

El Universo, la Complejidad y la Vida

Juan M. Rojo
jmrojo@fis.ucm.es

Académico Numerario de la RAC
IMDEA Nanociencia

Palabras clave: complejidad, emergencia, vida, superficies,
nanociencia.





RESUMEN:

Se plantean dos límites de la Física actual, el de lo muy pequeño, esto es la comprensión de la naturaleza de las partículas más elementales y de sus interacciones y el de lo muy complejo, enfocado al entendimiento de la estructura de la materia donde la dificultad estriba en el gigantesco número de partículas en interacción.

Centrado en este segundo límite este trabajo analiza las perspectivas actuales de una de las líneas fundamentales de progreso de la Física actual, la de la Física de la Complejidad y más concretamente la de la Física de la Materia Condensada. Se reconoce la existencia de propiedades emergentes y se estudia como ejemplo de estas últimas la superconductividad. Como extensión natural, se analizan las características de la materia viva y se propone que algunas de sus características, p.ej. la replicación, pueden considerarse propiedades emergentes.

Se precisan algunos conceptos relacionados con el reduccionismo a la luz de las consecuencias del fenómeno de la complejidad. Además, se efectúa una discusión sobre el alcance de las técnicas de simulación utilizadas profusamente en nuestros días.

ABSTRACT:

Physics progress proceeds mainly along two different lines: the very small, i.e. understanding the nature of the smallest constituents of matter and their interactions and the very complex, in which the behaviour of real matter involving an enormous number of interacting particles is dealt with.

This paper is centred in the second line, the Physics of Complexity, and more particularly on the Physics of Condensed Matter. The appearance of emergent properties is discussed and superconductivity is analysed as an example. As a natural extension, life is dealt with and it is proposed that some of its characteristic elements, e.g. replication, can be discussed in terms of emergent properties.

In relation to the latter, an overview of reductionism is included. Also, a discussion on the role of the ever more popular simulation techniques is added.



1. INTRODUCCIÓN

Conceptualmente, la Física actual tiene dos fronteras bien definidas, esquematizadas en la Figura 1. Por un lado está el dominio denominado frecuentemente "Partículas y Campos". El otro dominio es el de los "Sistemas Complejos" que incluye áreas tan importantes como la Física de la Materia Condensada. En el primero, los físicos se mueven en torno a sistemas en general sencillos, a veces de muy pocas partículas, (incluso se estudia ¡la estructura del vacío!). El problema estriba aquí en que la descripción de la naturaleza de tales partículas es con frecuencia esquivada y, por otra parte, las interacciones entre las mismas (o si se prefiere, los campos) no son tampoco del todo conocidas. La situación es muy distinta en la otra frontera: en los sistemas complejos las partículas y los campos están bien caracterizados. En la mayor parte de los casos las partículas que entran en juego y el campo mediante el que interactúan (el electromagnético) son bien conocidos clásica y cuánticamente. Aquí el desafío consiste en describir adecuadamente el gigantesco número de partículas *en interacción* (En 1 cm^3 de un metal hay del orden de 10^{23} iones y otro tanto de electrones). Es fácil describir la interacción entre dos de esas partículas pero cuando su número se eleva en muchos órdenes de magnitud aparecen fenómenos *cualitativamente* nuevos. Por ejemplo, todos conocemos que el hierro es magnético (ferromagnético). Pero un átomo de hierro no es ferromagnético, ni lo son dos, ni tres. ¿Cuántos átomos hacen falta para que aparezca el fenómeno del magnetismo? Es una pregunta nada fácil de contestar (Hernando y Rojo 2001)

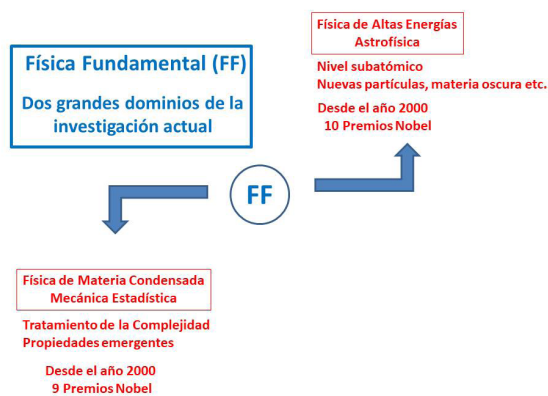


Figura 1. Dos grandes dominios de la investigación actual en Física Fundamental

En este artículo nos centraremos en esta segunda frontera. La aparición de propiedades *cualitativamente* diferentes en sistemas complejos se asocia al nombre de *propiedades emergentes* y su estudio bajo el título de Física de la Materia Condensada constituye uno de los campos más activos de la Física actual. La acumulación progresiva de cambios *cuantitativos* dando como resultado un cambio

cualitativo ha sido un proceso reconocido universalmente, y particularmente analizado en las Ciencias Sociales desde los comienzos el Siglo XX. En el campo de la Física, el asunto fue objeto de un tratamiento magistral en el conocido artículo de Anderson titulado "More is different" (Anderson, 1972).

Además, se ha constatado que esas propiedades emergentes pueden cambiar drásticamente con la dimensionalidad del sistema. Por ejemplo, las superficies (2 dimensiones) de un metal tienen propiedades muy distintas de las del mismo material en volumen (3 dimensiones). Cuando las tres dimensiones se hacen muy pequeñas reduciéndose el cuerpo considerado a unos pocos átomos, hablamos de *nanopartículas*. Nos encontramos en el campo de la *nanociencia*, una de los grandes esperanzas de la tecnología actual, donde aparecen comportamientos inesperados y fascinantes. También la Química participa de este enfoque: una lámina de oro es extremadamente inerte mientras que el mismo oro pulverizado hasta el nivel de nanopartículas (tamaños del orden de unos pocos nanómetros¹) es altamente reactivo (Boronat et al 2014). La singular reactividad química de una superficie subyace en muchos de los catalizadores empleados en la ciencia y en la técnica. Entender bien su funcionamiento a escala atómica podría ser fundamental para obtener rendimientos óptimos.

Hoy día sabemos que la vida no es más que un sistema fisicoquímico extraordinariamente complejo con propiedades especiales desarrolladas a lo largo de los alrededores de 4 Ga (gigaaños²) de evolución. Los seres vivientes de nuestro planeta son quizás los sistemas más complejos del universo que conocemos. Aunque su complejidad es órdenes de magnitud superior a la de los cuerpos inanimados, pocas dudas caben que la constitución y el comportamiento de los seres vivos, incluso del cerebro humano, están basados en último término en las leyes físicas básicas. No obstante, el recorrido del camino que transcurre desde las moléculas existentes en la Tierra primitiva hasta los organismos actuales presenta aún no pocas incógnitas, que la investigación actual va desentrañando poco a poco.

2. EL UNIVERSO

Aunque cada día se descubren fenómenos nuevos, y con frecuencia insospechados, nuestro conocimiento actual de la estructura del Universo es muy notable. Existe amplio consenso sobre la naturaleza de sus componentes a diferentes escalas, desde galaxias y estrellas de todo tipo hasta planetas, éstos ya no constreñidos a nuestro

1 1 nanometro (nm) es igual a 10^{-9} metros, o sea una millonésima de milímetro. El tamaño de un átomo medio es del orden de 0.3 nm.

2 El prefijo giga (G) indica 10^9 , miles de millones.



Sistema Solar³. Todas estas estructuras, incluso los muy publicitados agujeros negros, pueden explicarse en sus aspectos básicos con las leyes de la Física bien conocidas, particularmente la ley de Gravitación Universal y la Relatividad General. Tenemos una descripción bastante satisfactoria de la evolución del Universo desde el big-bang inicial, hace unos 13.5 Ga, hasta el presente. No obstante existen algunos fenómenos importantes que aún escapan de la descripción estándar y requieren la introducción de nuevos conceptos todavía no bien comprendidos (Marcaide, 2021). Un ejemplo lo constituye la llamada *materia oscura*, que no es observable directamente y se pone de manifiesto a través de efectos gravitacionales. Pensemos, como ejemplo, en una Tierra hecha de materia oscura, y un observador situado en Marte que por tanto no pudiera “verla”. Este observador hipotético simplemente observando el movimiento de la Luna y midiendo el periodo y el diámetro medio de su órbita, con una sencilla aplicación de la ley de Gravitación deduciría la existencia de un centro de atracción en el lugar donde se encuentra la Tierra, e incluso podría calcular su masa. Aunque existe amplia evidencia de su existencia, la naturaleza de las partículas que constituyen dicha materia oscura es todavía más oscura que la propia materia en cuestión. Aún más misteriosa es la llamada *energía oscura*, responsable de la aceleración de la expansión del universo aunque la existencia de dicha expansión acelerada esté unánimemente aceptada (Krauss, 2012).

Algunas de estas observaciones a escala cosmológica pueden conducir a la revisión de algunas teorías físicas consideradas fundamentales. Esto no es sorprendente ya que de las cuatro interacciones consideradas fundamentales en la Física (gravitatoria, electromagnética, débil y fuerte)⁴ solamente la interacción electromagnética es totalmente conocida, tanto clásica como cuánticamente. No es este el caso de las otras interacciones: por ejemplo, los intentos de conciliar la interacción gravitatoria con la Mecánica Cuántica no han llegado aún a buen puerto. Por otra parte, el comportamiento de ciertas partículas, tales como el neutrino, aún nos está deparando sorpresas.

Toda la Física de Partículas, también denominada Física de Altas Energías, está encaminada al análisis detallado de las interacciones subyacentes y al comportamiento a gran escala (espacial y temporal) de las estructuras materiales resultantes del famoso big-bang primitivo. El problema fundamental de la Física de Partículas es la inexistencia de datos experimentales en muchas de las escalas que se manejan, lo que propicia en muchos casos la formulación de teorías incapaces de sufrir comprobación experimental alguna. El camino de construir aceleradores cada vez

más potentes (más grandes y más costosos) tiene limitaciones obvias y parece lógico buscar sustitutivos en observaciones astronómicas. Tal vez la nueva técnica, en vías de desarrollo, de análisis de ondas gravitacionales constituya una ventana que aporte nuevo sustrato observacional a las mencionadas teorías.

Este artículo se va a centrar en el análisis del Universo en otro dominio muy distinto: de las escalas astronómicas pasamos a la escala atómica. Una ventaja clara es que prácticamente todos los fenómenos de interés aquí están controlados por una única interacción, la interacción electromagnética que, como ya hemos dicho, es perfectamente conocida. ¿Cuál es entonces el problema? La respuesta se condensa en una única palabra, complejidad. La complejidad inherente al número de partículas en interacción comporta la aparición de fenómenos cualitativamente diferentes, diremos que se trata de fenómenos *emergentes*.⁵

LA COMPLEJIDAD

A nivel microscópico toda la materia que nos rodea es de una increíble complejidad. Aunque conozcamos perfectamente la interacción (electromagnética) entre cada par de partículas (átomos, iones y electrones), tratar de explicar el comportamiento macroscópico de la materia, esto es sus propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas etc., “sumando” un número increíblemente elevado de interacciones entre cada par de partículas es tarea inimaginable e inútil. Como bien dijo el irreplicable físico Enrico Fermi “La Física es el arte de bien aproximar”.

¿Qué significa aproximar en este contexto? Anderson (2011) argumenta así: “la Ciencia tiene como misión entender la Naturaleza. La Naturaleza es un sistema muy complejo y el objetivo de la Ciencia es describir este sistema complejo con modelos simples porque para describirlo con modelos complejos ¡ya tenemos la propia Naturaleza!”. Desarrollar inteligentemente modelos simples de sistemas complejos es el núcleo de la Física en este dominio, de hecho es la clave del progreso de esta Ciencia. Conviene insistir en este punto porque hay que rebatir la idea de aquellos que creen que “aproximar” es la manera de intentar resolver un problema “para salir del paso”, cuando no se puede hacerlo “exactamente”. Antes bien, “aproximar” es precisamente lo que permite “entender” estos sistemas.

Alguno podría soñar con un inimaginable hiperordenador donde pudiéramos introducir los datos en un momento

³ Se denominan exoplanetas a planetas que orbitan alrededor de estrellas distintas del Sol. Los exoplanetas se descubrieron en la década de los 90s y por ello Mayor y Queloz recibieron el Premio Nobel de Física en 2019

⁴ Cuatro es el número tradicional. Tal vez debiéramos hablar de solamente tres puesto que las interacciones débil y electromagnéticas pueden considerarse unificadas.

⁵ En otro dominio, ya en 1907 Friedrich Engels acuñó la “ley de la transformación de la cantidad en calidad” en su libro “Landmarks of Scientific Socialism”.



dado de todas las partículas del Universo⁶ junto con las ecuaciones básicas de la Física. Ese hiperordenador podría en principio calcular toda la estructura del Universo en cualquier momento posterior. Pero el problema es que con ese cálculo no se aprendería gran cosa (como mucho comprobaríamos que la Mecánica Cuántica funciona, cosa que ya sabíamos). Los comportamientos solo se entienden de abajo arriba, por ejemplo cuando uno puede describir el comportamiento aproximado del movimiento del electrón en el material y sus diferencias con su estado libre en el vacío, cómo este movimiento se ve perturbado por un campo magnético etc. Con frase también de Anderson⁷ después de todo, un cálculo perfecto podría reproducir la naturaleza pero no la explicaría⁸.

La conducción eléctrica en metales

Para visualizar mejor alguna de estas ideas tomemos un ejemplo concreto: la conducción eléctrica por los metales, esto es las corrientes eléctricas. Este es un fenómeno presente constantemente en nuestra vida cotidiana: se establecen corrientes eléctricas cuando enchufamos una bombilla, cuando encendemos el teléfono móvil etc. Como es sabido, los cuerpos conducen la electricidad con muy distinta facilidad (en lenguaje físico se habla de muy distinta *conductancia*, o de su inversa, *resistividad* eléctrica). Cuando queremos que la corriente eléctrica fluya escogemos un buen conductor, típicamente un metal y cuando lo que queremos es aislarnos escogemos un aislante, o sea un mal conductor (p.ej. un vidrio, una porcelana). El cociente entre la resistividad de un mal conductor (vidrio) y un buen conductor (p.ej. cobre) es asombrosamente elevado ¡más de 10^{19} !

En la segunda mitad del Siglo XX se descubrieron además los materiales denominados *semiconductores* (un ejemplo típico es el silicio) cuya resistividad es intermedia entre metal y aislante y, además, puede regularse a voluntad mediante la introducción controlada de impurezas (dopado). Estos materiales semiconductores constituyen la base de la tecnología actual en información y comunicaciones. La explicación de por qué unos materiales son metálicos, otros aislantes y otros semiconductores es uno de los triunfos de la Física del Estado Sólido del pasado siglo^{7 8}

Los metales son un ejemplo de los sistemas complejos que hemos mencionado antes. Baste pensar que en un cubo de cobre de 1 cm de arista hay del orden de 10^{23} átomos. Este es un número cuya magnitud es difícil de percibir;

piensemos que si recubriésemos toda la superficie de la tierra de hormiguitas una junto a otra, necesitaríamos un número de estas del orden de "sólo" 10^{21} , ¡cien veces menos! La Figura 2 muestra un esquema de un bloque de cobre monocristalino⁹.

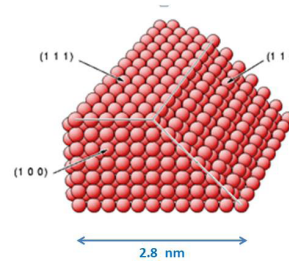


Figura 2. Esquema de la estructura cristalina del cobre. El bloque monocristalino de cobre se representa cortado por tres planos distintos (los grupos de tres números entre paréntesis identifican las tres caras del corte con la notación habitual de índices de Miller). Las bolitas representan iones de cobre, Cu^+ . Los electrones provenientes de la ionización de los átomos de cobre (no representados) se mueven libremente por el material.

Aunque conozcamos perfectamente las interacciones entre un electrón (móvil) y el conjunto de iones (fijos, salvo pequeñas vibraciones térmicas), si queremos tener en cuenta además las interacciones de cada electrón con todo el resto de los 10^{23} electrones (la llamada interacción electrón-electrón), solamente *escribir* las ecuaciones requeriría millones de veces la edad del universo. Uno de los grandes logros de la Física ha sido el de demostrar que la conducción eléctrica, y muchas otras propiedades de los sólidos, puede explicarse despreciando las miríadas de interacciones de cada electrón con la muchedumbre de sus electrones vecinos, considerando sólo el comportamiento de un solo electrón en el potencial que crean los iones "fijos" en sus posiciones periódicas.

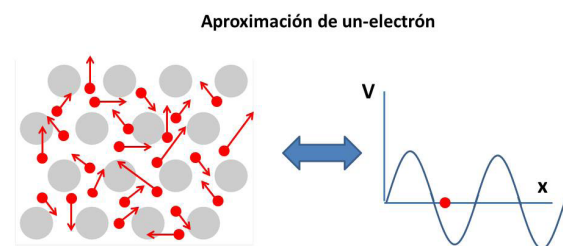


Figura 3: La aproximación llamada de *un-electrón* sustituye el conjunto de complejísticas interacciones (a la izquierda), donde cada electrón interactúa a través de la ley de Coulomb con el resto de electrones del sistema, por algo tan sencillo como *un solo electrón* moviéndose en el potencial periódico V generado por los iones (a la derecha). ¡Casi magia! En gris los iones positivos, en rojo los electrones negativos.

⁶ ¡Con permiso del principio de indeterminación de Heisenberg!

⁷ Es interesante recalcar que una parte importante de la investigación básica en la Física de Semiconductores se llevó a cabo en una empresa: la Bell Telephone Company donde trabajaban Bardeen, Brattain y Shockley que allí recibieron el Premio Nobel por ello.

⁸ Física del Estado Sólido, Física de la Materia Condensada y Física de Materiales son nombres casi intercambiables. En tono desenfadado podría decirse que Materia Condensada es un término considerado "de más prestigio" mientras que la denominación "Materiales" parece ser más favorable para pedir proyectos subvencionados.

⁹ Los materiales habituales son policristalinos, constituidos por infinidad de cristales monocristalinos (como en la figura) yuxtapuestos unos a otros desordenadamente.



Es lo que técnicamente se denomina *aproximación de un-electrón*¹⁰. El dibujo de la Figura 3 intenta visualizar esta aproximación.

Como hemos indicado en la figura, la *aproximación de un-electrón* modela el comportamiento del material mediante el estudio del movimiento de un solo electrón en un potencial *periódico*. De hecho, muchas de las propiedades que se deducen de este modelo están directamente relacionadas con la periodicidad de ese potencial que, por supuesto, corresponde a la periodicidad en la ubicación de los iones en el cristal. Sin embargo, los cristales reales no son perfectamente periódicos, en sus estructuras a nivel atómico aparecen fallas o roturas locales de esa periodicidad que reciben el nombre de *defectos cristalinos*. El nombre no es demasiado atinado porque la palabra "defecto" evoca una imperfección, o dicho de otra forma, algo que puede corregirse para conseguir la "perfección". Y nada más lejos de la realidad: si los cristales no tuviesen defectos, no tendrían muchas de las propiedades que los hacen útiles (o incluso interesantes); por ejemplo, los metales serían frágiles¹¹ y no podrían ser trabajados mecánicamente, tampoco existirían la mayoría de los semiconductores ni los dispositivos basados en ellos. Incluso hay ciertas limitaciones intrínsecas a la idea de un cristal perfecto: un razonamiento termodinámico exige que en equilibrio térmico exista un siempre un número mínimo de defectos.

En el mismo sentido, la existencia de una superficie en un sólido puede ser también considerado como defecto, puesto que la superficie rompe la periodicidad del potencial ya que el entorno de los átomos cercanos a la superficie no es igual al de los átomos en el volumen (a los de la superficie "les falta la mitad de vecinos") . Las propiedades físicas resultan muy afectadas por la existencia de una superficie, incluso cualitativamente, por lo que el estudio de dichas superficies constituye un capítulo aparte de las propiedades fisicoquímicas de un sólido y hasta ha motivado la aparición de una disciplina que se denomina Ciencia de Superficies. Un campo en el que esta Ciencia de Superficies es fundamental es el de la catálisis heterogénea. Recordemos que la introducción de un catalizador no cambia en absoluto la termodinámica de una reacción química pero, sin embargo, puede cambiar en muchos órdenes de magnitud la cinética (velocidad) de dicha reacción.¹² Además existen datos que muestran

que, en muchos de estos catalizadores, su rendimiento aumenta sustancialmente con la presencia de defectos adicionales en la propia superficie (Somorjai, 2010). Asimismo, la presencia de una superficie puede condicionar la plasticidad de un sólido, modificando localmente la energía de formación de dislocaciones (Navarro et al., 2008). Digamos, finalmente, que en una nanopartícula, casi todos sus átomos están en la superficie y no es de extrañar que nanopartículas de un material exhiban propiedades muy sorprendentes en comparación con sus "hermanas" de tamaños macroscópicos.

Superconductividad

El fenómeno de la superconductividad, descubierto inesperadamente a principios del siglo XX por Kammerlingh-Onnes¹³ en su laboratorio de Leyden, consiste en que cuando *ciertos* metales se enfrían a una muy baja temperatura, denominada temperatura crítica T_c , su resistividad se hace bruscamente cero¹⁴. La Figura 4 muestra como ejemplo¹⁵ medidas de la resistividad eléctrica del óxido $\text{Ba}_{0.25}\text{Cu}_{0.75}\text{O}_x$ cuando el material se enfría por debajo de T_c . Si el material después se calienta, recupera su resistividad inicial; se trata por tanto de un fenómeno reversible. En Física hablamos de una *transición de fase*, no muy distinta de la bien conocida transformación reversible del agua en hielo al bajar por debajo de 0°C .

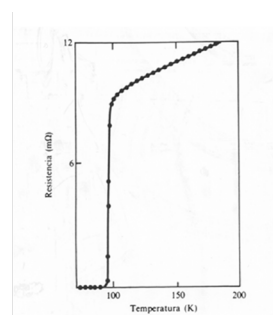


Figura 4 : Conductividad eléctrica del óxido $\text{Ba}_{0.25}\text{Cu}_{0.75}\text{O}_x$. Obsérvese la bajada abrupta de la resistencia eléctrica cuando la temperatura desciende por debajo de aproximadamente 100K lo que indica que se ha alcanzado el estado superconductor. La resistencia que se mide en ese estado es efectivamente de cero ohmios. Si posteriormente se eleva la temperatura, la curva se recorre en sentido inverso, superconductores de alta T_c (García-Alvarado et al, 1987)

El descubrimiento de la superconductividad demostraba que la teoría de la conducción metálica basada en la *aproximación de un-electrón* no era suficiente en este caso y que había algún elemento fundamental que faltaba en

¹⁰ En realidad la denominación de aproximación de electrones independientes sería quizás más descriptiva.

¹¹ Los metales pueden deformarse sin romperse gracia a una propiedad denominada plasticidad. A nivel atómico, esta plasticidad es debida a la existencia de un tipo particular de defectos denominados dislocaciones.

¹² Por ejemplo, la reacción de síntesis del agua $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ tiene una constante de equilibrio, $K \gg 1$, que significa que se alcanza equilibrio cuando prácticamente todos los gases iniciales se han convertido en agua. Pero, en condiciones normales, ese equilibrio no se alcanza ni en toda la edad del Universo. No obstante, la introducción un catalizador (p.ej. polvo de platino) permite alcanzar el equilibrio en una fracción de segundo.

¹³ Vale la pena subrayar que fue en el laboratorio de Kammerlingh-Onnes donde poco antes se había consiguió helio líquido por primera vez. El helio líquido es hoy día el refrigerante por excelencia para bajar a temperaturas cercanas al cero absoluto. Gracias a ello fue posible descubrir la superconductividad. Es un ejemplo de cómo la incorporación de una nueva tecnología conduce muchas veces a avances sustanciales en la Ciencia básica.

¹⁴ El paso al estado superconductor implica un cambio de muchas propiedades del material, no sólo de su resistividad pero, por sencillez nos centraremos aquí únicamente en esta última.

¹⁵ Medidas de Vicent y col. en el Laboratorio de Bajas Temperaturas de la UCM (García-Alvarado et al, 1987)



la descripción. Hubo que esperar más de 50 años para comprender qué elemento era el que faltaba y, por tanto, el origen del fenómeno.

Bardeen, Cooper y Schrieffer publicaron en 1956 una teoría de la superconductividad (teoría BCS) donde justamente demostraron que era la interacción electrón-electrón la responsable del fenómeno. En efecto, el conjunto de electrones en un metal (que se llama *mar de Fermi*) tienen una propiedad extraordinaria: así como dos electrones en el vacío siempre se repelen por tener carga del mismo signo, resulta que dentro del mar de Fermi dos electrones, que cumplan ciertas condiciones, pueden atraerse.

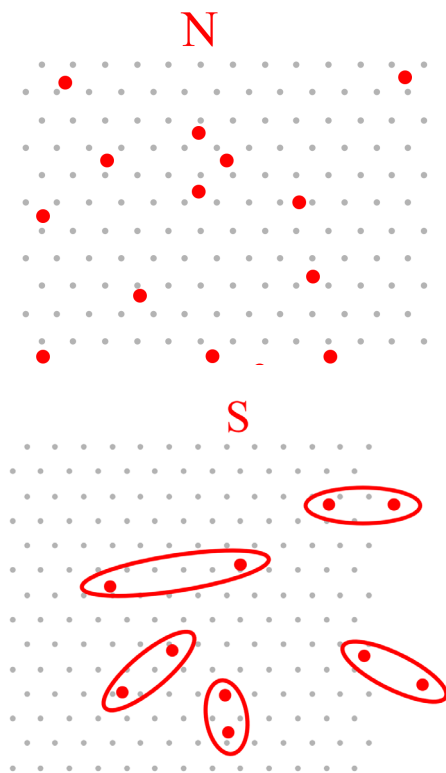


Figura 5: Por encima de la temperatura de transición superconductora T_c , el cuerpo se encuentra en estado normal (N en la figura) y sus electrones son independientes. Enfriado el cuerpo superconductor por debajo de T_c (S en la figura), aparece una atracción entre algunos electrones que forman pares de Cooper, no necesariamente cercanos "geográficamente".

De hecho la propia teoría BCS muestra que la atracción de los dos electrones del par de Cooper viene mediada por la red de iones (a través de sus vibraciones denominadas *fonones*). Dicha atracción conduce a que los electrones formen pares de electrones ligados entre sí, llamados *pares de Cooper* (Figura 5), siendo estos pares de Cooper los que son capaces de moverse por el hilo metálico sin resistencia. Por cierto, para anular la resistencia del superconductor, no importa que haya muchos (incluso una

mayoría) de electrones que sigan conduciendo en "estado normal", basta que haya un cierto número de ellos en "estado superconductor"¹⁶.

Lo importante para nuestro discurso aquí es que el estado superconductor es un fenómeno *emergente* en el sentido de que no puede explicarse generalizando el comportamiento de un solo electrón. Hace falta de por medio un mar de Fermi interactuando con la red de iones. Y tanto el mar de Fermi como la red de iones constan de un gigantesco número de partículas (10^{23} en 1 cm^3). Ejemplos de fenómenos emergentes en otras áreas científicas pueden verse en la Tabla I.

·Física	Fenómenos cooperativos (Superconductividad, Magnetismo etc.)
·Química	Química de sistemas (Autoensamblaje, Reacciones oscilantes etc.)
·Biología	Superorganismos (Colonias de hormigas etc.) ¿Aparición de la vida?
·Sociología	Comportamiento de masas
.....	

Tabla I: Aparición de fenómenos de emergencia en diferentes ámbitos de las ciencias.

Por cierto, la superconductividad sigue deparando sorpresas a los investigadores: a mediados de los años 80s, Bednorz y Müller descubrieron superconductividad en materiales no metálicos con temperaturas críticas T_c bastante más altas¹⁷, donde la teoría BCS no funciona bien y cuya explicación está aún pendiente. Muy recientemente, el grupo de Jarillo-Herrero ha encontrado una extraña superconductividad en una doble capa de grafeno (Cao et al., 2018). La Figura 6 muestra las dos capas superpuestas y giradas entre sí un "ángulo mágico" de algo más de 1.4° , que "transforman" el grafeno, que *per se* no es superconductor, en un material que lo es. Una geometría y una cristalografía tan sencillas han atraído a un buen número de investigadores y está dando lugar a un crecimiento exponencial de investigaciones en este sistema, que incluso han acuñado la discutible palabra "twistrónica".

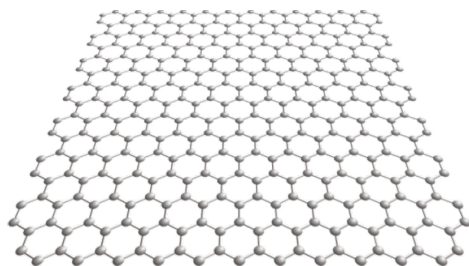
Una nota sobre el Reduccionismo

El concepto de propiedades emergentes nos conduce a la vieja polémica sobre el alcance del reduccionismo en la Ciencia¹⁸. El reduccionismo puede definirse de manera simple como la existencia de unas pocas leyes físicas básicas que *subyacen* en todo el comportamiento del

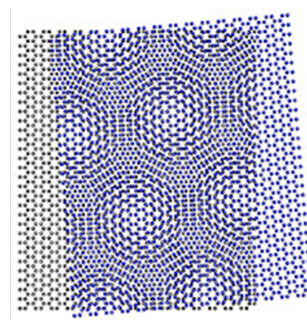
¹⁶ Podríamos considerar el conjunto de electrones del mar de Fermi como un circuito eléctrico en paralelo donde una de las dos ramas la constituyen electrones en estado "normal" y la otra en estado "superconductor". Como enseña la Física elemental, si en un circuito en paralelo una rama tiene resistencia cero, esta será la resistencia del circuito total.

¹⁷ Por ese se les llama "superconductores de alta T_c ". Los datos de la Figura 4 están realizadas en un material de este tipo. Son éstas una de las primeras medidas efectuadas en un material de este tipo.

¹⁸ Una interesante discusión puede verse en el discurso de entrada de Echenique en la RAC, (Echenique, 2017).



grafeno



¡El ángulo mágico
($\approx 1.4^\circ$)

Figura 6: A la izquierda la estructura del grafeno: una sola capa de átomos de carbono en los vértices de una red hexagonal. A la derecha, una bicapa de grafeno estando una de las dos capas superpuestas giradas respecto a la otra un "ángulo mágico". La estructura Bicapa así obtenida es superconductora (el grafeno como tal no lo es). (Cao et al, 2018).

Universo. El *quid* de la cuestión está en la interpretación de la palabra "subyace". Aquí viene a cuento también la afirmación de Anderson: "La capacidad de reducir todo a leyes fundamentales de la Física no implica la capacidad de reconstruir el universo partiendo simplemente de tales leyes. El comportamiento de un enorme y complejo agregado de partículas no puede explicarse en función de una simple extrapolación de la propiedades de unas pocas de esas partículas."

El intento de reducir la Química a la Física, la Biología a la Química e incluso la Sociología a la Biología es empeño de dudosa utilidad, que no conduce a una mejor comprensión del Universo. En cada nivel de complejidad aparecen propiedades (¿leyes?) enteramente nuevas que es necesario identificar, entender y desarrollar, lo que aporta mucho más conocimiento nuevo que el estéril intento de escribir tales nuevas propiedades en función de unas pocas leyes básicas (aunque no dudemos de que tales leyes subyacen en el comportamiento a mayor escala)..

En la Ciencia, con frecuencia explicamos físicamente muchos fenómenos manejando el nivel de descripción macroscópico sin preocuparnos de su reducción a niveles básicos. Un ejemplo bien conocido es el del rozamiento entre sólidos. La Mecánica Física describe este rozamiento (p.ej. el de un sillón pesado arrastrado por un suelo) en función de un parámetro macroscópico denominado coeficiente de rozamiento (μ), característico de cada par de superficies en contacto, y que contiene la infinitud de interacciones electromagnéticas que tienen lugar a nivel atómico. Imaginemos lo que implicaría describir el rozamiento del sillón usando las ecuaciones de la Mecánica Cuántica para describir las interacciones entre los innumerables átomos, electrones e iones de las patas del sillón con los correspondientes del suelo pero no dudamos de que en ese coeficiente μ están "encerradas" todas esas interacciones.. Otro ejemplo de nuestro entorno cercano es el concepto de peso. Llamamos peso de un cuerpo a

la resultante de las innumerables atracciones (aquí de tipo gravitatorio en lugar de electromagnético) entre cada átomo del cuerpo en cuestión y cada uno de los restantes átomos de la Tierra, siendo esta última atracción bien conocida en forma de ley de la Gravitación Universal. A nadie se le ocurriría calcular el peso de un objeto por este camino. Aquí felizmente, el problema se simplifica enormemente por la simetría esférica del problema y el peso se escribe en función de la aceleración de la gravedad g , que no es sino la resultante de esas innumerables atracciones gravitatorias entre átomos antes aludidas. La Figura 7 intenta esquematizar este proceso de definición de g .

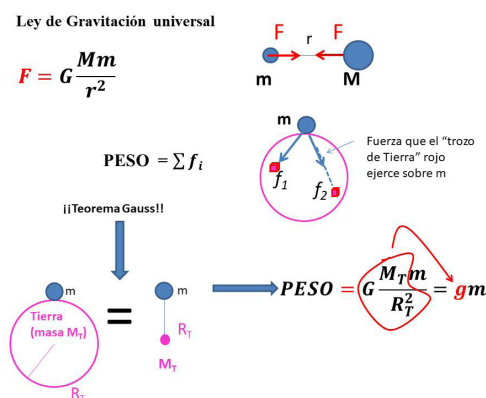


Figura 7: El PESO de un cuerpo de masa m no es sino la suma de las atracciones que sobre dicha masa ejercen el resto de partículas de la Tierra

4. LA VIDA

Pocas dudas existen hoy día de que el estado que llamamos *vida*, desde las bacterias hasta el cerebro de un primate, no es más que un sistema fisicoquímico de un notable grado de complejidad. Los elementos químicos que constituyen ese cerebro son los de la tabla periódica, los mismos que forman el interior de la Tierra o las lejanas galaxias. No obstante es un sistema complejo con características diferentes a la superconductividad anteriormente



reseñada. En efecto, si yuxtaponemos¹⁹ un elevado número de átomos de niobio sobre una superficie a la temperatura de 5 K (aproximadamente -268°C) formaremos una lámina metálica de niobio que *siempre* tendrá la propiedad de superconductividad analizada en la sección anterior. En este caso la propiedad emergente *superconductividad*, aparece “automáticamente”. En cambio si a la temperatura ambiente mezclamos en un matraz los elementos correspondientes a la composición de un ser humano en sus proporciones adecuadas (Tabla II), no hay duda de que dicho ser humano no aparecerá por ninguna parte e incluso no habrá signos detectables de la propiedad emergente *vida*. ¿Cuál es el origen de esta diferencia entre las dos situaciones?

Porcentaje (en peso) de los elementos en el cuerpo humano

• Oxígeno	65
• Carbono	18
• Hidrógeno	10
• Nitrógeno	3
• Calcio	1.4
• Fósforo	1.1
• Azufre	2.5×10^{-3}
• Potasio	2×10^{-3}
• Sodio	1.5×10^{-3}
• Cloro	1.5×10^{-3}
• Otros (Mg, Fe etc)	$< 10^{-5}$



Tabla II: La tabla muestra la composición química aproximada del cuerpo humano (en porcentajes del peso total). Aunque se mezclen estas proporciones en el matraz, no obtendremos nada parecido a la persona de la fotografía.

Se suelen distinguir cuatro características específicas de los seres “vivos”: (i) Capacidad de generar otros seres vivos mediante mecanismos reproductores que permitan transmitir información biológica de una a otra generación, (ii) Posibilidad de que, por procesos de azar, puedan aparecer alteraciones en esa información transmitida (mutaciones), lo que permite la evolución. A las anteriores características deben incorporar otras dos fundamentales, (iii) Todos los procesos fisicoquímicos que tienen lugar en la materia viva requieren energía para lo cual se requiere una fuente de energía externa y un mecanismo que la adapte para su utilización en los distintos puntos del organismo vivo (metabolismo) y (iv) Todos los anteriores elementos requieren una *individualización* del ser vivo, lo que a su vez requiere algún tipo de encapsulamiento que separe el ser vivo del exterior y de los otros seres vivos. En resumen, la vida requiere compartimentalización, metabolismo y transmisión de la información con posibilidad de evolución. El último requerimiento necesita algún mecanismo de copia, para que los cambios producidos originariamente al azar se transmitan a la siguiente generación

Respecto a la comparación con el superconductor, una persona con conocimientos de termodinámica lo primero que argumentaría sería que mientras el superconductor es un sistema en equilibrio (termodinámico), el cuerpo viviente no lo es. Podemos imaginarlo pensando que si aislamos completamente el trozo de niobio, seguirá teniendo indefinidamente la propiedad de superconductividad mientras que el cuerpo viviente no puede mantener la vida estando aislado. Necesita intercambios constantes con el exterior, por ejemplo una fuente externa de energía (a través de la respiración y de la alimentación). En términos más técnicos, podríamos decir que el cuerpo viviente disminuye su entropía (ordenándose) a costa de un aumento de la entropía mayor en el universo circundante²⁰.

Pero seguramente, esta diferencia entre equilibrio y no equilibrio no es suficiente para explicar las diferencias entre los dos sistemas (no-vida y vida). Está claro que la vida requiere una organización pero esta organización no se alcanza “de golpe”. La probabilidad de que los elementos constitutivos de la materia viviente se ordenen espontáneamente en el matraz antes aludido dando lugar a vida es inimaginablemente pequeña. Por decirlo de alguna manera, la organización de la materia viva se lleva a cabo paso a paso, mediante un proceso de *evolución*. Fue Darwin quien fundamentalmente desarrolló la denominada Teoría de la Evolución, quizás la contribución científica más importante en la historia de la Ciencia.

Aunque ha habido otras ideas en el pasado, hoy día sabemos que el mecanismo de la evolución no tiene ningún tipo de orientación previa (teleonomía). En términos muy simplificados se puede afirmar que el mecanismo que actúa controlando la evolución es el de la adaptación de los sucesivos “seres” al entorno por cambios puntuales (mutaciones) que tienen lugar por un proceso de azar. Los mejor adaptados serán los que sobrevivan mejor y se reproduzcan más²¹. Las leyes de la estadística indican que la probabilidad de que un número de mutaciones “favorables” aparezca simultáneamente es un número que decrece vertiginosamente cuando el mencionado número crece aunque sea modestamente. Esto naturalmente requiere algún mecanismo de copia, para que los cambios favorables producidos originariamente al azar se transmitan a la siguiente generación. Aunque cuando Darwin propuso su teoría este mecanismo no se conocía, está hoy día sobradamente descrito²² y el estudio de sus diferentes elementos es un objetivo fundamental de la Biología Molecular.

19 Esto lo podemos conseguir evaporando en vacío átomos individuales y condensándolos sobre una superficie fría a la temperatura mencionada.

20 Esta particularidad no es privativa de los seres vivos, el crecimiento de un cristal a partir de una solución tiene características termodinámicas muy similares.

21 El principio de evolución “darwinista”, tan simple a primera vista, es de una eficacia inimaginable en todos los niveles biológicos aunque sus efectos a veces no sean fáciles de interpretar. Piénsese en el caso sencillo de la “inevitable” generación de una resistencia de las enfermedades infecciosas a los antibióticos. Como afirmó Dobzhansky en una famosa cita “Nada en biología tiene sentido si no es a la luz de la evolución”.

22 Sin duda hay muchísimo que descubrir aun de todos los mecanismos concretos responsables del comportamiento biológico de los organismos, pero hay pocas dudas sobre el funcionamiento de la evolución como proceso básico..



El origen de la vida

Si bien la vida, tal como actualmente la conocemos, muestra con claridad las cuatro componentes anteriormente aludidas, no es nada evidente cómo se ha llegado a su funcionamiento actual partiendo de las moléculas existentes en la Tierra primitiva²³. Así pues, el denominado problema del origen de la vida es todavía uno de los grandes retos de la ciencia actual. Contrariamente a lo que se oye a veces, el problema no reside en establecer una frontera entre vida y no-vida, cuestión en buena medida puramente semántica. El verdadero problema es el de establecer una ruta que partiendo de los componentes químicos de la Tierra inicial conduzca a la formación de un ente que tenga, aunque sea en estado embrionario, las cuatro componentes de vida antes aludidas. Vaya por delante que aún estamos muy lejos de esa meta. Precisemos que encontrar esas rutas no significaría necesariamente que ese hubiera sido el camino que la evolución siguió en la Tierra ya que número de caminos posible puede ser muy grande. Uno de los más grandes atractivos de la astrobiología es la posibilidad de encontrar formas "vivientes" que pudieran haber seguido rutas evolutivas diferentes de las de nuestro planeta. La presencia en meteoritos de sustancias tales como aminoácidos (aunque hasta ahora no se han encontrado nucleótidos) parecen, no obstante, apuntar a una biología (o pre-biología) no muy distinta de la nuestra. No es ocioso señalar además que la investigación sobre el origen de la vida puede aportar conocimientos muy valiosos sobre otros problemas de la biología del mayor interés actual, por ejemplo en lo que atañe al papel de los virus en la evolución de formas más complejas ([Domingo, 2020](#)).

Respecto a la escala de tiempos, se puede estimar que el big-bang tuvo lugar hace unos 13.5 Ga mientras que la Tierra tiene una edad cercana a los 4.5 Ga. Los primeros estadios de la existencia de la Tierra como planeta fueron un tanto convulsos pero existen señales de la presencia de los primeros organismos hace unos 3.8-4.0 Ga. La evolución de la complejidad de los seres vivos, desde los primeros seres unicelulares hasta los primates actuales, cubre pues ese intervalo de 4 Ga, casi el 90% de la historia de la Tierra. Sin embargo, dado que una gran parte de las maquinarias de la vida estaba ya presente en los primeros organismos, cabe concluir que el tránsito desde los componentes químicos iniciales (CO_2 , HCN etc.) hasta la enorme complejidad de una célula tuvo lugar en poco más del 10% inicial de la historia de la Tierra. En ese relativamente corto espacio de tiempo se desarrollaron las cuatro características básicas de los seres vivos antes descritas. Algo realmente maravilloso. [Gell-Mann \(1995\)](#)

ha publicado no hace mucho un fascinante libro sobre este tránsito

Retomando nuestro discurso sobre la complejidad, ¿Podríamos describir la transición de no-vida a vida (o algún paso de esa transición) como un ejemplo de propiedad emergente? Pensemos en un escenario concreto, la generación de una molécula de RNA²⁴. Como es bien sabido esta molécula consta de una sucesión de "eslabones" que llamamos nucleótidos, cada uno de los cuales consta de tres elementos: una base, que contiene nitrógeno, un azúcar y un trifosfato. La molécula de RNA es extraordinariamente importante sobre todo en lo que concierne al problema del origen de la vida y, de hecho, existe una teoría ampliamente aceptada denominada "el mundo RNA" según la cual la molécula de RNA precedió evolutivamente a otras moléculas importantes tales como DNA o proteínas. Una razón importante para esta preeminencia es que a partir de los trabajos de Cech se ha demostrado que el RNA puede funcionar de forma doble: como portador de información (lo que es su función en la biología actual) pero puede hacerlo también como enzima (función que probablemente desempeñó sólo en los estadios evolutivos iniciales). En estos inicios de la Evolución, cuando presumiblemente aun no había proteínas, este doble papel del RNA habría permitido el inicio de los procesos de duplicación inherentes al desarrollo de la vida.

Sería importante, entonces, preguntarse cómo apareció la molécula RNA en la Tierra. En este momento, no hay una respuesta adecuada a esa pregunta. De hecho, no ha sido posible hasta ahora sintetizar en el laboratorio una molécula de RNA a partir de sus componentes elementales. Existen, desde luego, numerosas hipótesis, algunas de las cuales conjeturan la existencia de moléculas más sencillas que pudieron servir como escalones evolutivos en la aparición de la molécula final RNA.

Los elementos que componen el RNA son esencialmente C, N, O, H y P y las moléculas en que se agregan simples moléculas orgánicas. Y, sin embargo, cuando se forma la molécula de RNA aparecen propiedades cualitativamente nuevas, particularmente la propiedad de duplicación espontánea (quizás autocatalizada), lo que permitiría catalogar el paso a RNA como la aparición de una propiedad emergente. El camino para conseguir sintetizar RNA emprendido por el grupo de Cambridge ([Green et al., 2021](#)), basado en la Química de Sistemas, parece apuntar también en esa dirección.

23 Nótese que la teoría de la panspermia, según la cual la vida llegó a la Tierra procedente del espacio, simplemente traslada el programa del origen de la vida a otro lugar. La única ventaja es que, al no especificarse este lugar, no hay que restringirse a las condiciones hoy día conocidas sobre la composición de nuestro planeta en ese momento.

24 Aunque parece que es más ortodoxo usar en español la abreviación ARN, el uso habitual, y la recomendación de algún colega, nos ha llevado a usar la abreviación más usual en la literatura, esto es RNA.



5. MODELOS Y SIMULACIONES

Como hemos argumentado anteriormente, cualquier descripción realista de un sistema material requiere algún tipo de aproximación. Con frecuencia este tipo de aproximación implica la definición de un sistema modelo que, en condiciones bien definidas, pueda reproducir adecuadamente el comportamiento del sistema en consideración.

En el campo experimental un *modelo* de estas características es un sistema similar al sistema objeto de estudio (sistema-problema) pero que es mucho más simple, sea en su preparación, sea en su análisis. Los resultados del estudio del sistema-modelo arrojan luz sobre los mecanismos físicos subyacentes e incluso pueden servir de marco para optimizar la programación de estudios mucho más complejos y onerosos en el sistema-problema. Por ejemplo, si se quiere estudiar la adsorción de un aminoácido por la superficie de un óxido, p. ej. apatita, puede hacerse un primer estudio-modelo analizando la adsorción de ese aminoácido, sobre una superficie metálica, cuya cristalografía y estructura electrónica es mucho más sencilla y permite poner de manifiesto algunos de los mecanismos intrínsecos del proceso de adsorción. En el campo teórico este concepto de modelización es aún más evidente. De hecho, la complejidad de las estructuras de sólidos y moléculas de interés son a veces “los árboles que impiden ver el bosque” complicando los cálculos de tal manera que casi impiden la comprensión de los mecanismos físicos involucrados, mecanismos que se ponen de manifiesto con claridad en sistemas más sencillos.

A la hora de *simular* el comportamiento de un sistema complejo, p.ej. un sólido, uno puede preguntarse en primer lugar si no es posible imaginar aproximaciones que vayan más allá de la aproximación de *un-electrón* a la que nos referimos anteriormente. La respuesta es afirmativa y quizás la aproximación más utilizada, y cuyo impacto ha sido extraordinario en la Física y Química de sólidos y moléculas, es la denominada *teoría del funcional de densidad* (DFT)²⁵. Sin entrar en detalles, se puede decir que la DFT aproxima con precisión la interacción electrón-electrón (que recordemos era despreciada en la aproximación de un-electrón) utilizando como referencia la densidad electrónica. La mayor parte de los cálculos se efectúan hoy día con la DFT o algunas de sus variantes propuestas posteriormente. De esta forma se pueden calcular parámetros estructurales, energías electrónicas, energías de cohesión y un amplio etcétera.

En la última década se han descubierto numerosos materiales insólitos, cuya existencia hubiera sido difícilmente predecible. Algunos llevan nombres exóticos como los denominados *aislantes topológicos*, que son materiales aislantes pero que conducen la electricidad en su superficie²⁶. Muchos de ellos deben su existencia a la aparición de efectos cuánticos macroscópicos²⁷.

La versatilidad y fiabilidad de los cálculos que se llevan a cabo actualmente ha permitido la aparición de una nueva corriente de investigación cuya vertiente aplicada se reconoce con facilidad. Esta línea está basada en las siguientes consideraciones: (i) El número de moléculas posibles, así como el de materiales compuestos y/o aleaciones es incalculable y sólo conocemos las propiedades de un número de ellos muy corto, (ii) El coste de sintetizar un nuevo material o molécula y su caracterización con técnicas fisicoquímicas puede ser elevado, (iii) No es imaginable en términos económicos ni en términos de horas-investigador efectuar un barrido total de ese universo de sustancias, (iv) Las técnicas de cálculos moleculares/materiales son ya muy fiables. Si ahora añadimos a este último punto las nuevas perspectivas que abre la utilización de herramientas rápidas de muestreo, desarrolladas por técnicas basadas en inteligencia artificial, cabe imaginar una prospección generalizada de nuevos materiales (aun no sintetizados) con métodos de modelización, lo que permitiría seleccionar los dominios de parámetros más prometedores que justificasen su posterior investigación ya en el laboratorio. No es necesario resaltar las posibles aplicaciones de esta estrategia en el campo de la ciencia biomédicas.

6. A MODO DE CONCLUSIÓN

El Big-Bang puede considerarse como el origen de todo el Universo conocido. A partir de ese evento se fueron generando todas las componentes de la materia que conocemos en virtud de la de las interacciones básicas de la Física conocidas actualmente (aunque no se descarta la existencia de alguna más) y de reacciones en ellas basadas (p.ej. reacciones de fusión nuclear). Esto condujo a la formación de los átomos del sistema periódico y a la generación de aglomerados de muchos tipos: estrellas y planetas como más representativos. La interacción gravitatoria fue la que controló la formación de dichos estrellas y planetas así como su distribución en galaxias y sistemas solares, respectivamente

A partir de entonces, fue la interacción electromagnética la principal responsable de la organización de los átomos

²⁵ Esta aproximación fue propuesta inicialmente por Kohn y Sham. Kohn recibió por ello en 1998 el Premio Nobel de Química.

²⁶ Por su descubrimiento de transiciones de fase topológicas y fases topológicas de la materia, Haldane, Thouless y Kosterlitz recibieron en 2016 el Premio Nobel de Física.

²⁷ Esto no es novedoso. Al fin y al cabo, la superconductividad y la superfluidez también son estados cuánticos macroscópicos



en cada astro, desde las reacciones químicas varias que condujeron a la formación de moléculas hasta la formación de materiales sólidos. En esos planetas fueron formando sucesivos componentes de mayor tamaño tales como rocas, atmósferas y líquidos (agua, metano etc.). En alguno de esos planetas, el nuestro de momento, apareció un cierto tipo de moléculas orgánicas, basadas en la química del carbono, que se organizaron dando lugar a entes separados capaces de generar su propia energía y desarrollar un mecanismo de replicación capaz de incorporar pequeñas modificaciones en sus estructuras (mutaciones) a sus "descendientes". La evolución de éstos condujo a la aparición de plantas y animales y a una rama de estos últimos capaz de desarrollar una inteligencia consciente.

Es justamente la aparición de comportamientos complejos en moléculas, sólidos y, en último término, estructuras vivientes lo que ha sido objeto de tratamiento en este artículo. Y el mensaje final es que aunque ciertamente la Ley de Coulomb y la Mecánica Cuántica subyacen en todos estos comportamientos, la aparición de propiedades emergentes, íntimamente unidas a la complejidad, requiere un análisis que mucho va más allá de la mera superposición de interacciones elementales entre las partículas constituyentes. Es esta emergencia la que se traduce en la aparición de propiedades totalmente novedosas desde los fenómenos colectivos tales como superconductividad o ferromagnetismo hasta los comportamientos singulares que caracterizan lo que denominamos vida.

REFERENCIAS

- Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science*, 177(4047), 393-396. DOI 10.1126/science.177.4047.393
- Anderson, P. W. (2011). *More and different: notes from a thoughtful Curmudgeon*. World Scientific.
- Boronat, M., Leyva-Perez, A., & Corma, A. (2014). Theoretical and experimental insights into the origin of the catalytic activity of subnanometric gold clusters: attempts to predict reactivity with clusters and nanoparticles of gold. *Accounts of chemical research*, 47(3), 834-844.
- Cao, Y., Fatemi, V., Fang, S., Watanabe, K., Taniguchi, T., Kaxiras, E., & Jarillo-Herrero, P. (2018). Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature*, 556(7699), 43-50.
- Domingo, E. (2020). Introduction to virus origins and their role in biological evolution. *Virus as Populations*, 1-33.
- Echenique, P.M. (2017) *Dinámica de iones y electrones en sólidos y superficies y pequeñas pinceladas sobre ciencia* (Discurso de Entrada RAC), 85-94, RAC.
- García-Alvarado, F., Moran, E., Vallet, M., González-Calbet, J. M., Alario, M. A., Pérez-Frías, M. T., Pérez, M.T., Vicent J. L., Ferrer S., & Asensio, M. C. (1987). A new high temperature superconductor: $\text{Ba}_2\text{SmCu}_3\text{O}_9$, *Solid state communications*, 63(6), 507-510.
- Gell-Mann, M., (1995), *El Quark y el Jaguar*. Tusquets.
- Green, N. J., Xu, J., & Sutherland, J. D. (2021). Illuminating life's origins: UV photochemistry in abiotic synthesis of biomolecules. *Journal of the American Chemical Society*, 143(19), 7219.
- Hernando, A., & Rojo, J. M. (2001). *Física de los materiales magnéticos*. Alhambra
- Kraus, L. M. (2013). Un universo de la nada. Pasado & Presente.
- Marcaide, J. (2021) *Últimas Noticias del Universo*. Espasa.
- Navarro, V., de La Fuente, O. R., Mascaraque, A., & Rojo, J. M. (2008). Uncommon dislocation processes at the incipient plasticity of stepped gold surfaces. *Physical review letters*, 100(10), 105504.
- Somorjai, G. A., & Li, Y. (2010). *Introduction to surface chemistry and catalysis*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-50823-7 June 2010.