por qué son tan pequeños los átomos?

Es evidente que la pregunta es una evasiva porque no se trata, de hecho, del tamaño de los átomos, sino que se refiere al tamaño de los organismos, particularmente a nuestro ser corporal. Por supuesto que el átomo es peque-

ño, si nos referimos a nuestra unidad cívica de medida, sea la yarda o el metro. En Física atómica, se acostumbra a usar el Angstrom (abreviado Å) que es la diez mil millonésima ($1/10^{10}$) parte de un metro, o en notación decimal 0,0000000001 metros. Los diámetros atómicos oscilan entre 1 y 2 Å. Esas unidades cívicas (en relación con las cuales los átomos son tan pequeños) están estrechamente relacionadas con el tamaño de nuestros cuerpos. Existe una leyenda que remonta el origen de la yarda al capricho de un rey inglés al que sus consejeros preguntaron acerca de la unidad de medida que convenía adoptar; el rey, entonces, abrió los brazos diciendo: «Tomad la distancia desde el centro de mi pecho hasta la punta de mis dedos; y esa será la medida que necesitáis». Verdadero o falso, este relato tiene significado para nuestro propósito. El rey indicaría, naturalmente, una longitud comparable con la de su propio cuerpo, sabiendo que otra cosa no sería práctica. Con toda su predilección por el Angstrom, el físico prefiere que le digan que, para su nuevo traje, necesita seis yardas y media en lugar de sesenta y cinco mil millones de Angstroms de tela.

Una vez visto que nuestro problema se refiere realmente a la relación de dos longitudes (la de nuestro cuerpo y la del átomo) con una incontestable prioridad de existencia independiente por parte del átomo, la pregunta de hecho es: ¿por qué han de ser tan grandes nuestros cuerpos comparados con el átomo?

Imagino que más de un entusiasta estudiante de Física o Química habrá lamentado el hecho de que cada uno de nuestros órganos sensoriales, que forman una parte más o menos importante de nuestro cuerpo y, en consecuencia, están compuestos a su vez por innumerables átomos (en vista de la magnitud de la mencionada relación), resultan demasiado toscos para ser afectados por el impacto de un solo átomo. No podemos ver, sentir u oír un átomo. Nuestra hipótesis sobre ellos difiere ampliamente de los datos

obtenidos con nuestros burdos órganos sensoriales y no pueden someterse a pruebas de inspección directa.

¿Debe ser esto así? ¿Existe alguna razón intrínseca para ello? ¿Podemos remontar este estado de cosas a algún tipo de principio, con el fin de cerciorarnos y comprender por qué ninguna otra cosa es compatible con las leyes de la Naturaleza?

Por una vez, este es un problema que el físico puede aclarar completamente. La respuesta a todas estas interrogaciones es afirmativa.

1.6. El funcionamiento de un organismo requiere leyes físicas exactas

De no ser así, si fuéramos organismos tan sensibles que un solo átomo, o incluso unos pocos, pudieran producir una impresión perceptible en nuestros sentidos, ¡cielos, como sería la vida! Por ejemplo: un organismo de este tipo con toda seguridad no sería capaz de desarrollar el tipo de pensamiento ordenado que, después de pasar por una larga serie de estados previos, finalmente desemboca en la formación, entre otras muchas, de la idea de átomo.

Al margen de que seleccionemos este punto en concreto, las consideraciones que siguen podrían aplicarse también al funcionamiento de otros órganos además del cerebro y del sistema sensorial. Claro está que la única cosa realmente importante respecto a nosotros mismos es que sentimos, pensamos y percibimos. Con respecto al proceso fisiológico responsable de los sentidos y del pensamiento, los demás entes desempeñan un papel auxiliar, por lo menos desde el punto de vista humano, aunque no desde el de la Biología estrictamente objetiva. Además, nos facilitará mucho el trabajo elegir para la investigación el proceso que va estrechamente acompañado por acontecimientos subjetivos, incluso aunque desconozcamos la verdadera natura-

leza de este estrecho paralelismo. En realidad, me parece que está situado fuera del ámbito de la ciencia natural y, muy probablemente, incluso fuera del alcance del entendimiento humano.

Nos enfrentamos, por tanto, con la siguiente pregunta: ¿por qué un órgano como nuestro cerebro, con su sistema sensorial asociado debe necesariamente estar constituido por un enorme número de átomos para que pueda existir una correspondencia íntima entre su variable estado físico y un pensamiento altamente desarrollado? ¿Por qué motivo es incompatible la función de dicho órgano (como un todo o como alguna de sus partes periféricas con las cuales interrelaciona directamente el ambiente) con la posibilidad de ser un mecanismo suficientemente refinado y sensible como para registrar el impacto de un átomo individual del exterior?

La razón es que lo que llamamos pensamiento 1) es en sí algo ordenado y 2) solo puede aplicarse a un tipo de material, como son percepciones o experiencias, que tengan cierto grado de regularidad. Esto tiene dos consecuencias. En primer lugar, una organización física, para estar en estrecha correspondencia con el pensamiento (como mi cerebro lo está con mi pensamiento), debe ser una organización muy ordenada, y esto significa que los acontecimientos que suceden en su interior deben obedecer leyes físicas estrictas, al menos hasta un grado de exactitud muy elevado. En segundo lugar, las impresiones físicas que recibe este sistema físicamente bien organizado de otros cuerpos del exterior se deben evidentemente a la percepción y experiencia del pensamiento correspondiente, constituyendo lo que he denominado su material. En consecuencia, las interacciones físicas entre otros sistemas y el nuestro deben poseer, por regla general, cierto grado de ordenación física, es decir, que también ellos deben someterse con cierta exactitud a leyes físicas rigurosas.

1.7. Las leyes físicas se basan en la estadística atómica y, por lo tanto, son solo aproximadas

¿Por qué no pueden cumplirse todas estas condiciones en el caso de un organismo compuesto únicamente por un número discreto de átomos y sensible ya al impacto de uno o algunos pocos átomos?

El motivo radica en que, como sabemos, todos los átomos siguen continuamente un movimiento térmico completamente desordenado y hace imposible que los acontecimientos que tienen lugar entre un reducido número de átomos puedan ser unificados en unas leyes comprensibles. Solo a partir de la cooperación de un número enorme de átomos las leyes estadísticas empiezan a ser aplicables, controlando el comportamiento de estos *conjuntos* con una precisión que aumenta en la medida que aumenta la cantidad de átomos que intervienen en el proceso. De esta manera, los acontecimientos toman un aspecto realmente ordenado. Todas las leyes físicas y químicas que desempeñan un papel importante en la vida de los organismos son de tipo estadístico: cualquier otro tipo de ordenación que pueda imaginarse está perpetuamente perturbado y hecho inoperante por el movimiento térmico incesante de los átomos.

1.8. El gran número de átomos que interviene es la base de su precisión. Primer ejemplo (paramagnetismo)

Intentaré ilustrar esto mediante algunos ejemplos, escogidos más o menos al azar entre varios miles. Probablemente no sean los más apropiados para atraer al lector que esté aprendiendo esta propiedad de las cosas por primera vez, una propiedad que, para la Física y la Química modernas, es tan fundamental como, por ejemplo, para la Biología el

hecho de que los organismos estén compuestos de células, o como la ley de Newton en Astronomía o, incluso, la serie de los enteros, 1, 2, 3, 4, 5,... para las Matemáticas. Un profano no debe esperar que las pocas páginas que siguen le aporten una comprensión completa de este tema, que va unido a los nombres ilustres de Ludwig Boltzmann y Willard Gibbs y es tratado en los libros de texto bajo la denominación de *termodinámica estadística*.

Si llenamos un tubo oblongo de cuarzo con oxígeno, y lo sometemos a un campo magnético, el gas queda magnetizado.^[6] La magnetización se debe a que las moléculas de oxígeno son pequeños imanes que tienden a orientarse paralelamente al campo magnético, como una brújula. Pero no se debe pensar que realmente se ponen todas paralelas, ya que, si duplicamos la intensidad del campo, obtendremos una magnetización doble en el mismo cuerpo de oxígeno, y esa proporcionalidad continúa hasta valores de campo muy altos, aumentando la magnetización en proporción a la intensidad del campo aplicado.

Éste es un ejemplo especialmente claro de una ley puramente estadística. La orientación que el campo magnético intenta provocar es contrarrestada de continuo por el movimiento térmico, que trata de imponer una orientación al azar. El efecto de esta tensión solo es, de hecho, una ligera preferencia por los ángulos agudos sobre los obtusos entre los ejes de los dipolos y la dirección del campo magnético. A pesar de que los átomos individuales cambian su orientación incesantemente, manifiestan por término medio (debido a su enorme número) una pequeña preponderancia constante de la orientación en la dirección del campo magnético, proporcional a la intensidad de éste. Esta ingeniosa explicación se debe al físico francés P. Langevin.

FIGURA 1. *Paramagnetismo*

Puede comprobarse de la siguiente forma: si la magnetización observada es realmente la resultante de dos tendencias opuestas, a saber, el campo magnético, el cual trata de poner todas las moléculas paralelas, y el movimiento térmico, el cual provoca la orientación al azar, entonces debería ser posible aumentar la magnetización debilitando el movimiento térmico, o lo que es lo mismo, disminuyendo la temperatura, en lugar de reforzar el campo. Experimentalmente se ha comprobado que la magnetización es inversamente proporcional a la temperatura absoluta, en concordancia cuantitativa con la teoría (ley de Curie). Los equipos modernos han hecho posible incluso que, disminuyendo la temperatura, se llegue a reducir el movimiento térmico a valores tan insignificantes que la tendencia orientadora del campo magnético puede imponerse, si no completamente, sí al menos lo suficiente como para producir una fracción sustancial de la «magnetización completa». En este caso, ya no esperamos que, al duplicar la intensidad del campo, se duplique la magnetización, sino que esta se incremente cada vez menos al aumentar el campo, acercándose a lo que se denomina «saturación». Esta suposición también ha sido confirmada cuantitativamente por los experimentos.

Téngase en cuenta que este comportamiento depende enteramente del gran número de moléculas que cooperan en la producción de la magnetización que, fluctuando en forma irregular de un segundo a otro, mostraría las vicisitudes del antagonismo entre movimiento térmico y campo magnético.

1.9. Segundo ejemplo (movimiento browniano, difusión)

Si llenamos de vapor, formado por minúsculas gotas, la parte inferior de un recipiente de cristal cerrado, veremos que el límite superior del vapor se hunde gradualmente