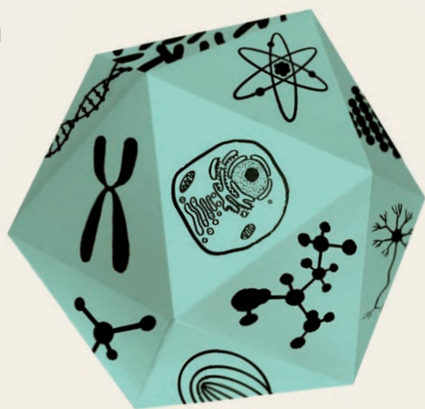


Erwin Schrödinger

¿Qué es la vida?

Premio Nobel de Física



«Este libro es una joya de muchas facetas: se lee en unas horas, pero resulta imposible olvidarlo.»

Scientific American

Erwin Schrödinger
¿QUÉ ES LA VIDA?

Traducción y notas de Ricardo Guerrero

TUSQUETS
EDITORES

Título original: *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*

1.^a edición en Tusquets Editores: marzo de 1983

1.^a edición en esta presentación: octubre de 2015

© Cambridge University Press 1944, 1945, 1948, 1951, 1955, 1962 y 1967

Traducción y notas de Ricardo Guerrero, catedrático de microbiología de la Universidad de Barcelona

Reservados todos los derechos de esta edición para

Tusquets Editores, S.A. - Avda. Diagonal, 662-664 - 08034 Barcelona

www.tusquetseditores.com

ISBN: 978-84-9066-168-0

Depósito legal: B. 18.576-2015

Impreso por Limpergraf, S.L.

Impreso en España

Queda rigurosamente prohibida cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación total o parcial de esta obra sin el permiso escrito de los titulares de los derechos de explotación.

Indice

P. 7 *Presentación*, de Jorge Wagensberg

13 Prefacio

15 **Perspectiva desde la Física clásica**

Características generales y propósitos de la investigación 17; Física estadística. La diferencia fundamental en estructura 18; La perspectiva del físico ingenuo 20; ¿Por qué son tan pequeños los átomos? 21; El funcionamiento de un organismo requiere leyes físicas exactas 23; Las leyes físicas se basan en la estadística atómica y, por lo tanto, son sólo aproximadas 25; El gran número de átomos que interviene es la base de su precisión. Primer ejemplo (paramagnetismo) 26; Segundo ejemplo (movimiento browniano, difusión) 28; Tercer ejemplo (límites de precisión en la medida) 33; La regla de la \sqrt{n} 34

37 **El mecanismo de la herencia**

La suposición del físico clásico, lejos de ser trivial, es errónea 39; El mensaje cifrado de la herencia (cromosomas) 41; Crecimiento del cuerpo por división celular (mitosis) 43; En la mitosis se duplica cada uno de los cromosomas 43; División reductora (meiosis) y fertilización (singamia) 44; Individuos haploides 45; La extraordinaria importancia de la división reductora 48; Tamaño máximo de un gen 51; Números pequeños 52; Permanencia 53

55 **Mutaciones**

Mutaciones discontinuas: material de trabajo de la selección natural 57; Las mutaciones se heredan perfectamente 59; Localización. Recesividad y dominancia 61; Introducción de un poco de lenguaje técnico 64; Efecto perjudicial de los cruces consanguíneos 65; Consideraciones históricas y generales 66; La mutación debe ser un acontecimiento poco frecuente 68; Mutaciones inducidas por los rayos X 68; Primera ley. La mutación es un acontecimiento aislado 68; Segunda ley. Localización del acontecimiento 71

75 **La evidencia según la mecánica cuántica**

Permanencia inexplicable por la Física clásica 77; Explicable por la teoría cuántica 79; Teoría cuántica. Estados discretos, saltos cuánticos 79; Moléculas

81; La estabilidad de las moléculas depende de la temperatura 82; Interludio matemático 83; Primera corrección 84; Segunda corrección 86

89 **Discusión y verificación del método de Delbrück**

Imagen general de la sustancia hereditaria 91; Unicidad de esta imagen 92; Algunos errores tradicionales de interpretación 93; Los diferentes «estados» de la materia 94; La distinción que en realidad importa 95; El sólido aperiódico 96; Variedad de contenido encerrada en la clave en miniatura 97; Comparación con los hechos: grado de estabilidad y discontinuidad en las mutaciones 98; Estabilidad de los genes seleccionados de forma natural 100; La menor estabilidad de los mutantes 100; La temperatura influye menos en los genes inestables que en los estables 101; Cómo producen mutaciones los rayos X 102; La eficacia de los rayos X no depende de la mutabilidad espontánea 103; Mutaciones reversibles 103

105 **Orden, desorden y entropía**

Una notable conclusión general del modelo 107; Orden basado en orden 108; La materia viva elude la degradación hacia el equilibrio 109; La vida se alimenta de su «entropía negativa» 110; ¿Qué es entropía? 112; Significado estadístico de la entropía 112; Organización mantenida extrayendo «orden» del entorno 114

117 **¿Está basada la vida en las leyes de la Física?**

Nuevas leyes que pueden esperarse en el organismo 119; Revisión de la situación biológica 120; Resumen de la situación física 121; El sorprendente contraste 122; Dos modos de producir orden 123; El nuevo principio no es ajeno a la Física 124; El movimiento de un reloj 126; El trabajo de un reloj es estático 127; Teorema de Nernst 128; El reloj de péndulo está virtualmente a temperatura cero 129; Relación entre mecanismo de relojería y organismo 129

131 **Epílogo**

Sobre el determinismo y el libre albedrío 133

139 **Algunas referencias recientes**

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 intentará 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.

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 denominar 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.¹ 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.²

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 *cristal aperiódico*. En Física, sólo hemos tratado hasta ahora con *cristales 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. Ahora bien, comparados con el cristal aperiódico, resultan bastante sencillos y aburridos. La diferencia entre ambas estructuras viene a ser como la que encontramos entre un papel pintado de la pared, en el que el mismo dibujo se repite una y otra vez en períodos regulares, y una obra maestra del bordado,

1. Esta afirmación puede parecer excesivamente general. La discusión al respecto debe ser aplazada hasta el final de este libro.

2. Este punto de vista ha sido destacado en dos artículos sumamente sugeridores de F. G. Donnan en «Scientia», XXIV, n.º 78 (1918), p. 10 («La science physico-chimique décrit elle d'une façon adéquate les phénomènes biologiques?») y en «Smithsonian Report for 1929», p. 309 («The mystery of life»).

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.

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 cómo 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 esta manera, iremos acercándonos al pun-

to 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.

¿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.³

El tamaño real de los átomos ⁴ está entre 1/5000

3. Naturalmente no encontraríamos exactamente cien (aun cuando éste fuera el resultado exacto del cálculo). Podríamos encontrar 88 ó 95 ó 107 ó 112, pero muy difícilmente tan pocas como 50 ó tantas como 150. Se debe esperar una «desviación» o «fluctuación» del orden de la raíz cuadrada de 100, es decir 10. El estadístico expresa esto diciendo que encontramos 100 ± 10 . Este comentario puede dejarse a un lado por ahora, pero lo citaremos más adelante, porque ofrece un ejemplo de la ley estadística de la \sqrt{n} .

4. De acuerdo con los puntos de vista actuales, un átomo no posee límites exactos, de modo que su «tamaño» no es una

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.

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 propio ser corporal. Por supuesto que el átomo es pequeño, si nos referimos a nuestra unidad cívica de medida, sea la yarda o el metro. En Física atómica, se acostumbra a usar el Angström (abreviado A) que es la diez mil millonésima ($1/10^{10}$) parte de un metro, o en notación decimal 0, 000 000 00001 metros. Los diámetros atómicos oscilan entre 1 y 2A. 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 Angström, el físico prefiere que le digan que, para su nuevo traje, necesita seis yardas y

concepción bien definida. Pero podemos identificar ese concepto (o bien sustituirlo) por la distancia que separa los centros de los átomos en un sólido o en un líquido —pero no, por supuesto, en un gas, donde la distancia, en condiciones normales de presión y temperatura, es aproximadamente diez veces mayor.

media en lugar de sesenta y cinco mil millones de Angströms 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. Nuestras hipótesis sobre ellos difieren 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. éste es un problema que el físico puede aclarar completamente. La respuesta a todas estas interrogaciones es afirmativa.

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, cómo sería la vida! Por ejemplo: un organismo de este tipo con toda seguridad no sería capaz de desarrollar el tipo de pensamiento or-

denado 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 naturaleza 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) sólo 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 corresponden-

cia 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.

Las leyes físicas se basan en la estadística atómica y, por lo tanto, son sólo 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 ordenado y hace imposible que los acontecimientos que tienen lugar entre un reducido número de átomos puedan ser unificados en unas leyes comprensibles. Sólo 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 perpetua-

mente perturbado y hecho inoperante por el movimiento térmico incesante de los átomos.

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.⁵ 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.

5. Se ha escogido un gas porque es más simple que un sólido o un líquido: el hecho de que, en este caso, la magnetización sea extremadamente débil no afecta las consideraciones teóricas.