

DESDE EL ÁTOMO AISLADO AL ORGANISMO VIVO: EL RETO DE LA COMPLEJIDAD

JUAN ROJO ALAMINOS*

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde, 22. 28004 Madrid

Hoy día sabemos que todo el universo conocido está formado por aproximadamente un centenar de átomos diferentes. Todo el universo: las galaxias, los planetas, incluso los seres vivos, incluso el cerebro humano. El porcentaje de los distintos átomos presentes en un cubo de agua de mar no es muy distinto del porcentaje de esos mismos átomos en un ser vivo. Pero no cabe duda de que el cubo de agua y el ser vivo son profundamente diferentes. Si los átomos que constituyen uno u otro son los mismos, ¿dónde se origina esta diferencia? La respuesta es clara, la diferencia estriba en el grado de organización, en último término en la complejidad.

En el mundo que nos rodea, si no descendemos al dominio subatómico (donde se hacen perceptibles otras fuerzas e interacciones), la única interacción básica (o fuerza básica) que en último término configura el comportamiento de la materia es la interacción electromagnética. La fuerza electromagnética entre partículas se puede describir con gran precisión tanto a nivel clásico como cuántico. Pero para comprender el comportamiento de la materia, el problema estriba en el enorme número de partículas en interacción (complejidad). Para dar idea de esta complejidad consideremos que en 1 cm^3 de un metal, “conviven” del orden de 20^{23} átomos donde cada uno de ellos interactúa con cada uno del resto.

Hoy día disponemos de técnicas mediante las cuales se pueden visualizar los átomos individuales. La Figura 1 muestra la imagen de una superficie de oro obtenida por Juan de la Figuera y col. con un microscopio túnel fabricado en los talleres de la Universidad Compluten-

se. Se pueden ver los átomos cuyo color corresponde a una coordenada vertical como se muestra en la misma figura. Nótese la enorme resolución vertical, entre los átomos de “color” más blanco (átomos por encima del plano de la superficie) y los de color más oscuro (átomos por debajo del plano de la superficie) sólo hay una diferencia de 0.06 nm.

Propiedades emergentes

Para intentar comprender esta inmensa complejidad nada mejor que la visión el premio Nobel Phil Anderson que manifestaba “La naturaleza es compleja y el objeto de la ciencia debe ser el de explicarla con modelos sencillos; para modelos complicados, ¡ya tenemos la propia naturaleza!”. Y respecto los cálculos muy complicados añadía “después de todo, un cálculo perfecto podría reproducir la naturaleza pero no la explicaría”. Aquí la frase de Fermi “La Física es el arte de bien aproximar” viene como anillo al dedo.

La propiedad física que describe esta complejidad se denomina emergencia. Se puede definir como patrones complejos de comportamiento que surgen de un enorme número de procesos relativamente simples. También puede visualizarse diciendo que las propiedades del TODO no son la suma de las propiedades de sus partes. A nivel más técnico estas propiedades emergentes fueron descritas magistralmente por Anderson en un famoso artículo publicado en la revista Science en 1972 titulado “More is different”

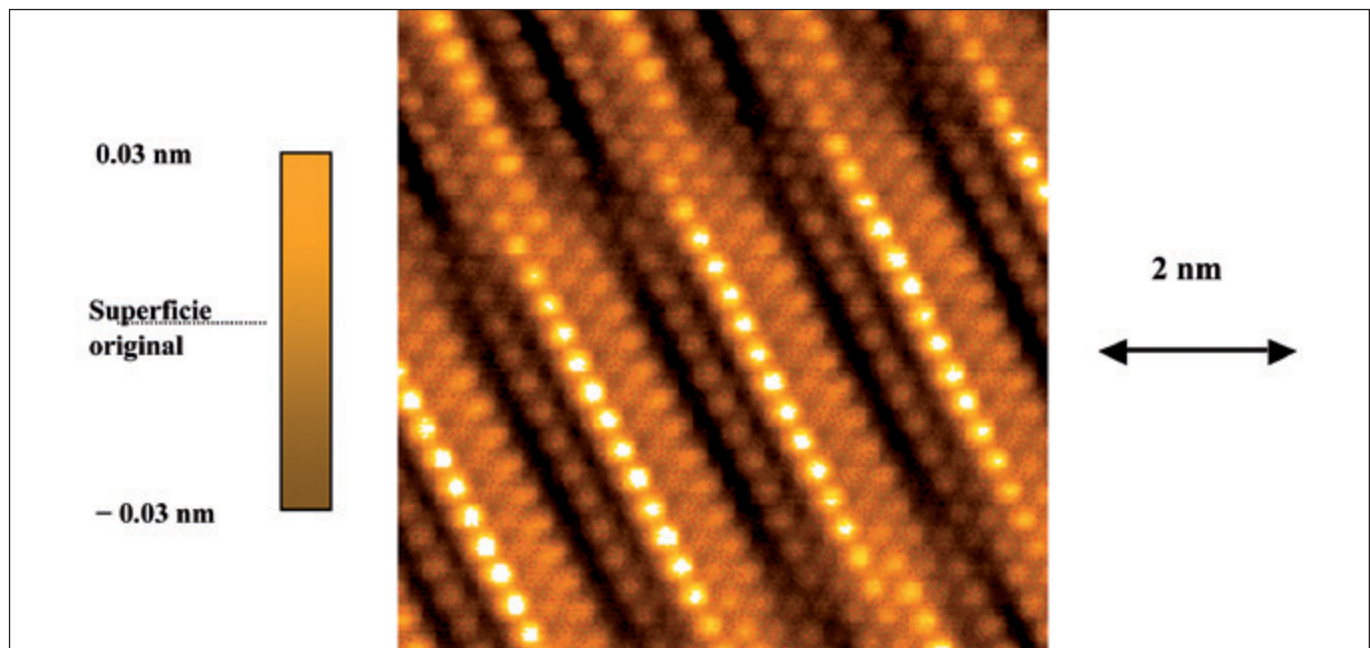


Figura 1: Imagen túnel de una superficie de oro.

En esta línea conviene subrayar que el mundo físico está compuesto de niveles autónomos y cada nivel puede contribuir a la emergencia de nuevos fenómenos. Así, la Química puede considerarse como una propiedad emergente de las leyes de la Física. La Biología como una propiedad emergente de las leyes de la Química. También la Psicología puede considerarse como una propiedad emergente de la neurobiología e incluso las leyes del mercado libre ¡se pueden definir como como una propiedad emergente de la psicología!

**Una propiedad física emergente:
la superconductividad**

Un ejemplo paradigmático de propiedad física emergente es el de la superconductividad. Muchos sólidos presentan esta propiedad, consistente en que cuando se enfrían a muy baja temperatura su resistividad eléctrica cae bruscamente a cero. Esta propiedad descubierto en los albores del siglo XX por Kamerlingh-Onnes en Leiden constituyó un gran misterio hasta que ya en la segunda década del siglo Bardeen, Cooper y Schrieffer desarrollaron la teoría BCS que la explicaba., Esta teoría es un caso característica de propiedad emergente y aunque la BCS es una teoría muy compleja puede describirse en términos muy sencillos. En efecto, en el

interior de un metal existen muchísimos electrones (el denominado mar de Fermi). En el vacío dos electrones obviamente se repelen ya que los dos tienen carga negativa, pero en el interior del metal, si el material está en el estado superconductor, la existencia de un mar de Fermi más la presencia de vibraciones de los “núcleos” atómicos hace que dos electrones puedan atraerse en lugar de repelerse. Esta atracción da lugar a un estado condensado especial donde los pares de electrones se mueven por el sólido prácticamente sin dispersión (sin resistencia).

La vida como propiedad emergente

Los seres vivos están formados por los mismos átomos que la materia no-viva y tienen una composición atómica típica (en % de peso) como la que se muestra en la tabla

Oxígeno	65
Carbono	18
Hidrógeno	10
Nitrógeno	3
Calcio	1
Fósforo	1
Otros	2

En una persona hay del orden de 10^{27} átomos (aproximadamente *el mismo número* que en un cubo grande de agua). Sin embargo, en la materia viva esos átomos están ordenados formando superestructuras tales como DNA, proteínas, células, órganos etc. Esa ordenación representa precisamente la propiedad emergente.

Para tratar de entender la aparición de esa emergencia, la investigación moderna ha adoptado dos vías distintas pero a la larga complementarias: (a) “De arriba-abajo” Partiendo de una célula viva (una bacteria por sencillez), ir sustituyendo sus elementos parte a parte por elementos artificiales (Craig-Venter y cols.), (b) “De abajo-arriba” Partiendo de átomos y moléculas inorgánicas sencillas construir sistemas vivos, esto es capaces de generar energía, replicarse y evolucionar. Ambas vías representan inmensos desafíos para los investigadores que, apenas, han conseguido avanzar modestamente en la primera vía sustituyendo un DNA artificial en una célula natural.

La segunda vía es más compleja aún pero, quizás con más potencial. Hace ya varias décadas los experimentos de Miller y col. parecieron abrir la vía para la generación de moléculas orgánicas, incluso complejas como algún aminoácido, en atmósferas de laboratorio cercanas a la conjetura para la tierra primitiva y en presencia de un denominado “caldo prebiótico”. Estos últimos años han surgido críticas a la interpretación de sus experimentos, por ejemplo se sabe ahora que la atmósfera de la tierra primitiva no era reductora sino más bien neutra y en esas condiciones los experimentos de Miller no dan lugar a las citadas moléculas orgánicas.

Así pues, la teoría del “caldo prebiótico” presenta dificultades serias. Incluso la propia generación de las primeras moléculas orgánicas admite críticas. Estas dificultades han animado a muchos investigadores a buscar rutas alternativas prebióticas para los primeros estadios de la tierra primitiva. Para solventar la anterior dificultad la teoría alternativa más atractiva, a mi juicio, es la propuesta originalmente por Wächterhäuser¹ en la década de los ochenta. Esta teoría ha sido bautizada

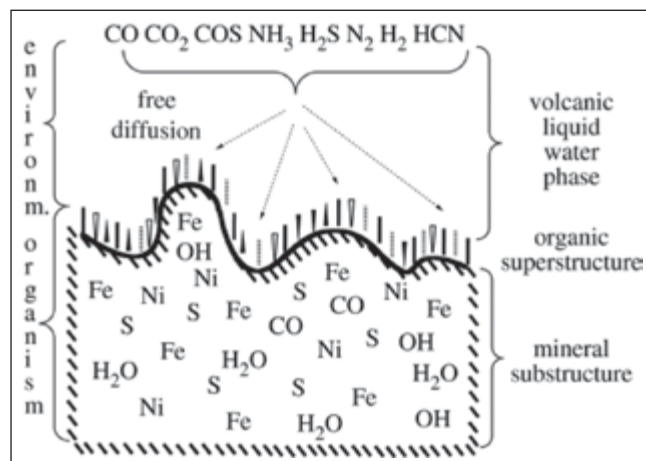


Figura 2: Organismo pionero según la hipótesis de Wächterhäuser.

con el nombre de el mundo Fe-S (“the sulphur-iron World”), o, alternativamente, con el de modelo del metabolismo al inicio (“metabolism first”). En esta teoría el denominado organismo pionero se genera y crece sobre las superficies sólidas de las partículas de minerales que existían en la tierra primitiva, particularmente compuestos de azufre tipo Fe-S o Ni-S, lo que justifica el nombre del modelo. Un esquema de este organismo pionero se muestra en la Figura 2. Un punto muy importante es que los iones metálicos de estos compuestos pueda acelerar enormemente las reacciones entre moléculas sencillas a través de mecanismos catalíticos toda vez que son catalizadores bien conocidos. Algunas de las reacciones superficiales propuestas requieren temperaturas y/o presiones elevadas por lo que se ha conjeturado adicionalmente que estas condiciones podrían haberse encontrado en el entorno de chimeneas volcánicas como las descubiertas en el fondo del océano.

Entre otros papeles, la superficie puede jugar un rol fundamental en alguno de los procesos siguientes: (i) contribución al auto ensamblaje (self-organisation, self-assembly), (ii) Participación en reacciones catalíticas (la superficie es rica en Fe^{++} , Ni^{++} etc) con rendimiento (yield) de la reacción muy alto, (iii) Estabilización de especies intermedias (p.ej. evitando la hidrólisis de oligopéptidos).

¹ Una excelente revisión de sus muchos trabajos es: G.Wächterhäuser, *From volcanic origins of chemoautotrophic life to Bacteria, Archaea and Eukarya*, Philos.Trans.Royal Soc. **361**, 1787 (2006).

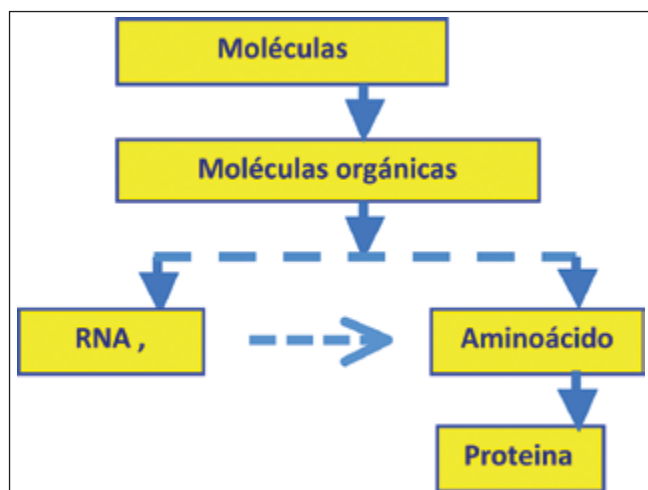
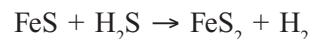


Figura 3: Esquema conceptual de formación de moléculas orgánicas complejas.

Como hemos dicho anteriormente, la teoría del mundo Fe-S otorga un papel preponderante a las superficies de las partículas existentes en la tierra primitiva. No es necesario recalcar la dificultad inherente que tiene el reproducir en el laboratorio cualquiera de las reacciones conjeturadas por una u otra teoría y el monumental esfuerzo que supondría la reproducción detallada del muy complejo proceso de génesis de organismos vivos. Llama la atención el hecho de que prácticamente todos los estudios conducentes a la constatación de la operatividad de las reacciones propuestas en el modelo de Wächterhäuser hayan ignorado sistemáticamente las posibilidades que ofrece la moderna ciencia de superficies. Casi sin excepción, el procedimiento utilizado en la experimentación ha sido el de dispersar los reactantes en medio líquido, sellar el sistema, subir la temperatura hasta un valor prefijado, dejarlo un tiempo del orden de días y estudiar finalmente los productos de la reacción mediante cromatografía de líquidos o técnica similar. Se puede argumentar que este último procedimiento imita las condiciones reales conjeturadas sobre la superficie de la tierra primitiva y es por tanto más realista que cualquier técnica de ciencia de superficies pero nótese que esta objeción sería del todo análoga al problema antes discutido del “pressure-gap” en catálisis, bien resuelta por Ertl en el trabajo que le llevó al premio Nobel en 2007.

Nuestro proyecto está centrado en la aplicación de técnicas bien conocida de Ciencia de Superficies al estudio de las posibles reacciones prebióticas. En la ca-

dena de complejidad que avanza hacia los seres vivos, Figura 3, nuestro interés actual se centra en la primera fase, formación de moléculas orgánicas complejas (la flecha superior de la figura). Muy particularmente nos interesan la reacción básica de generación de energía



y la muy importante de rotura de nitrógeno.



cuyo estudio quizás podría tener implicaciones a la larga en el sector de los fertilizantes, sobre todo si la reacción se produce a temperaturas no muy altas.

Estas reacciones se estudiarán en un sistema de ultraalto vacío con un detector de masas cuadrupolar tal como el que se muestra en la Figura 4. la variación de las especies adsorbidas en la superficie se analiza con un analizador XPS ubicado en el mismo equipo.

CONCLUSIONES

- Todo el universo está constituido por átomos de solamente un centenar de tipos diferentes.
- Aunque conocemos bien el comportamiento de los átomos, la descripción de sistemas complejos (sólidos, vida) es en muchos casos bastante limitada.

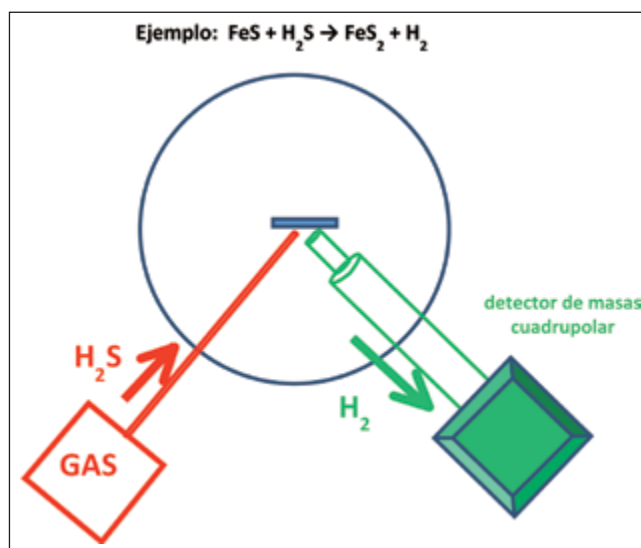


Figura 4: Esquema para la detección de productos de reacción, con un ejemplo.

- Existen propiedades denominadas “emergentes” que son características de sistemas constituidos por un gran número de partículas y que no son previsibles a partir del comportamiento de átomos aislados.
- Estamos en camino (todavía lejos) de “construir”

un sistema con la complejidad de un ser vivo a partir de sustancias inorgánicas.

- Puede que las superficies jueguen un papel importante en las reacciones prebióticas. Más aún las superficies con defectos. Y no hay que olvidar que las nanopartículas son ricas en defectos