

## U<sub>N</sub>

### PROBLEMA CIENTÍFICO

Si creemos que la Vida se originó en la Tierra espontáneamente, al poco de su formación, tras una etapa muy caliente, necesariamente abiótica, hay que descubrir y entender los procesos físico-químicos que condujeron a su aparición. Sabemos hoy, además, que, aparte de los ocho planetas de nuestro sistema solar (cuatro "terrestres" y cuatro "jovianos") en los que fuera de la Tierra la vida es poco probable (aunque la posibilidad de alguna forma presente o pasada de vida en Marte no está absolutamente excluida), existen numerosos planetas extrasolares, varios centenares, que la observación detallada los últimos doce años ha puesto en evidencia.

El origen mismo de la Vida es hoy un problema científico más, como el origen del sistema solar o el de las galaxias. El ruso Oparin propuso los primeros escenarios realísticos hacia 1924: una atmósfera reductora, coacervados proteínicos, etc. Se convocan hoy día, por ejemplo, reuniones trianuales del ISSOL (International Society for the Study of the Origin of Life), donde se discuten los avances en el campo, como cualquier otra sociedad científica (se celebró una reunión este verano 2008 en Florencia). La gran paradoja que presenta la Vida en el Universo es la coexistencia del desorden (azar, entropía grande y creciente) con el orden y el progreso biológico, de las bacterias al Hombre (F. J. Dyson). La paradoja está mitigada por el hecho de que no es la aparición de la Vida en la Tierra la única "transición de fase" tipo desorden-orden: la separación de la materia de la radiación, en el Universo primitivo, ocurrida unos 400.000 años tras el Big Bang, es otro conspicuo ejemplo.

Es, por tanto, un reto importante la indagación sobre la vida extrasolar. De hecho, diversos programas científicos están buscando señales de vida inteligente desde hace decenios; se investigan las señales

de radio que nos llegan y que podrían contener información (programas tipo SETI = Search for Extraterrestrial Intelligence, etc.). La vida inteligente en forma de "humanos", sin embargo, sería sólo una posibilidad remota, y la búsqueda de vida fuera de la Tierra debe comenzar por encontrar restos biológicos incontrovertibles. Por ejemplo, sabemos que el oxígeno de la atmósfera terrestre es de origen biológico, y que la vida en la Tierra se originó en una atmósfera anoxigénica como es, por ejemplo, la atmósfera actual de Marte. Por ello, un descubrimiento primordial sería encontrar oxígeno en abundancia en alguno de los planetas extrasolares. Ni que decir tiene que no se ha detectado nada parecido aún; sí que se ha detectado metano, por ejemplo, en algunos planetas extrasolares pero es, seguramente, de origen abiótico (ver Nature 452, 20-III-2008).

Hay otras posibles claves, empero, y, en este ensayo, vamos a recorrer algunas de ellas. La presencia de moléculas orgánicas de complejidad grande en el material interestelar sería, quizás, una indicación de vida fuera de la Tierra.

### HISTORIA BIOLÓGICA DE LA TIERRA.

Vamos a proceder, por analogía, considerando las etapas que transcurrieron en la evolución de la vida sobre la Tierra, y ver si las condiciones en que esto ocurrió son verosímiles de ocurrir de nuevo en algún planeta de algún sistema solar observable. En particular nos preguntamos: ¿fueron las etapas de la evolución terrestre forzosas, o aleatorias? ¿Es inevitable que la evolución, una vez desencadenada y contando con tiempo suficiente, avoque en el Homo Sapiens? ¿Habrá Superhombres, mucho más inteligentes que nosotros (!), en algún rincón del Universo?

A grandes rasgos, describimos la historia de la vida sobre la Tierra de la siguiente manera. El Universo tiene unos 13 mil millones de

años (desde el Big Bang), el Sol unos seis mil millones, y la Tierra y los demás planetas solares se formaron de la nube protoplanetaria que acompañó a la condensación del Sol, hace unos cuatro mil quinientos millones (todo se dará en millones de años = Ma. de ahora en adelante, salvo indicación expresa de lo contrario).

Las rocas más antiguas de la Tierra (formación Isua en Groenlandia) tienen una antigüedad de unos 3800 Ma. Hay cierta evidencia, algo controvertida, de concentración isotópica en el <sup>12</sup>C, indicativa, posiblemente, de una primitiva acción fotosintética (que favorece la asimilación del <sup>12</sup>C sobre el <sup>13</sup>C). Pero los primeros restos indudables de estructuras que fueron vivas parece que son ciertos estromatolitos en Australia occidental, con una antigüedad de unos 3.550 Ma: los trabajos y descubrimiento de W. Schopf, por ejemplo. Se trata, aparentemente, de bacterias quimiotróficas, alimentadas por supuestos compuestos químicos ricos en energía y generados abióticamente (¿radicales libres?) en la atmósfera altamente reactiva y en la superficie sólida y acuosa de la Tierra.

**“La presencia de moléculas orgánicas de complejidad grande en el material interestelar sería, quizás, una indicación de vida fuera de la Tierra.”**

Para su origen invocamos vulcanismo, un Sol si bien más pálido que hoy día, pero con componente ultravioleta no apantallada por la ausencia de oxígeno (y por tanto de ozono), terremotos, mareas violentas, etc., son escenarios que se citan para la formación de las moléculas o biomoléculas necesarias para los primeros seres vivos. Suscribimos la hipótesis de W. Gilbert de un mundo ARN, pues esa plástica molécula reúne las condiciones

de fenotipo y genotipo necesarias para la conservación y reproducción de las formas vivientes, tal como las contemplamos hoy: la estructura terciaria del ARN con sus hairpins etc., puede producir polímeros relativamente estables frente a la hidrólisis, y las cadenas de ARN se duplican por el mecanismo de Watson y Crick (1953) de bases complementarias.

Los ingredientes bioquímicos para la vida son al menos tres: un tipo de molécula autorepro-

ductora, un mecanismo de conservación de la estructura externa (que en las células evolucionadas son las membranas lípidas) y una capacidad catalítica que, hoy en día, la tienen las enzimas proteínicas.

Creemos que el ARN puede ofrecer un panorama plausible al poder cumplir, aunque primitivamente, las tres condiciones. Las cadenas más cortas de ARN que observamos hoy tienen menos de 100 nucleótidos (por ejemplo, los ARN de transfer); es concebible una vida primordial con viroides y luego virus, con el ARN formándose y deshaciéndose continuamente esperando, digamos, una oportunidad para formar una configuración más estable, capaz de transmitir su conformación y su genoma a la siguiente generación. Los viroides que hoy conocemos (por ejemplo el de la patata) poseen cadenas de unos pocos cientos de nucleótidos, y del mismo tamaño son los ARN del núcleo celular, los ARN mensajeros, etc. Es una idea bien compartida hoy que las numerosas e imprescindibles funciones de los ARN celulares actuales son un "recuerdo" de un mundo ancestral dominado por el ARN (W. Gilbert, 1985).

Para esta etapa, desde el incipiente mundo ARN hasta los estromatolitos, contamos con un tiempo de 300 Ma., y no es absurdo que, durante

ese tiempo, los ensayos random de la naturaleza abocasen a algunas configuraciones estables y transmisibles. El paso del mundo exclusivamente ARN al actual, dominado por el ADN, es fundamental por la mayor estabilidad del segundo. La asociación D&RNA con aminoácidos primero, y con proteínas, después, es una incógnita, pero no es imposible que las hebras crecientes de ARN fijasen selectivamente, aminoácidos hidrófilos que, eventualmente, sirviesen de "cubierta" a los nacientes virus: la aposición podría favorecer, quizá, la formación de enlaces peptídicos. Si con los viroides estamos hablando de cientos de nucleótidos, los virus de ARN más pequeños tienen cadenas de miles y, seguramente, tiene que ocurrir una estabilización de esas cadenas, frente a la degradación, para pasar de cientos, en los viroides, a miles en los virus (el primer virus que se secuenció, por Walter Fierz, tiene 3.500 bases) y a millones en las bacterias (E. Coli tiene más de cuatro millones de bases).

**“La evolución tiene lugar por la imperfección de la reproducción biológica: las mutaciones, responsables de la evolución, ocurren por infidelidades en la reproducción, por acción de agentes externos...”**

La asociación virus-aminoácidos es importante por sus muchas consecuencias: la molécula de ARN tiene propiedades catalíticas (los ribozimas) y puede que las primeras proteínas, o secuencias de aminoácidos (polipéptidos), se formasen catalíticamente. Después, la mayor versatilidad de las proteínas toma el relevo, y ellas son las responsables de la mayor parte de las reacciones que regulan hoy día el comportamiento biológico, son los enzimas por excelencia. Hay que exigirles, en particular, que seleccionen catalíticamente el ADN a partir

del ARN por desoxigenación (y eventualmente, cambio de la base uracil por la timina; el enlace AU y luego el AT tiene dos puentes de hidrógeno, pero el más estable CG tiene tres: éste se ha mantenido desde la etapa ARN).

Hay quien habla de un "progenote", el primer "individuo" vivo capaz de subsistir aislado y de reproducirse. ¿Qué tamaño tendría? Las bacterias más sencillas, tipo micobacterias, tienen genomas próximos al millón de bases, un factor de mil con respecto a los virus: no es razonable el "salto" de  $10^3$  a  $10^6$  a no ser por el descubrimiento, por parte de la naturaleza, de los enzimas correctores, (tipo Eco RI, muy abundante hoy día) que garantizan la fidelidad de la reproducción hasta la escala 1:  $10^9$ : está claro que los virus de ARN deben limitarse a unos 10.000 bases como mucho, pues la infidelidad en la reproducción es del orden de  $10^4$ . Parece ser que los enzimas correctores y la reproducción sexual tienen grandes ventajas evolutivas, pues se adoptaron muy pronto en el decurso de la evolución (lo segundo para regocijo nuestro, diríamos).

Otra idea interesante es que la evolución tiene lugar por la imperfección de la reproducción biológica: las mutaciones, responsables de la evolución, ocurren por infidelidades en la reproducción, por acción de agentes externos, etc. Los seres vivos actuales son imperfectamente perfectos: ocurren mutaciones y las especies progresan pero, localmente, el hijo se parece mucho a la madre...

Este escenario, o uno parecido, debió ocurrir en la Tierra entre 3.800 y 3.500 Ma., pues los estromatolitos que encontramos representan bacterias suficientemente sofisticadas, con su membrana bilípida, sus enzimas intracelulares y su largo cromosoma único enrollado. Se alcanzó así un cierto nivel de estabilidad pues, para el siguiente paso, la célula eucariota, han de pasar mil (millones) más de años. La evidencia de las primeras algas eucariotas unicelulares

se remonta a hace 2.300 Ma., y los primeros metazoos aparecen más mil Ma. después.

Hay muchas lecciones en todo esto pero, entre ellas, quizás la más importante es la "serendipity", el hecho del carácter casual, *at random*, de la evolución de la vida terrestre: una lección de la ciencia moderna, en especial de la Física, es el poder morfogenético del azar. Si tomamos literalmente el tiempo de consolidación de las bacterias (unos doscientos Ma.), el paso a eucariotas (mil) Ma. y a metazoos (mil Ma. más), la tentadora conclusión es que la vida es relativamente fácil de formarse, una vez dadas las condiciones geomorfológicas pertinentes, pero que la evolución posterior es mucho más improbable y aleatoria. Uno incluso estaría tentado a señalar el origen de los eucariotas o de los metazoos como sucesos casuales, transiciones de fase, debidos quizás a alguna causa externa que rompió el equilibrio en que vivían las bacterias, tan ricamente, durante mil Ma.

Sí que es verdad que la mitosis, característica de la célula eucariota, requiere más energía, y que es difícil que se presente en una etapa de la vida sin oxígeno: éste es al principio un tóxico para la célula, y sin embargo el HCN, por ejemplo, hoy intolerable, era un compuesto importante en las primeras síntesis nitrogenadas. Y hay una cierta correlación entre el florecimiento de las plantas fotosintéticas y el enriquecimiento de la atmósfera terrestre en oxígeno... Hay aquí, también, una lección de humildad: no debemos desesperarnos si sólo encontramos bacterias en el primer planeta con Vida...

Sea como fuere, hacia hace 540 Ma. aparece la explosión del Cámbrico que uno, naturalmente, tiende a asociar a un cambio geológico importante (abrirse los océanos, por ejemplo; otro desarrollo importante en la ciencia moderna es la correlación entre evolución biológica y transformaciones geológicas: tectónica de placas, etc; hoy sabemos, ciertamente, que el Himalaya se originó por el choque del subcontinente indio con Eurasia).

Desde el Cámbrico aparecen los animales con huesos que dejan fósiles duraderos. En la formación canadiense Burgess Shale describe S. J. Gould cómo, por ejemplo, se encontró Picaya, un pez precursor de todos los cordados y (luego) vertebrados. Parece ser que faunas parecidas se han encontrado en China y en Sudáfrica. La catástrofe del Pérmico (gran extinción, hacia 270 Ma.) produjo la desaparición de la mayor parte (95%) de las especies, pero así se hizo lugar a otras nuevas: una lección para los ecologistas, la desaparición de especies no es, necesariamente, una mala cosa con una perspectiva a largo plazo.

**“Hay muchas lecciones en todo esto pero, entre ellas, quizás la más importante es la serendipity, el hecho del carácter casual, *at random*, de la evolución de la vida terrestre: una lección de la ciencia moderna, en especial de la Física, es el poder morfogenético del azar.”**

Hay varias catástrofes geológicas bien determinadas en el registro paleontológico y geológico, pero aquí queremos sólo referirnos en singular a la llamada divisoria K/T (cretácico-terciario): el sistema solar posee el cinturón de Kuiper y la nube de Oort, además de la concentración de asteroides entre Marte y Júpiter. Hace 65 millones de años un cuerpo celeste o meteorito, atraído hacia el Sol, fue probablemente desviado por Júpiter y cayó en la Tierra: es el meteorito de Yucatán, que dejó su huella en la costa sur mejicana. La nube de polvo levantada cegó el sol, arruinó los grandes bosques de plantas verdes y produjo, en consecuencia, la extinción

de los dinosaurios y de muchas otras especie. Esto está bien documentado hoy día, pero el descubrimiento ocurrió sólo en 1981, por los Álvarez, padre Luis (Premio Nobel de Física) e hijo Walter, geólogo (la anomalía del iridio es una buena prueba; hay por ejemplo evidencia en Guetaria, España).

¿Puede uno creer que la evolución estaba "pensada" para los dinosaurios como reyes de la creación que, a lo mejor, devenían inteligentes con el paso de la evolución selectiva pero que, al truncarse "el designio original", dieron paso a que unas insignificantes ratitas y lemures evolviesen hacia el Homo Sapiens? En todo caso, otra lección de humildad: el Hombre está hoy aquí "por causalidad", nada hace pensar en una "ortogénesis" que lleva de los viroides a nosotros en línea recta. ¿Cabe pensar en dinosaurios inteligentes en algún planeta extrasolar?

### EVOLUCIÓN GENERAL DE LA VIDA.

En el Universo hay unos  $10^{20}$  estrellas-soles (mil millones de galaxias con billones ( $10^{11}$ - $10^{12}$ ) de estrellas por galaxia), de los que hay que pensar que haya "muchos" Soles como el nuestro, con planetas o, al menos, con un planeta de temperatura y composición parecidas a las de la Tierra: si bien los planetas descubiertos

hasta hoy son más bien "jupiterianos", las nuevas técnicas de observación detectarán planetas mucho más pequeños pronto (si los hay, por supuesto). Sabemos que hay ya cierta evidencia de planetas "terráqueos", aunque están demasiado cerca de su "sol" para poder albergar vida.

Un aplauso a la tecnología actual: ya se han detectado planetas, incluso con atmósfera, a más de mil quinientos años de luz de nosotros, que subtienden, por tanto, desde aquí un ángulo de  $10^{-14}$  radianes! En esos planetas "terrestres" la vida se podría originar "automáticamente", como en la Tierra (?). Al menos, la formación de moléculas orgánicas de complejidad media se ha detectado en los componentes interestelares, incluyendo algunos aminoácidos, nucleótidos, vitaminas, etc. No sabemos, de hecho, si esos compuestos orgánicos extraterrestres se han originado en un planeta con vida, pero lo más probable es que no: desde Oparin, Haldane, Stanley Miller y Juan Oró sabemos de líneas factibles para la síntesis abiótica de péptidos y nucleótidos (aunque el escenario de una atmósfera reductora no se mantiene en la actualidad: la atmósfera primitiva terrestre era anoxigénica, pero neutra). El problema no es tanto la formación de moléculas orgánicas, sino el ensamblaje de ellas para formar estructuras automantendidas en forma primero de viroides, por ejemplo.

¿Son 200 Ma. un tiempo prudencial, u ocurrió la Vida más deprisa en otros lugares, pero sólo lo detectamos al cabo de ese tiempo?

¿Qué pauta siguió la vida después? Son forzosos (?) los pasos observados:

Viroides → virus → bacterias heterótrofas → id. autótrofas → algas procariotas → algas eucariotas (ya hay oxígeno) → plantas pluricelulares



levaduras y hongos, no fotosintéticos → primeros gusanos (eucariotas pluricelulares) → fauna tipo Ediacara, que se extinguió → explosión del Cámbrico ??

La evolución tiene también sus líneas ciegas, sus regresiones, sus intentos fallidos...Ediacara es un ejemplo de ello. ¿Cuántas líneas, potencialmente de progreso evolutivo, habrán abortado por falta de sustento?

La idea más contemplada es que cada vez que nos alejamos del principio del origen de la Vida, el azar, más que la necesidad, domina la evolución. Es un antropomorfismo lo que he apuntado más arriba, que asocia evolución con aumento "automático" de complejidad y de tamaño del organismo: no debemos olvidar que las plantas verdes actuales tienen cianofíceas en simbiosis (los cloroplastos) de modo que, en cierto sentido, como ya ha señalado alguien, las bacterias clorofílicas son las más exitosas de las formas vivientes (hay muchos bosques aún)... pero no saben mecánica cuántica (!).

La especie humana desciende de los primitivos mamíferos que coexistieron con los dinosaurios en la Era Secundaria. Aquéllos aprovecharon los nichos dejados vacíos por éstos para proliferar exitosamente en el Terciario; se impusieron a los reptiles remanentes y a las aves pero, es bueno recordar que, en el subcontinente sudamericano, son las grandes aves (ñandú etc.) las que triunfaron, y los avanzados mamíferos actuales en los Andes etc. bajaron por el istmo de Panamá tras cerrarse éste, hace no más de diez millones de años. ¿Por qué triunfaron los mamíferos frente a las aves cuando éstas pueden volar, lo que sin duda les da enormes ventajas, compárese v.gr. con los insectos? Sea como fuere, los primitivos primates del final del Secundario evolucionaron hacia los monos antropomorfos (El Proconsul parece que vivió hace 25 Ma.), y se cree, con fundamento, (registro fósil, evidencia geológica y análisis cromosómico) que el chimpancé y el Homo Sapiens di-

vergieron hace no más de 6 Ma. El bonono, una especie de chimpancé enano, divergió del tronco de antropomorfos después que lo hiciera Homo, hace "solo" 2 Ma., y es curioso que ciertas tribus africanas no lo cazan por su parecido humano que incluye el apareamiento tête a tête, como (algunos de ) nosotros hacemos.

En Atapuerca acaban de encontrar restos humanos con más del millón de años, un record para Europa. Situamos a los Neanderthal hacia el medio millón de años, y la emigración africana del Homo Sapiens Sapiens parece que ocurrió hace unos 300000 años. Es el Hombre de Cromagnon que convive en Europa, un breve tiempo, con el Neandertal, el cual acaba por desaparecer. Desde hace unos treinta mil años, el Hombre no parece que haya evolucionado anatómicamente mayormente: hoy día nosotros somos Cromagnones recientes, en anatomía, capacidad craneal etc., pero vivimos más años.

## "Es plausible encontrar vida fuera de aquí, pero esperar *marcianitos* es hoy, aún, ciencia-ficción."

### SEÑALES DE VIDA EXTRATERRESTRE.

La idea es que la Vida se forma espontáneamente en cuanto se dan las condiciones geológicas y químicas para ella pero, que a partir de eso, la evolución es totalmente impredecible. Para resumir diríamos que, si bien la Vida debe ser un fenómeno universal, ligado a la materia, el que haya plantas y animales, o respiración por oxígeno, o dinosaurios en vez de hombre dominando el planeta, es un hecho fortuito. En la Tierra ha sucedido así, pero en los planetas de Sirio será, quizás, de otro modo: a lo mejor

no se ha pasado del nivel de las bacterias. Una objeción a considerar es si la Vida se origina en contra del segundo principio, en el sentido de ser muy improbable, pero que se dió. Creemos que no, que debe ser inevitable. Como hemos dicho, hay un poder morfogenético en el azar, el hecho de que la formación de estructuras es perfectamente posible (y mandatario) en un mundo originariamente caótico. Por ejemplo, nadie diría que el sistema solar nuestro está "desordenado" y, sin embargo, los planetas se formaron por acumulación al azar de planetesimales. En ese sentido, la fuerza de la gravitación es un desafío permanente al segundo principio, como lo es la Vida: vivimos, pero moriremos, y no hay equilibrio termodinámico en un sistema gravitatorio.

En física hay una frase "selforganizing criticality", para indicar que la autoorganización es compatible (de hecho, se sigue) con unas condiciones iniciales erráticas...Dyson gusta de hablar de la morfogénesis como una transición de fase, que se da tanto en el mundo inanimado (paso del gas desordenado al cristal ordenado,

por ejemplo) como en Biología (paso de procarriota a eucariota, por ejemplo).

En este escenario es donde debe buscarse la Vida fuera de la Tierra: moléculas orgánicas, atmósferas oxigenadas, meteoritos con sustancias orgánicas, etc. Queremos creer que todo ello constituirá un campo de investigación importante en este incipiente siglo XXI. Pero también hay un campo de experimentación en la propia Tierra: por ejemplo, ya podemos modificar genéticamente las bacterias, y hacerlas que produzcan enzimas aprovechables. Si la manipulación genética se desarrolla, cabe preguntarse por teratologías, es decir, modificar los genomas para producir seres vivos diferentes de los actuales (de momento, gusanos u otros invertebrados primitivos).

Veríamos así por qué la evolución en nuestro planeta siguió unas líneas y no otras... aunque nos tememos que estos experimentos encontrarán objeciones éticas en seguida. Como resumen, la búsqueda de Vida es un programa de investigación que puede iniciar ya, con nuestros conocimientos actuales y nuestra tecnología; pero sus resultados son impredecibles, tanto más cuanto más exigentes seamos: es plausible encontrar (¿pronto?) vida fuera de aquí, pero esperar "marcianitos" con brazos y manos como nosotros, es hoy aún ciencia-ficción.

Luis J. Boya  
Departamento de Física Teórica  
Miembro del Senatus Científico  
luisjo@unizar.es

