

ONE PLUS ONE EQUALS ONE. SYMBIOSIS AND THE EVOLUTION OF COMPLEX LIFE

Por John Archibald. Oxford University Press, Oxford, 2014.

Simbiosis

Una perspectiva revolucionaria de la vida y su historia

Nos encontramos en medio de una revolución científica construida sobre nuestro conocimiento del ADN, el material hereditario de la vida. Auxiliados por las herramientas de la biología molecular, sondeamos el mundo entorno y nos aprovechamos del mismo de una manera impensable decenios atrás. ¿Necesitamos identificar una bacteria y seguir su rastro en un brote hospitalario? En 24 horas podemos obtener el perfil genético completo del germen desencadenante. ¿Nos interesa saber la constitución de nuestros parientes neandertales? Los paleoantropólogos han abordado la cuestión con muestras de ADN extraídas de huesos fósiles. Introducimos ADN humano en *Escherichia coli* para que la enterobacteria fabrique insulina.

En torno a 1970, Paul Berg y Janet Mertz infectaron *E. coli* con un virus creado artificialmente, a partir de virus de *E. coli* y del virus SV40, un virus de los simios. Se sabía que, en la naturaleza, los virus mediaban la transferencia de genes entre bacterias. A Berg le interesaba resolver la cuestión de si un sistema de transferencia de genes mediada por virus se daba también en las células de mamífero. El virus creado debía explorar esa posibilidad. También era importante averiguar si podía infectar a *E. coli*. Varios colegas plantearon su preocupación por las consecuencias. *E. coli* es un componente natural de la flora bacteriana de nuestro intestino. ¿Qué pasaría si el virus quimérico se escapaba del laboratorio y causaba una epidemia oncológica? Berg creía que semejante posibilidad era muy remota. Con todo, los experimentos se suspendieron hasta disponer de pruebas contundentes.

Berg y Metz no fueron los únicos en crear moléculas quiméricas de ADN. Stanley Cohen y Herbert Boyer habían estado

experimentando con la inserción de ADN foráneo en plásmidos (moléculas de ADN circulares que se dan en células bacterianas) de *E. coli*. En 1973 anunciaron que un gen de ARN ribosómico extraído de rana se había clonado e integrado en *E. coli*. Las posibilidades que ello presentaba para la investigación básica y aplicada resultaron inmensas.

La ciencia del ADN ha renovado, entre otras, nuestra interpretación de las relaciones entre organismos. Todos los seres vivos, de los microorganismos a los humanos, comparten un origen común. Nos hemos acercado a la historia inicial de la vida y hemos adquirido cierto conocimiento sobre la aparición de las células complejas, las eucariotas, hace dos mil millones de años. La evolución ha ido combinando y conjuntando los componentes moleculares de la vida. Cuando los biólogos moleculares se adentraron en la selva microbiana descubrieron todo un mundo primigenio, las arqueas. Y descifraron claves, en el ADN de las células eucariotas, que apuntaban a una mezcla de bacterias de vida libre.

La célula eucariota, compleja, evolucionó a partir de células procariotas, más simples. Una transición que persiste envuelta en el misterio. La endosimbiosis, la forma más acabada de la simbiosis, desempeñó un papel motor. En particular, a la endosimbiosis se debió la incorporación de mitocondrias y cloroplastos. Las mitocondrias fueron en otro tiempo bacterias de vida libre. Dígase lo propio de los cloroplastos de las células vegetales. Introducida así la fotosíntesis oxigénica en los eucariotas, lo que siguió fue una cadena de acontecimientos que condujeron a la transformación de los océanos, los continentes y la atmósfera. Nuestras células son quimeras, formadas a través

de la amalgama de dos tipos de células simples, una en el interior de otra. Las células complejas que componen animales y plantas son el resultado de fusiones simbióticas que se han ido presentando a lo largo de la historia de la vida.

La simbiosis (la vida conjunta de formas de vida distinta) es un fenómeno común en la naturaleza. Encierra la clave para comprender el salto en la complejidad celular que condujo al desarrollo de los eucariotas. Los científicos están descubriendo ejemplos de fusiones simbióticas sucesivas, con organismos incluidos en otros organismos. La biología molecular está demostrando que la historia de la vida es mucho más compleja de lo que nos habíamos imaginado.

El concepto de simbiosis arranca del trabajo de Simon Schwender (1829-1919), Antón de Bary (1831-1888) y Albert Frank (1839-1900). Los dos primeros tomaron a los líquenes como organismo de investigación; a las micorrizas el tercero. Los líquenes suelen crecer sobre superficies estables que reciben un adarme de luz solar. Constan de un talo, red estratificada filamentosa fúngica con células algales en su interior. Esta asociación entre alga y hongo ha evolucionado a lo largo de quinientos millones de años. La simbiosis de hongos y raíces de plantas forma micorrizas. Hasta el 90 por ciento de las plantas superiores establecen simbiosis micorrízicas. Se supone que las algas verdes no hubieran colonizado nunca tierra firme, sin la ayuda de los hongos.

Debemos a Constantin Mereschkowsky (1855-1921) el primer trabajo elaborado sobre endosimbiosis, en particular de los cloroplastos. Combinando conceptos de biología vegetal y de biología algal con ideas de simbiosis, desarrolló la tesis de la *simbiogénesis*, que definía el origen de organismos a través de la conjunción y unificación de dos o más individuos. En esa idea endosimbionte abundó Andreas Schimper, quien planteó la posibilidad de ese origen de los cloroplastos. En lo concerniente a las mitocondrias, Paul Portier no pensó que procedieran de bacterias, sino que eran bacterias en el interior celular. Publicó en 1918 *Les symbiotes*, cuya tesis, aberrante, muy pronto quedó desmentida: las células complejas dependerían de simbiotes bacterianos.

Hasta quince intentos, por lo menos, realizó Lynn Margulis antes de ver publicada su hipótesis en 1967 en el *Journal of Theoretical Biology* sobre el origen bacteriano de las mitocondrias. Mar-

gulis propuso también que los flagelos eucariotas se adquirieran por simbiosis con bacterias espiroquetas. Más tarde, defendería que los simbioses formados a partir de organismos genéticamente distintos explicarían el proceso de especiación. En 1967 Jostein Goksoyr publicó en *Nature* una filogenia en la que los eucariotas derivaban de asociaciones simbióticas entre múltiples linajes procariontes. Philip John y Bob Whatley señalaron, en 1975, que la bacteria aeróbica del suelo *Paracoccus denitrificans* presentaba una serie de rasgos de su respiración celular que remedaban la función de las mitocondrias, y realizaron ensayos con el fin de descubrir el curso evolutivo de la conversión de bacteria de vida libre en mitocondria.

La aloploidización es la combinación de genomas procedentes de dos especies diferentes. Ha constituido fuente principal de innovación evolutiva y motor de especiación y adaptación ambiental. En el reino vegetal contribuyó en medida importante a la domesticación de las plantas. Se da por cierto que la aloploidización ocurrió a través de procesos de hibridación entre especies, acompañados o seguidos por duplicación genómica. Aunque muchos aloploidos surgieron de especies estrechamente emparentadas (congéneres), existen otras especies aloploidos que emergieron a partir de especies progenitoras más distantes, pertenecientes a géneros e incluso a tribus diferentes.

Abundan en la naturaleza las bacterias que experimentan tasas elevadas de mutaciones, lo mismo en las poblaciones naturales que en las multiplicadas en el laboratorio. Una de las causas inductoras de la presión de selección es la evolución antagonista con los parásitos. En 2007 se demostró in vitro que la coevolución antagonista con parásitos víricos promovía la evolución de la mutación de la bacteria *Pseudomonas fluorescens*.

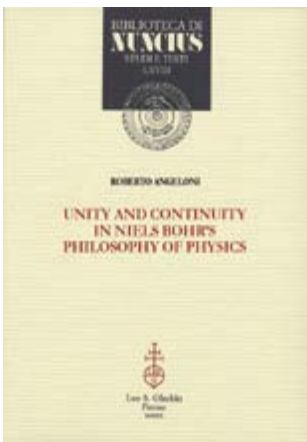
La simbiosis mutualista puede aparecer incluso sin que hubiera coevolución previa. La mayoría de las asociaciones mutualistas beneficiosas entre individuos de diferentes especies, denominadas simbiosis mutualistas, han permitido grandes innovaciones ecológicas y se encuentran en la base de las grandes transiciones registradas en el árbol de la vida. Por ejemplo, el antepasado de los vegetales domesticó bacterias fotosintéticas endosimbiontes, los cloroplastos de hoy, para fijar el carbono. Esa asociación incrementó drásticamente el hábitat de esas bacterias fotosintéticas: de ecosistemas acuáticos a ecosistemas continentales. Sin embargo, la colonización de tierra firme por las plantas requería una ulterior asociación simbiótica, con simbiontes fúngicos que facilitan la adsorción de nutrientes.

Un ejemplo fascinante de endosimbiosis entre eucariotas y cianobacterias nos los ofrece la diatomea de agua dulce *Rhopalodia gibba*. En el interior de la diatomea habita una cianobacteria endosim-

bionte que está estrechamente emparentada con el género *Cyanothece*. Las especies de *Cyanothece* se caracterizan por su capacidad para fijar el nitrógeno atmosférico, es decir, para convertir el nitrógeno gaseoso en amonio y otros componentes relacionados. El endosimbionte constituye lo que, en virtud de su morfología, se denomina cuerpo esférico. La relación simbiótica estable que se entabla refleja la mutua interdependencia. El organismo hospedante era fotosintético antes de que se produjera la simbiosis. Las diatomeas portan cloroplastos derivados de una absorción endosimbótica de una alga roja. Nada tiene, pues, de sorprendente que el cuerpo esférico no realice la fotosíntesis; lo que sí hace es fijar el nitrógeno, igual que las especies de *Cyanothece* de vida libre.

Al propio tiempo, la biotecnología avanzó imparable. No han cesado las preocupaciones éticas, legales y ambientales. Pero ahora los componentes de la investigación sobre el ADN recombinante son naturales. Se toman de la biosfera microbiana. La enzima de restricción del ADN, EcoRI, procede de *E. coli*; opera como un agente natural de defensa celular frente a material genético extraño. Se han identificado y empleado cientos de proteínas así. Enzimas que unen fragmentos de ADN. La polimerasa Taq se usa para amplificar ADN; procede de la bacteria *Thermus aquaticus*, descubierta en 1965 en los surtidores termales de Yellowstone.

—Luis Alonso



UNITY AND CONTINUITY IN NIELS BOHR'S PHILOSOPHY OF PHYSICS

Por Roberto Angeloni. Leo S. Olshki, Florencia, 2013.

Bohr

Unidad de la ciencia, unidad de la física

En 1933, John Archibald Wheeler advirtió, en su solicitud de una bolsa de estudio ante el estadounidense Consejo Nacional de Investigación para trasladarse a Copenhague y trabajar con Niels Bohr, que

su elección se basaba en que «las ideas de Bohr van mucho más allá que las de cualquier otro científico vivo». Algo parecido sentía Werner Heisenberg cuando veía en el danés un filósofo más allá del físico.

Bohr y Wheeler publicaron su primer ensayo conjunto, a finales de los treinta, sobre fisión nuclear explicada en términos cuánticos. El núcleo atómico, que constaba de protones y neutrones, exponían, era como una gota líquida, que empieza vibrando y se elongaba en forma de cacahuete cuando un neutrón emitido por otro núcleo en desintegración colisionaba con él. Wheeler fue convocado para sumarse al proyecto Manhattan. Bohr decía estar más interesado en la filosofía que en los filósofos, atraído por algunas cuestiones filosóficas que emergen en la historia de la ciencia. Preocupado, sobre todo, por las condiciones de posibilidad del conocimiento empírico.

Niels Bohr, nacido en 1885, entró en la Universidad de Copenhague en 1903. Por entonces, todos los alumnos tenían que asistir durante el primer año a un

curso propedéutico de filosofía. Bohr realizó ese curso en 1903 con el profesor Harald Høffding. Estudió física con Christian Christiansen. Desde 1905 comenzó a frecuentar un grupo de alumnos donde debatían sobre los asuntos más dispares. Se licenció en 1909 y dos años más tarde obtuvo el doctorado. Pasó un año en Inglaterra de posdoctorado en Cambridge y Manchester.

A través de Høffding llegó Bohr a la filosofía existencialista de Søren Kierkegaard. Høffding fue un filósofo de la continuidad en un tiempo en que la discontinuidad se había convertido en una realidad cuando Max Planck descubrió el cuanto de acción en 1900. A diferencia de Kierkegaard, Høffding sí creía que se daban saltos en la naturaleza inanimada. Investigaciones posteriores sobre radiactividad demostraron que las leyes causales deberían ser sustituidas por descripciones estadísticas. De hecho, Bohr renunció a las explicaciones causales y defendió cambios espontáneos antes de familiarizarse con el existencialismo de Kierkegaard. Existía una corriente de simpatía entre Høffding y Bohr. Despertaron el interés de estas clases que aquel impartió sobre una filosofía de la ciencia natural que se espejaba en el trabajo de los físicos, de Copérnico a Newton, de Maxwell a Mach.

Se ha dado por supuesto que el filósofo William James influyó en Bohr. Está más allá de toda duda que hay llamativas analogías entre James y Bohr. De acuerdo con James, solo puede haber pensamiento en asociación con un poseedor específico de ese pensamiento. En consecuencia, pensamiento y pensador, sujeto y objeto se encuentran entrelazados y resulta imposible concebir la objetivación del pensamiento; Bohr subrayaba la necesidad de prestar atención a las circunstancias en que se obtenían las pruebas, en cualquier campo.

La relación de Bohr con el positivismo lógico respaldaba la idea de su interés general por la filosofía. Una atracción que plasmó en el concepto de unidad del conocimiento. Bohr tomó parte en el Segundo Congreso Internacional sobre Unidad de la Ciencia celebrado en Copenhague en 1936, dirigido por los neopositivistas Otto Neurath y Jorgen Jorgensen. Se le invitó a escribir un artículo sobre análisis y síntesis en ciencia de la *International Encyclopedia of Unified Science*, coordinada por Neurath, Jorgensen y Carnap. En el segundo volumen, Bohr reconocía

que, pese a la exigencia práctica de concentrar los científicos sus esfuerzos en un dominio concreto del saber, su labor, en cuanto potenciadora del conocimiento, es la unidad. La historia de la ciencia nos revela que el avance de un campo ha conducido a la unificación de aspectos que antes se presentaban separados e inconexos. No solo hay unidad de la ciencia que interpreta el mundo exterior sino también inseparabilidad del análisis epistemológico y psicológico. A diferencia de los neopositivistas, él no busca la unidad en la reducción de todo a la física, sino en la armonía del todo. Es una postura holista.

Así, a lo largo de su carrera Bohr se propuso reconciliar la teoría clásica y la teoría cuántica en un todo racional y coherente, salvar el hiato entre la descripción clásica y la descripción cuántica. Una continuidad que se aprecia en la descripción clásica, donde las coordenadas de espacio, tiempo, energía y momento pueden, en principio, reputarse indivisibles. En la física clásica, la causalidad se da por cierta, en tanto que en la física cuántica comienzan a aceptarse como intrínsecas a la misma las nociones de indeterminación, descripción estadística y distribución probabilista. Si en la física clásica existe una separación tajante entre objeto y sujeto, en la cuántica tal separación solo puede producirse de una manera arbitraria. La mecánica clásica, newtoniana, presentaba una descripción objetiva de la realidad. Con la introducción del cuanto de acción de Planck en los procesos atómicos, se puso en cuestión la concepción determinista de la naturaleza. Las teorías de la física clásica resultaban idealizaciones válidas solo en la descripción de fenómenos suficientemente grandes, donde podía ignorarse el cuanto de acción.

El primer modelo atómico de Bohr se presentó en 1913 en un extenso artículo publicado en tres partes en el volumen 26 del *Philosophical Magazine*. El trabajo se titulaba «On the constitution of atoms and molecules». Aportaba la base teórica para el modelo atómico construido por Rutherford en 1911. Se servía de los conceptos cuánticos para resolver la constitución del átomo: los electrones orbitan alrededor de un núcleo central y alcanzan su estabilidad, al admitir que su momento angular se cuantiza. El tránsito de los electrones de una órbita a otra viene acompañado de la absorción o emisión de energía en forma de luz, dando así cuenta

de una serie de líneas en el espectro de emisión del hidrógeno.

La teoría introducida por Bohr en 1913 para explicar las líneas espectrales del hidrógeno lleva su nombre. Daba por supuesto que un solo electrón de masa m viajaba en órbita circular de radio r , a una velocidad v , en torno a un núcleo dotado de carga positiva. El momento angular del electrón sería entonces mvr . Bohr propuso que los electrones pudieran ocupar solo órbitas en las que este momento angular presentara ciertos valores fijos: $h/2\pi$, $2h/2\pi$, $3h/2\pi$... $nh/2\pi$, donde h es la constante de Planck. Ello significa que el momento angular se cuantiza, es decir, presenta solo determinados valores, cada uno de los cuales es múltiplo de $h/2\pi$. Cada valor de n va asociado con una órbita de diferente radio. Bohr suponía que, cuando el átomo emitía o absorbía radiación de frecuencia ν , el electrón saltaba de una órbita a la siguiente; la energía emitida o absorbida en cada salto era igual a $h\nu$.

Esa teoría dio buenos resultados en la predicción de las líneas observadas en el espectro del átomo de hidrógeno e iones simples (He^+ , Li^{2+} , etcétera). La idea de valores cuantizados de momento angular fue más tarde explicada por la naturaleza ondulatoria del electrón. Cada órbita ha de tener un número entero de longitudes de onda en torno a la misma; esto es, $n\lambda = 2\pi r$, donde λ corresponde a la longitud de onda y n un número entero. La longitud de onda de una partícula viene dada por h/mv , de suerte que $nh/mv = 2\pi r$, que conduce a $mvr = nh/2\pi$. La teoría atómica moderna no permite que las partículas subatómicas sean tratadas de la misma forma que los objetos grandes, lo que ha dejado desacreditado hasta cierto punto el razonamiento de Bohr. Persiste, sin embargo, la idea de momento angular cuántico.

El trabajo adquirió una doble importancia en la historia de la física del siglo xx. Por un lado, representaba el primer esbozo de una teoría coherente sobre la constitución del átomo; por otro, se convertía en un avance decisivo de la concepción cuántica al establecer su alto nivel de generalidad. Hasta 1910, la mayoría de los físicos (con la excepción de Einstein, Von Laue y Ehrenfest) estaban convencidos de que la constante de Planck h era característica solo de la radiación del calor. Por ese hito Bohr recibió en 1922 el premio Nobel. Bohr explicaba también la tabla periódica en términos de

capas de electrones y desarrolló el modelo de gota líquida del núcleo.

Bohr asignó al principio de correspondencia un puesto central en su teoría. Fue, sobre todo, un instrumento técnico. Derivaba de su profundo convencimiento de la correspondencia entre la física cuántica y la física clásica. El primer trabajo donde empleó el concepto de correspondencia fue en «On the quantum theory of line-spectra. Part I», publicado en 1918. Volvió sobre el asunto en 1920, para culminarlo en 1921. La teoría de los osciladores virtuales, de 1924, constituye un ejemplo de dicho principio. Hasta 1925 no se mostró preocupado ni por la dualidad partícula-onda ni por la dualidad continuidad-discontinuidad. Andaba enfrascado en la incoherencia aparente entre la teoría cuántica, que implica una emisión o absorción discontinuas de radiación, y la teoría electromagnética, que implica una emisión y absorción continuas.

Bohr se había empeñado en elaborar un programa propio de investigación sobre la expansión del conocimiento de los fenómenos atómicos y, al propio tiempo, de revisión de los fundamentos de la física. Ese programa perduró hasta 1927, cuando Bohr aportó su interpretación

física de la mecánica cuántica basada en el principio de complementariedad. En 1927, propone la complementariedad de las representaciones de los sucesos porque en el lenguaje ordinario podemos explicar la totalidad de la naturaleza a través de un modo de descripción complementario. Para él, la teoría cuántica es una generalización racional de la mecánica clásica. En sus palabras, sacadas de *Atomic theory and the description of nature* (1929): «El esfuerzo empeñado en formular leyes generales para estas posibilidades y probabilidades mediante la aplicación debidamente limitada de los conceptos de las teorías clásicas ha conducido recientemente, tras una serie de fases en su desarrollo, a la creación de una mecánica cuántica racional por medio de la cual somos capaces de describir experiencias muy dispares y que puede considerarse en todos sus aspectos una generalización de las teorías físicas clásicas».

Esa tesis resulta necesaria para comprender la postura de Bohr en física cuántica: su visión sobre la complementariedad, el principio de correspondencia y la indispensabilidad de los conceptos clásicos. Aunque Bohr consideraba que el cuanto de acción de Planck desembocaba

en una exigencia de revisión de la física, fue más un teórico de la continuidad que un revolucionario. Un teórico de la continuidad en el sentido de que él intentó mantener y subrayar los rasgos de la teoría predecesora que se conservaban en la transición a la teoría sucesora.

El nombre de Bohr va indisolublemente unido a la interpretación de Copenhague. Por tal se entiende la interpretación canónica de la mecánica cuántica en la que un sistema (por ejemplo, una partícula) puede describirse mediante una función de onda. Esta es una función compleja; su significado físico es que el cuadrado del módulo de la función de onda es proporcional a la probabilidad de un estado definido particular. En la interpretación de Copenhague, una partícula no tiene una posición definida o espín hasta que es observada, es decir, hasta que se realiza una medición. La idea es que la medición «colapsa la función de onda», conduciendo a una medición definitiva del estado. Sin embargo, cualquier predicción del estado de un sistema puede ser solo probabilista. La interpretación de Copenhague es la más aceptada por los físicos, pero no se halla exenta de paradojas.

—Luis Alonso

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Precios para España

OFERTA DE SUSCRIPCIÓN

Recibe puntual y cómodamente los ejemplares en tu domicilio

Suscríbete a *Investigación y Ciencia*...

- ▶ por **1 año** y consigue un **17% de descuento** sobre el precio de portada (**65 €** en lugar de 78 €)
- ▶ por **2 años** y obtén un **23% de descuento** sobre el precio de portada (**120 €** en lugar de 156 €)
- ▶ **REGALO** de 2 ejemplares de la colección TEMAS, a elegir en nuestro catálogo.

Y además podrás acceder de forma gratuita a la versión digital de los números correspondientes a tu período de suscripción.



Puedes suscribirte mediante:

www.investigacionyciencia.es ◀

Teléfono: 934 143 344 ◀