

Revista
Española
de

FÍSICA



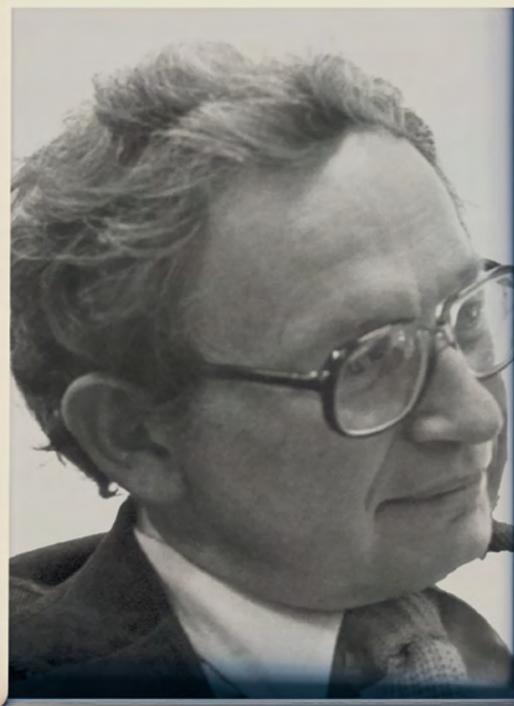
Real
Sociedad
Española de
Física

R.S.E.F.

UNA PUBLICACIÓN DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA
www.rsef.es Volumen 38 • Número 4 • 2024



Steven Weinberg (1979)



Philip W. Anderson (1977)

**REDUCCIONISMO Y EMERGENCIA,
de nuevo**



FECYT
FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



UCC+i
RED DE UNIDADES DE
CULTURA CIENTÍFICA
Y DE LA INNOVACIÓN

Reduccionismo y emergencia, de nuevo

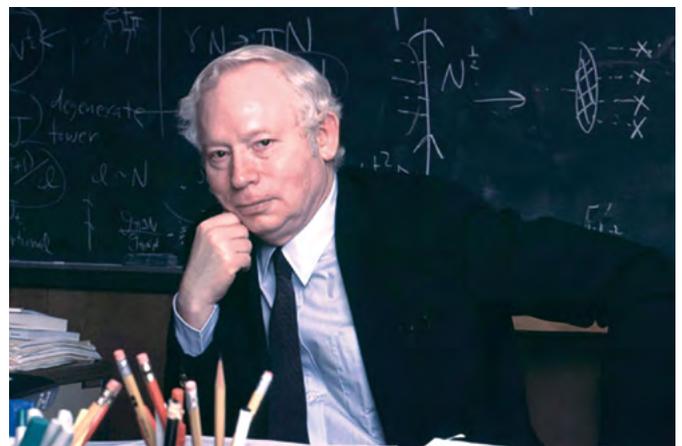
José Adolfo de Azcárraga

Si las leyes fundamentales de la física son tan sencillas, ¿por qué el mundo es tan complejo? La respuesta a esta elemental pregunta está en el fondo de un viejo debate que, al margen de su componente científica, puede tener otras connotaciones.

1. Weinberg, Anderson y el SSC

En los últimos años han fallecido tres físicos teóricos excepcionales, Steven Weinberg [1] (1933-2021, Nobel 1979), Murray Gell-Mann [2] (1929-2019, Nobel 1969) y Philip Warren Anderson [3] (1923-2020, Nobel 1977)¹. Los tres, y también Edward Witten (1951-, Medalla Fields 1990), forman parte del grupo de físicos teóricos más influyentes de los últimos 75 años. Weinberg y Anderson participaron activa y públicamente defendiendo su visión de la ciencia y, en especial, de la física de las partículas elementales y de la materia condensada². Su distinta concepción quedó patente, una vez más, cuando testificaron en el Congreso de EE. UU. sobre la conveniencia de gastar unos 11 billones (USA) de dólares (cuatro veces el presupuesto inicial) en un extraordinariamente ambicioso colisionador de protones. Entre los objetivos del *Superconducting Super Collider* (SSC, de 40 TeV en el centro de masas, 32 erg/protón) figuraba que los EE. UU. mantuvieran el liderazgo de la física de alta energía. Weinberg y Anderson coincidieron en el Congreso el 4-VIII-1993; he aquí algunas de sus declaraciones:

S. W.: “No buscamos realmente las partículas, sino los principios... que gobiernan la materia, la fuerza y la energía, y todo en el Universo... A mediados de los 70 desarrollamos una teoría llamada modelo estándar... Sabemos que no constituye la última palabra porque deja fuera aspectos importantes como la fuerza de la gravedad... Además, no sabemos por qué las masas de las partículas son las que son. Pero hay un sentido en el que la física de partículas elementales se encuentra en el nivel más fundamental de



Steven Weinberg.

la ciencia. Si usted se plantea... cómo funciona un superconductor... obtiene una respuesta en términos de las propiedades de los electrones, del campo electromagnético y otras cosas. Y si entonces se pregunta ¿por qué son ciertas esas cosas? obtiene una respuesta en términos del modelo estándar. Y si entonces se pregunta por qué es cierto el modelo estándar, no obtiene una respuesta: no lo sabemos. No podemos progresar sin el SSC. Gracias”.

La intervención de Anderson es igualmente instructiva. Tras insistir en que él no es un ‘físico aplicado’ (aunque en una ocasión se consideró 6/10 teórico y 4/10 experimental) y referirse “al bosón de Higgs que él ayudó a inventar³”, reitera su oposición al SSC por la necesidad de apoyar otros campos de la física:

1 Gell-Mann recibió el Nobel “por sus contribuciones y descubrimientos sobre la clasificación de las partículas y sus interacciones”. Weinberg lo recibió, junto con Sheldon Lee Glashow (1931-) y Abdus Salam (1926-1996), por “sus contribuciones a la teoría unificada de las interacciones débil y electromagnética entre partículas elementales incluyendo, *inter alia*, la predicción de la corriente débil neutra”. Anderson, Sir Nevill Mott (1905-1996) y John van Vleck (1899-1980) lo compartieron “por sus investigaciones teóricas fundamentales de la estructura electrónica de los sistemas magnéticos y desordenados”.

2 Según contó Anderson, la denominación ‘materia condensada’ fue introducida por él y Volker Heine en Cambridge cuando en 1967 rebautizaron su grupo en el laboratorio Cavendish, hasta entonces de ‘estado sólido’.

3 Anderson es especialmente reivindicativo del mecanismo del Higgs (‘de Anderson-Higgs’), que no sería más que la superconductividad con unas pocas modificaciones técnicas. Anderson propuso un mecanismo de ruptura de simetría para explicar cómo un fotón podía adquirir masa en un superconductor. Peter Higgs (1929-2024, Nobel 2013) le rindió el debido reconocimiento [4]: “este fenómeno es simplemente el análogo relativista del fenómeno del plasmón sobre el que Anderson [5] ha llamado la atención, que las excitaciones de masa cero de un gas de Fermi superconductor neutro se convierten en modos longitudinales de plasmones [*plasmons* = *plasma oscillations*] de masa finita cuando el gas está cargado”.

Philip W. Anderson.



P. A.: “Trataré de ser breve, aunque no creo que pueda ni de lejos ser tan elocuente como mi colega Steve Weinberg”.

S. W.: “Puedes intentarlo”.

P. A.: “La cuestión son las prioridades... Nada que se descubra en el SSC... puede cambiar... cómo trabajamos o pensamos sobre el mundo, ni siquiera sobre la física nuclear... Al menos dos libros (Anderson incluye aquí el *Dreams of a final theory* de Weinberg [6]) y muchos artículos se han publicado para justificar... que esta área de la física es en cierto modo más fundamental que el resto. Que tantos físicos de partículas tengan tiempo para escribirlos... muestra que el campo no ha progresado mucho, ya que no tienen otra cosa que hacer. Hay muchas otras preguntas fundamentales que cabe esperar que la ciencia pueda resolver y que hacen que personas como yo estén demasiado ocupadas para escribir libros sobre ellas. Por ejemplo: ¿cómo empezó la vida? ¿Cuál es el origen de la raza humana? ¿Cómo funciona el cerebro? ¿Existe la economía como ciencia? Todas ellas tienen en común que no son manifestaciones de las componentes más sencillas de la materia —las partículas elementales—, sino de la complejidad de la materia y la energía como normalmente la encontramos. Estas manifestaciones de la complejidad no tienen... ninguna posibilidad de ser afectadas por lo que el SSC pueda descubrir⁴... Me parece que el futuro pertenece a esos campos... Quizá deberían considerar qué cuestiones fundamentales son más fáciles y menos costosas de resolver. Gracias”.

4 Claro que igualmente se podría decir (Weinberg, 2007) que “no es probable que los futuros avances en la física del estado sólido ayuden directamente a la construcción de las teorías fundamentales de la naturaleza”.

Dos meses después, y con escasa dependencia del debate científico, el Congreso canceló el SSC pese a lo avanzado (cerca del 20 %) de su construcción, aunque el ahorro no llegó a la física (dos billones fueron a la NASA). Después, la supremacía experimental de la física de altas energías pasó a Europa, al CERN, en cuyo *Large Hadron Collider* (LHC) se detectó el Higgs en 2012 ($m_H = 125.2$ GeV) tal como requería el mecanismo de ruptura espontánea de simetría de la teoría electrodébil de Weinberg y Salam.

El intercambio entre Weinberg y Anderson refleja su diferente concepción de la física y de la ciencia en general. Weinberg es *reduccionista*⁵, lo que en palabras de Freeman J. Dyson (1923-2020) —quien no lo era⁶— implica poder “reducir el mundo de los fenómenos físicos a un conjunto finito de ecuaciones fundamentales” (en el sentido de ‘básicas’ como la ecuación de Dirac) o, como diría Gell-Mann, el reduccionismo es la capacidad de “explicar un nivel superior en términos de los niveles inferiores”. Weinberg llamaría después ‘gran reduccionismo’ a la visión de que la naturaleza es como es (al margen de condiciones iniciales y ‘accidentes históricos’) como consecuencia de *leyes* fundamentales sencillas a las cuales todas las demás pueden reducirse en algún sentido. El “pequeño reduccionismo”, que juzga menos interesante, implica que el comportamiento de los sistemas es consecuencia del de sus componentes. Weinberg también se ha referido a la *convergencia* de las ‘flechas de explicación’ en la naturaleza como *objective reductionism*, que es lo que el gran biólogo antirreduccionista Ernst Mayr (1904-2005) llamaba *theory reductionism*. Éste deja al margen —e.g. en cosmología— el principio antrópico, incompatible con la convergencia de esas flechas de explicación.

2. Anderson: Más es diferente

Por su parte, Anderson se refirió “al descontento y resentimiento propio y de los físicos de materia condensada” ante los de partículas. Por ejemplo, siendo Director General del CERN, Victor Weisskopf (1908-2002) había calificado la investigación de las leyes fundamentales como ‘intensiva’, siendo

5 En este texto me refiero casi siempre al *reduccionismo ontológico*, según el cual un sistema complejo se reduce a sus partes fundamentales (lo que parece ser el punto de vista de Einstein y al menos inicialmente de Weinberg), y al *emergentismo epistemológico*, para el cual los fenómenos no son deducibles de las leyes fundamentales debido a limitaciones epistemológicas (e.g. restricciones de comprensión o cálculo), y que es consistente con el reduccionismo ontológico (ver [7]).

6 Sin embargo, sus dos trabajos fundamentales [*The radiation theories of Schwinger, Tomonaga and Feynman*, Phys. Rev. **75**, 486-502 (1949); *The S Matrix in Quantum Electrodynamics*, Phys. Rev. **75**, 1736-1755 (1949)] son un magnífico ejemplo de ‘reducción’ (de la electrodinámica cuántica). De hecho, las reglas de Feynman deberían llamarse de Feynman-Dyson.

‘extensiva’ la que da cuenta de los fenómenos en términos de esas leyes; para Anderson esto suponía establecer una jerarquía en favor de la primera. Con su típica causticidad, Wolfgang Pauli (1900-1958, Nobel 1945) había llegado a decir que *Festkörperphysik ist eine Schmutzphysik* (“la física de la materia condensada es una física de la porquería”). Frente a ellos, Anderson reivindicaba que los sistemas pueden tener comportamientos a una escala que no pueden ser predichos por las leyes que gobiernan sus componentes a una escala inferior: las propiedades macroscópicas dependen de la escala y de la complejidad. Anderson plantó cara al reduccionismo en su influyente artículo *More is different* (1972) [8]. Aunque aún no menciona la palabra ‘emergencia’ (que tomaría después de la biología evolutiva), su tesis es clara: aunque las partes no violan las leyes que gobiernan los sistemas elementales (*i.e.*, no hay ‘magia’), no es posible dar cuenta de las propiedades que emergen a escalas superiores a partir de las leyes que gobiernan las componentes de un sistema complejo. Éstas interactúan entre sí dando lugar a propiedades que no aparecen de forma individual. El todo es más que una simple suma de las partes: es preciso invocar la *emergencia*. Las leyes fundamentales sencillas no implican el ‘construccionismo’ o capacidad de reconstruir el universo a partir de ellas: en cada nivel son necesarios conceptos y leyes completamente nuevas que “requieren tanta inspiración y creatividad como en el nivel anterior”. Además, la simetría de las leyes fundamentales no tiene por qué manifestarse íntegramente en los sistemas macroscópicos. Cuando las soluciones estables de las leyes que gobiernan un sistema no poseen toda la simetría de esas leyes, hay *rotura espontánea* de esa simetría: el sistema ha cedido simetría a cambio de estabilidad. Anderson discutió la rotura espontánea de la simetría por primera vez en 1952 al estudiar la teoría cuántica del antiferromagnetismo. En su opinión, esa rotura constituye el ejemplo canónico de emergencia en física, relevante en el estado sólido en la superconductividad (nota 3), donde se rompe espontáneamente la simetría gauge del electromagnetismo, en el ferro- y antiferromagnetismo o en la superfluidez.

3. Reduccionismo

Quizá el primer reduccionista fue el presocrático Empédocles (s. V a. C.) al establecer que las diferentes proporciones de sus cuatro elementos (o ‘raíces’: aire, agua, tierra y fuego) determinaban las estructuras del mundo. No hay duda de que entre los grandes reduccionistas del s. XX se encuentran Dirac y por supuesto Einstein, también movidos por la simplicidad y belleza de las ecuaciones. Einstein afirmó en 1918 que “se debían alcanzar leyes universales elementales a partir de las cuales se pudiera construir el cosmos por



Freeman J. Dyson
(Wikipedia).

pura deducción.” ¿Acaso no es un portentoso ejemplo de síntesis reduccionista que las ecuaciones de la relatividad general —que son clásicas y sólo dependen de *dos* parámetros, G y la constante cosmológica Λ — predigan o puedan dar cuenta del perihelio ‘anómalo’ de Mercurio, del ‘peso’ de la luz, la expansión del universo, la existencia de agu-



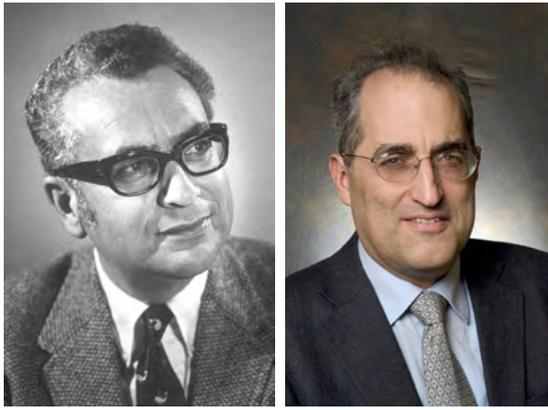
jeros negros, las ondas gravitatorias y que puedan incorporar la energía oscura⁷? La gravedad queda vinculada a la geometría del espaciotiempo que, en la feliz expresión de John Archibald Wheeler (1911-2008), “dicta a la materia cómo debe moverse, y ésta determina cómo el espaciotiempo ha de curvarse”. Dirac, por su parte, había *sentenciado* [9] en 1929: “las leyes físicas subyacentes necesarias para la teoría matemática de una gran parte de la física y la totalidad de la química se conocen ya completamente; la dificultad es sólo que la aplicación exacta de esas leyes conduce a ecuaciones demasiado complicadas para poder ser resueltas”.

No cabe duda de que una gran contribución al reduccionismo unificador fue la introducción de

Empédocles y sus cuatro elementos.

7 La energía oscura está asociada a la constante cosmológica (que introdujo Einstein en 1917 por razones equivocadas). Una constante positiva ‘genera’ una fuerza gravitatoria repulsiva y provoca una expansión. El universo está dominado (~70%) por la energía oscura; la *aceleración* de su expansión fue detectada en 1998. La extraordinaria discrepancia entre el (enorme) valor calculado para Λ y el observado es un serio problema pendiente.

Izda: Murray Gell-Mann (Nobel found.).
Dcha: Edward Witten (IAS).



los quarks (1964) por Gell-Mann (estimulado por Robert Serber (1909-1997)) y por George Zweig (1937-), quien los llamó ‘ases’; cabría añadir también a A. Petermann (1922-2011) y sus ‘partículas elementales espinoriales’. Curiosamente, este *triple* de autores sometió sus trabajos en un intervalo de sólo 18 días. Gell-Mann se consideró reduccionista (“todos somos reduccionistas, al menos en lo que concierne a la química y la física”) aunque también fue, como Anderson y David Pines (1924-2018), uno de los fundadores (1984) del *Santa Fe Institute*, paraíso antirreduccionista dedicado al estudio de la complejidad y, en palabras del propio Gell-Mann, parte “de la rebelión contra los excesos del reduccionismo”. Por su parte, Weinberg insistió en 2011: “el programa reduccionista —retrotraer todos los principios científicos a unas pocas leyes físicas— no sólo es la única forma importante de ciencia o incluso el único tipo importante de física, sino que tiene una relevancia especial propia que continuará motivando a los físicos de partículas durante los próximos cien años”. Esta ‘relevancia propia’ es la que se cuestiona dentro de la física de la materia condensada y de la complejidad en general.

Un problema central de la física —en línea reduccionista— es reconciliar la mecánica cuántica con el campo gravitatorio en una teoría cuántica de la gravedad. El continuo espaciotemporal de la relatividad general einsteiniana es destruido por las fluctuaciones cuánticas a pequeñísimas distancias. La gravedad no es lineal y el gravitón —el cuanto de la radiación gravitatoria, de masa cero y helicidad dos— gravita, es decir, interactúa consigo mismo (al contrario que el fotón del campo electromagnético, de helicidad uno). El resultado es que la cuantización de la relatividad general einsteiniana está plagada de infinitos inmanejables. La supersimetría, que empareja bosones y fermiones, y la teoría de supercuerdas intentan dar respuesta a los retos de la gravedad cuántica construyendo una teoría cuántica unificada de las interacciones de partículas junto con la gravedad. Ante la indudable belleza matemática de la supersimetría, Witten llegó a decir que se sorprendería si la Naturaleza no la usase

pero, hasta hoy, el LHC no ha encontrado rastro de ella (por ejemplo, el fotón está acompañado de un inexistente fotino de masa cero y $s = 1/2$). La ‘primera revolución’ de las supercuerdas, iniciada en 1984, puso de manifiesto la existencia de cinco teorías consistentes en $D = 10$ dimensiones espaciotemporales, relacionadas entre sí por ‘dualidades’ y que permitían una descripción conjunta del modelo estándar de las partículas elementales y de la gravedad, incorporando objetos *extensos* como las cuerdas (de dimensión $p = 1$ y longitud la de Planck, 10^{-33} cm, para *e.g.* un electrón; un átomo tiene unos 10^{-8} cm), así como ‘branas’ de varios tipos ($p > 1$; $p = 2$ para las (mem)branas). En 1995 Witten conjeturó que esas cinco teorías de supercuerdas quedaban subsumidas junto con la supergravedad en $D = 11$ como límites de una única teoría, la Teoría M (por ‘misteriosa’, ‘mágica’ o ‘membrana’). Pronto —y precipitadamente— se popularizó el acrónimo TOE, *theory of everything*.

Sin embargo, esas teorías están formuladas en espaciotiempos con $D > 4$ y la necesaria compactificación de las dimensiones *extra* —su ‘ocultación’ a la longitud de Planck para que resulten inobservables— no es unívoca. De hecho, se estima que hay un número gigantesco de posibilidades, del orden de 10^{500} o más, lo que determina un *paisaje* (*landscape*, 2003) de teorías no equivalentes (con diferentes constantes, tipos de partículas, etc), aunque siempre cabría recurrir al *principio antrópico* para seleccionar nuestro universo. Witten comentó que la razón de la extraordinaria dificultad de las supercuerdas resultaba de ser una teoría del s. xx que requería matemáticas del s. xxi. Pero ya ha pasado un cuarto de este siglo sin mayores avances; el gran optimismo que Stephen Hawking (1942-2018) había reflejado en su conferencia Luciana (1980), *Is the end of theoretical physics in sight?*, resultó completamente prematuro. Entre los grandes, Richard Feynman (1918-1988, Nobel 1965) siempre manifestó su escepticismo sobre la teoría de cuerdas; Glashow, especialmente crítico, llegó a compararla (1988) con la “teología medieval que destruyó la ciencia en la Edad Media”. Weinberg, sin embargo, fue partidario hasta el punto de dedicar el vol. III de su visión de *The Quantum Field Theory of Fields* a la supersimetría.

4. Emergencia

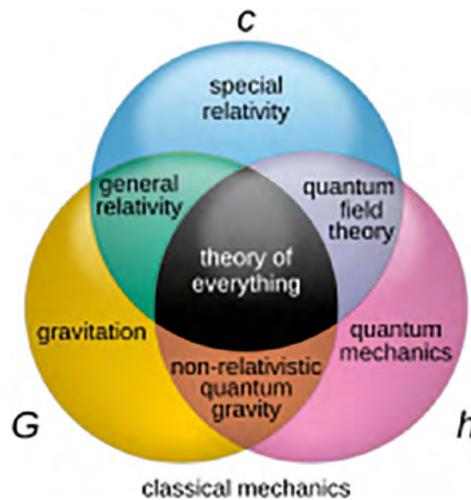
La emergencia también tiene raíces —siempre los griegos— en la Grecia clásica: puede decirse que fue considerada por Aristóteles (384-322 a. C.) en su *Metafísica*, cuando escribió (libro VIII, cap. 6) que “el total no es, por decirlo así, un simple montón; el todo es algo más que las partes”. Karl Marx (1818-1883) lo repetiría dos milenios después: más allá de cierto punto, las diferencias puramente cuantitativas se transforman en cualitativas. En términos generales, la emergencia es un fenómeno que se da en sistemas adaptativos complejos que

no presentan sus componentes individuales como, por ejemplo, el vuelo coordinado de los estorninos o la conciencia y la memoria (el ‘fantasma de la máquina’ que decía Gilbert Ryle (1900-1976)), propiedades emergentes del cerebro, pues una neurona no es consciente ni recuerda. El Nobel de física de 2024, concedido a J.J. Hopfield (1933-) y G. E. Hinton (1947-) “por descubrimientos fundamentales que permiten el aprendizaje de máquinas con circuitos neuronales artificiales” no es ajeno a estas consideraciones [10]. En física, el ejemplo histórico de emergencia ha sido la termodinámica. Pero después, ya con la mecánica estadística, el intercambio de calor se vinculó a la energía cinética de las moléculas, la entropía al desorden y el segundo principio a la tendencia al incremento del desorden en los sistemas aislados: hoy, el segundo principio sigue siendo muy *importante*, pero ya no es *fundamental*. No obstante, pese a la *reducción* de la termodinámica a moléculas y fuerzas, sobreviven en ella aspectos emergentes como la entropía y la temperatura que carecen de sentido para moléculas individuales.

Hábil y tenaz polemista, Anderson insistió una y otra vez en la noción de emergencia. Así lo hizo, por ejemplo, en *Más y diferente: notas de un carrabias reflexivo* [8], calificándola como el *Principio de Dios* en contraposición a *The God Particle* (1993) [11], título del libro del reduccionista Leon Lederman (1922-2018, Nobel 1988) alusivo al bosón de Higgs. La base filosófica del *Principio de Dios* es la que denomina *emergencia en cada nivel*, “más profundo para comprender el universo que ninguna ‘God particle’ o supuesto hito en la reducción de la dinámica de las partículas subatómicas a leyes cada vez más simples y abstractas”... “El mundo en el que vivimos no es consecuencia de alguna increíblemente simple pero oculta ‘ecuación de Dios’ o ‘partícula de Dios’, sino del *Principio de Dios* o *emergencia en cada nivel*.” Demasiadas apelaciones a la divinidad, aunque hay que reconocer el poder de metáforas como ‘la mente de Dios’ que utilizaba Hawking para referirse a las leyes de la naturaleza; el propio Einstein dijo en una ocasión que desearía saber si Dios pudo tener alguna alternativa para crear el mundo.

Cuando ciertos sistemas alcanzan un nivel suficiente de complejidad, aparecen —emergen— nuevos fenómenos que no existían para sus componentes elementales. Dice Anderson [8]: “Este es el avance filosófico fundamental de la ciencia del s. xx: todo lo que observamos emerge de un substrato más primitivo... *pero conceptualmente no es consecuencia de él* (mis cursivas⁸). La biología molecular no viola las leyes de la química y sin embargo contiene ideas que no fueron (y que probablemente no podían haber sido) deducidas de esas leyes; se supone que

8 La clave aquí es ‘conceptualmente’: una desconexión ‘completa’ daría un cierto carácter mágico al *Principio de Dios*.



Las constantes fundamentales G, c, h y sus dominios de influencia

la física nuclear no es inconsistente con QCD y sin embargo no ha sido reducida a ella”.

Así como el reduccionismo cuenta con otros conocidos partidarios, como Hawking, Glashow o Brian Greene (1963-), también tiene otros detractores. R. B. Laughlin (1950-, Nobel 1998) y D. Pines presentaron [12] una ecuación de Schrödinger con un hamiltoniano conceptualmente sencillo, dependiendo de la masa y carga del electrón y de las de los núcleos involucrados, de su posición y de la constante de Planck. Tal teoría podría ser, a efectos prácticos, la “teoría del todo del mundo diario” no relativista. El problema surge porque la ecuación ya no puede resolverse cuando el número de partículas se aproxima a la decena, por lo que las leyes de las partes no permiten en la práctica formular esa *teoría del todo*. Por ello, concluyen Laughlin y Pines, “la tarea fundamental de la física teórica actual no es escribir las ecuaciones finales, sino más bien catalogar y comprender el comportamiento emergente en sus muchas facetas, incluyendo potencialmente la vida misma”. Para bien o para mal, dicen, “estamos siendo testigos de una transición de la ciencia del pasado, íntimamente ligada al reduccionismo, al estudio de la adaptación compleja de la materia”. Se diría que, para ellos, el reduccionismo ha muerto. Por otra parte, cada sistema complejo es diferente y no parece haber reglas generales para la complejidad. Y no digamos si a lo dicho se añade la posible aparición del caos, donde la *extrema* dependencia del sistema de sus condiciones iniciales (en inglés, simplemente *sensitivity to initial conditions*) imposibilita predecir su evolución. Sin embargo, este problema es *ajeno* a, y no contradice, la *idea* reduccionista. Ni la contingencia de las consecuencias de la pérdida de la famosa herradura en *Guerra y Paz* de Tolstói invalida las posibles tácticas militares, ni la imposibilidad de predecir el tiempo con mucha antelación⁹ implica

9 Piénsese en el famoso ‘efecto mariposa’ del pionero del caos Edward N. Lorenz (1917-2008) aunque, realmente, Lorenz usó como metáfora el aleteo de una gaviota. La dificultad de la predicción presenta múltiples facetas [13].

James D. Watson y Francis Crick (Science History Library).



una completa ignorancia de las leyes de la meteorología.

5. ¿Son reduccionismo y emergencia incompatibles?

Un área donde se reivindica especialmente el emergentismo es la biología, como ya señaló el citado Mayr. Thomas Henry Huxley (1825-1895), el *bull-dog* de Darwin (1809-1882), escribió en 1894 [14]: “una y otra vez hay un paso repentino y rápido hacia un nuevo tipo de orden y organización... con nuevas propiedades emergentes que implican nuevas formas de evolución bastante diferentes”. Sin embargo, esas emergencias constituyen en realidad un gran triunfo del reduccionismo: la cadena Darwin → Mendel (1822-84) → Morgan (1886-1945, Nobel 1933) → Crick-Watson es, de hecho, uno de los grandes episodios reduccionistas de la ciencia. En efecto, se debe a Darwin (y a Wallace (1823-1913)) la extraordinaria idea de la selección natural; los mecanismos de la herencia, las mutaciones y su heredabilidad se entienden gracias a los genes, a la biología molecular y, finalmente, al DNA. Como escribieron los Nobel (1972) Francis Crick (1916-2004) y James D. Watson (1928-) para concluir su brevísimo y trascendental trabajo [15] en uno de los mayores *understatements* de la historia de la ciencia: “no nos ha pasado inadvertido que el emparejamiento específico que hemos postulado sugiere inmediatamente un posible mecanismo de copia para el material genético”.

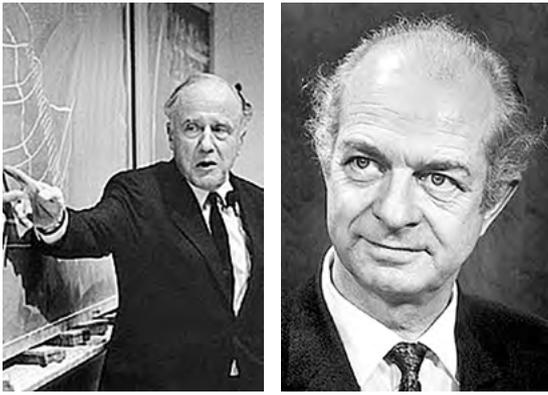
Por supuesto, la aparición y evolución de las especies es un problema extraordinariamente complejo y lleno de matices, incluso de tipo caótico como ya intuyó el genio de Darwin, quien en el cap. xiv del *Origen* (1859), *Recapitulación y Conclusiones*, escribió: “nacen más individuos de los que pueden sobrevivir. Un grano en la balanza determinará qué individuo vivirá y cuál morirá; qué variedad o especie aumentará en número, y cuál decrecerá o finalmente acabará extinta... La más ligera ventaja de un ser... sobre los que compite...

inclinará la balanza”. Obviamente, el nombre ‘caos’ no existía aún (lo acuñó James A. Yorke (1941-) en 1975), pero eso es lo que está describiendo Darwin *avant la lettre*. Pensando en la ‘repentina’ explosión de vida marina del Cámbrico hace 540 Ma, el paleontólogo y famoso divulgador Stephen Jay Gould (1941-2002) comentó con ironía (y olvidando el fenómeno de convergencia evolutiva) que, si se rebobinara la película de la vida y la evolución comenzara de nuevo ya no habría humanos, “*let alone mathematicians*”. Sin embargo, el caos no implica una dificultad *conceptual* para el reduccionismo. Y, como ya advirtió Weinberg, no hay ninguna razón para suponer que la estructura de las leyes deba ser la que hace más felices a los científicos.

En torno a la vida y su evolución quedan, naturalmente, muchísimos aspectos fascinantes por comprender cuyos detalles son imposibles de encajar en una visión puramente reduccionista. Por ejemplo, las cigarras periódicas de EEUU (*Magicicada*) surgen tras permanecer enterradas 13 y 17 años (curiosamente primos) y sólo para reproducirse y morir. En 2024 han coincidido los dos tipos (lo que sucede cada 221 años). ¿Por qué emergen y cómo saben cuándo deben hacerlo? No obstante, estos *detalles* resultan problemas menores frente al triunfo de la descripción *global y reduccionista* de la evolución. Otros aspectos que no son fáciles de acomodar incluyen la conciencia ya citada o el libre albedrío (*free will*), objeto de apasionados debates (véase *e.g.* [16]). Pero, dadas las ventajas que confiere, el libre albedrío bien pudo aparecer por selección natural. Su existencia se puede constatar *empíricamente* pues, como dijo Anton Zeilinger (1945-, Nobel 2022) en Princeton en un homenaje (2002) a Wheeler, si el libre albedrío no existiera el progreso científico no sería posible: no se podría establecer el necesario consenso en torno a la validez de las teorías científicas cuya selección configura ese progreso.

Las leyes fundamentales rigen siempre; no hay ‘milagros’. Lo que señala el *Principio de Dios* —la emergencia en *cada nivel*— es la imposibilidad de construir una cadena deductiva a través de los distintos niveles. Pero tampoco cabe esperar que conocer los movimientos del ajedrez haga de nadie un gran maestro. Como Feynman comentó en 1988 a Paul Davies, decir que los nuevos “principios que ayudan a comprender una situación compleja no están contenidos en las leyes fundamentales es un malentendido (*misunderstanding*). *Las leyes fundamentales lo contienen todo* (mis cursivas); se trata de encontrar los métodos adecuados para analizar los sistemas complejos”. Por eso el eslogan *Más es diferente* oculta otro complementario: la *emergencia refleja ignorancia*¹⁰. Ignorancia de la mirada de

10 Como dijo Galileo en 1623, *il Libro della natura è scritto nella lingua della matematica*. Así pues, como en matemáticas (K. Gödel (1906-1078)) y en la ciencia de la computación



Izda: John A. Wheeler. Dcha: Linus Pauling.



Izda: Richard Dawkins. Dcha: Alan Sokal.

interacciones entre las componentes del sistema macrosópico que en última instancia son resultado de las leyes fundamentales. Nos encontramos con el *emergentismo epistemológico*: la incapacidad *práctica* de dar cuenta de esas interacciones, no digamos si en lugar de las diez partículas de Laughlin y Pines pensamos en el número de Avogadro, $\sim 10^{23}$. Pero sin alcanzar esas cifras, Walter Kohn (1923-2016, Nobel 1998) mostró [17] que considerar 100 electrones ya implicaría minimizar una función en un espacio de $\sim 10^{150}$ dimensiones!

El progreso científico desde 1900 ha sido espectacular, pero no caben optimismos infundados: es seguro que queda muchísimo camino por recorrer (incluyendo el efecto de la posible singularidad de los límites en las transiciones). Como dijo Hamlet, “hay más cosas en el cielo y en la tierra, Horacio, de las que sueña tu filosofía”. Así pues —y para empezar— ¿por qué nuestro cerebro, extraordinariamente poderoso pero limitado al fin, o incluso los futuros ordenadores¹¹, habrían de bastar *a priori* para dar cuenta de los distintos niveles de emergencia? Nuestros problemas se asemejan —a muy diferente escala— a los de un chimpancé que, enfrentado al mundo exterior, intenta usar sus primeras herramientas y encuentra que no sirven del todo para su propósito. La emergencia refleja, en

hay proposiciones indecidibles (en ésta por el *halting problem* (1936) ‘de’ A. Turing (1912-1954)), cabría la posibilidad de que esa *indecidibilidad* se trasladara a modelos físicos introduciendo en ellos aspectos no decidibles. Su existencia ha sido mostrada en un sistema cuántico bidimensional por T. S. Cubitt, D. Pérez-García y M.M. Wolf, *Undecidability of the spectral gap*, Nature **528**, 207-211 (2015) (agradezco a M. Á. Sanchis-Lozano esta referencia); véase también Y. Tachikawa, *Undecidable problems in QFT*, Int. J. Theor. Phys. **62**: 99, 1-13 (2023). Dicho esto, hay una importante diferencia: en la física hay un juez último —la naturaleza— que no existe para las matemáticas.

¹¹ Incluso el aumento de potencia de los ordenadores puede encontrar límites insospechados: según una proyección de 2015 de la *Semiconductor Industry Association*, para 2040 las computadoras podrían necesitar más energía de la que se produce hoy en el mundo. Como dicen los economistas, *nada es gratis*.

primer lugar, limitaciones de nuestro cerebro y de computación imposibles de superar. Pero, *como los fenómenos emergentes son consistentes con las leyes fundamentales, necesariamente son consecuencia de ellas* con independencia de que permitan describir —reducir— esos fenómenos: por eso *resultan* emergentes.

6. Otros aspectos de la controversia

Buena parte de las objeciones a la ciencia lo son a la visión reduccionista, de ahí la relativa popularidad social del paradigma emergentista. El ciudadano común, que quizá se resiste interiormente ante la penetración y el enorme poder inquisitivo de la ciencia¹², puede llegar a sentirse intimidado por la frialdad del reduccionismo e inclinarse ante la aparente dosis de misterio que inevitablemente acompaña a la emergencia. El reconocimiento de que hay aspectos ‘emergentes en cada nivel’ no reducibles al nivel inferior puede reconfortar al *no científico* que quizá mira la ciencia con desconfianza; un recelo semejante explica la supervivencia de las pseudociencias [18]. Por eso, al poner límites al reduccionismo, un emergentismo mal entendido podría servir para justificar el relativismo o una visión postmoderna de la ciencia no muy alejada de la que eficazmente satirizó Alan Sokal cuando su famoso *affaire* (ver [19]) en defensa de la racionalidad y frente al ‘constructivismo social’.

Los aspectos *sociológicos* del rechazo al reduccionismo que podría amparar la emergencia no están limitados a la física. De hecho, tienen un curioso paralelo en la postura de algunos evolucionistas que se resisten a aceptar algunas implicaciones de la evolución darwiniana [20]; el citado Gould, un evolucionista *malgré soi*, estaría en ese grupo. Sin embargo, Linus Pauling (1901-1994, Nobel de Química 1954 y de la Paz 1962), tras establecer las bases cuánticas del enlace químico —base indiscutible de toda la química— pudo afirmar que “no hay ninguna parte de la química que no dependa, en su aspecto fundamental, de principios cuánticos”. Como también la doble hélice se rige por esos

¹² Weinberg llegó a comentar en una ocasión que trabajaba con la televisión encendida para compensar la inhumana frialdad de los cálculos que estaba realizando.

principios básicos, Pauling concluyó que “la biología ha pasado finalmente a ser una rama de la química”. Dice Weinberg [6] quizá recordando, como Pauling, a Dirac: “no hay principios autónomos en la química que sean simplemente verdades independientes ni que no se basen en principios más profundos de la física”. En el caso de la evolución, antirreduccionistas como Gould, Richard Lewontin (1929-2021) o Steven Rose (1938-) tildaron de ‘ultradarwinistas’, por ejemplo, a Richard Dawkins (1941-), Edward O. Wilson (1929-2021) o al discípulo de Ryle Daniel C. Dennet (1942-2024). Pero ese ‘ultra’ carece de sentido, como sería impropio llamar ‘ultraeinsteinianos’ a quienes aceptan la teoría de la relatividad. Dennet resaltó con acierto [21] lo “peligroso de la idea de Darwin”, ‘peligro’ que el descalificador prefijo ‘ultra’ pretende neutralizar. De hecho, el debate reduccionismo-emergentismo puede teñirse de aspectos tan ajenos a la cuestión como contraproducentes. Por eso la visión reduccionista, completada por el análisis de los aspectos emergentes, es el mejor punto de vista para avanzar en la comprensión del mundo. Y como —vale la pena repetirlo— nada invalida las leyes fundamentales, la emergencia podría verse también como una ‘compresión’ de todos los procesos que tienen lugar en un sistema complejo *i.e.*, como la forma encriptada de un reduccionismo [22] imposible ya de desentrañar: *the devil is in the detail*. Por eso, abusando una vez más de la divinidad, cabría complementar el *Principio de Dios* añadiendo que *para la divinidad no habría emergencia*; no hay contradicción alguna entre emergencia y reduccionismo. La ciencia es la mejor forma de conocimiento, pero debemos aceptar *nuestras* limitaciones y optar por una visión predominantemente reduccionista o emergentista según proceda.

Referencias

- [1] L. ÁLVAREZ GAUMÉ, *Steven Weinberg: el fin de una época (3-V-1933 - 23-VII-2021)*, REF **35**, #3,31-45 (2021).
- [2] J. A. DE AZCÁRRAGA, *M. Gell-Mann, retrato de una época*, REF **33**, #3, 40-52 (2019) [artículo. n.º 65 en www.j.a.de.azcarraga.es].
- [3] P. M. ECHENIQUE, *En memoria de Phil W. Anderson, un polifacético y excepcional científico*, REF **34**, #3, 44-51 (2020).
- [4] P. W. HIGGS, *Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons*, Phys. Rev. Lett. **13**, 508-509 (1964).
- [5] P. W. ANDERSON, *Plasmons, Gauge Invariance and Mass*, Phys. Rev. **130**, 439-442 (1963).
- [6] S. WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Vintage (1993); *Facing Up*, Harvard Univ. Press (2001).
- [7] R. C. BISHOP, *The Physics of Emergence*, IOP (2019).
- [8] P. W. ANDERSON, *More Is Different: broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science*, Science **177**, #4047, 393-396 (1972); *More and Different: Notes from a Thoughtful Curmudgeon*, World Sci (2011).

- [9] P. A. M. DIRAC, *Quantum Mechanics of Many-Electron Systems*, Proc. Royal Soc. of London **A123**, 714-733 (1929).
- [10] J. J. HOPFIELD, *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities*, PNAS **79**, 2554-2558 (1982); *Brain, neural networks and computation*, Rev. Mod. Phys. **71**, S431-S437 (1999).
- [11] L. LEDERMAN (con D. TERESI): *The God Particle: if the Universe is the answer, what is the question?* Dell Publishing (1993).
- [12] R. B. LAUGHLIN y D. PINES, *The Theory of Everything*, PNAS **97**, #1, 28-21 (2000).
- [13] Á. DAZA, A. WAGEMAKERS y M. A. F. SANJUÁN, *Multistability and unpredictability*, Phys. Today **77**, #11, 45-50 (2024).
- [14] T. H. HUXLEY, *Evolution and Ethics and other essays: 1891-1896*.
- [15] F. Crick y J. D. Watson, *Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid*, Nature **171**, 737-738 (1953).
- [16] D. DENNETT y G. CARUSO, *Just deserts: Debating Free Will*, Polity Press (2021). Dennet es pro-FW y Caruso anti-FW.
- [17] W. KOHN, *Electronic structure of matter-wave functions and density functionals*, Nobel Lecture, 28-I-1999.
- [18] J. A. DE AZCÁRRAGA, *Los medios de comunicación frente a las pseudociencias*, CLAVES de Razón Práctica **26**, 65-71 (1992) [art. n.º 30 en www.j.a.de.azcarraga.es].
- [19] J. BRICMONT y A. SOKAL, *Impostures intellectuelles*, Odile Jacob (1997).
- [20] J. A. DE AZCÁRRAGA, *Vigencia y actualidad de la teoría de la evolución: reflexiones en el bicentenario de Darwin*, Rev. Real Acad. Ciencias de Zaragoza **64**, 65-105 (2009) [art. n.º 29 en www.j.a.de.azcarraga.es].
- [21] D. DENNET, *Darwin's dangerous idea*, Penguin (1995).
- [22] P. COLEMAN, *Emergence and Reductionism: an awkward Baconian alliance*, en *Handbook of Philosophy of Emergence*, Routledge (2018).

Referencias generales

- S. CHIBBARO, L. RONDONI y A. VULPIANI, *Reductionism, Emergence and Levels of Reality*, Springer (2014) (con especial atención a aspectos filosóficos).
- P. M. ETXENIKE, *Dinámica de iones y electrones en sólidos y superficies y pequeñas pinceladas sobre ciencia*, Real Acad. Ciencias (2017).
- M. A. FERNÁNDEZ SANJUÁN, *Dinámica no lineal, caos y complejidad: interdisciplinariedad de las ciencias*, Real Acad. Ciencias (2024).

José Adolfo de Azcárraga
Catedrático emérito de la
Universidad de Valencia y miembro
del IFIC (CSIC-UV)

