

CONFERENCIAS CÉLEBRES

Continuamos esta sección de la revista, dedicada a Conferencias célebres impartidas en la Universidad Autónoma de Madrid a lo largo de su historia, bien como Lecciones inaugurales de curso académico, o bien impartidas en su investidura por Doctores Honoris Causa nombrados por esta universidad. Se trata por tanto de conferencias con importantes contenidos relacionados con la ciencia y el progreso del conocimiento, e impartidas por personalidades ilustres del mundo académico, científico o social.

En esta ocasión publicamos el Discurso de Investidura como Doctor Honoris Causa de la Universidad Autónoma de Madrid en 1998, de la **Dra. Lynn Margulis**, Doctora en Ciencias Físicas y Matemáticas por la Universidad de California, y que recibió la Medalla Nacional de Ciencia en EE.UU.

DISCURSO DE INVESTIDURA COMO *DOCTOR HONORIS CAUSA* POR LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

de

Dra. Lynn Margulis

*Doctora en Ciencias Físicas y Matemáticas por la Universidad de California
Medalla Nacional de Ciencia en EE.UU.*

UNA REVOLUCIÓN EN LA EVOLUCIÓN

*Magnífico y Excelentísimo Señor Rector
Excelentísimas Autoridades Académicas
Miembros de la Comunidad Universitaria
Señoras y Señores*

No exagero si digo que mi madurez científica debe mucho a este país, España, del que admiro su fuerza, entusiasmo e idiosincrasia, que lo hacen único y complejo; diferente, sí, pero no en el sentido irónico que muchas veces me ha parecido entrever en labios de sus ciudadanos. Desde los Pirineos nevados y boscosos hasta las metálicas aguas de Gibraltar, desde las brumosas costas de Galicia hasta las sequedades perennes de Almería, el país me ha servido de inspiración y estímulo. Especialmente hay dos lugares en Cataluña, la zona cárstica de Bañolas y los sedimentos fértiles del delta del Ebro, donde he encontrado material que me ha permitido complementar algunas de mis propuestas, en especial en lo que se refiere al origen de la sexualidad y de la motilidad celular.

Fue en un viaje, uno de los muchos que he hecho de Madrid a Barcelona, cuando la contemplación de unos helechos que, bajo el ardiente sol de Castilla, aparecían secos, me obligó a pensar en el incontrovertible hecho de la sexualidad. Bajo el sol tórrido, las frondes y los esporófitos de los helechos mueren, pero los gametofitos, con sus raíces entrelazadas con las micorrizas, sobreviven sin problema. Esperan en estado haploide y soportan la sequía durante largas semanas. Pero ¿qué sentido tiene la alternancia de generaciones, el cambio de haploide a diploide? La respuesta fue surgiendo a

medida que continuaba el viaje y se sucedían los helechos aparentemente muertos. La sexualidad es la respuesta de la vida eucariótica a los cambios de las estaciones del año. La vida es una lección de permanencia, de espera para reproducirse cuando las condiciones ambientales cambian y le son favorables. Ejemplos de supervivencia y de adaptación los hallamos en la motilidad bacteriana, como la que muestra la espiroqueta vivípara *Spirosymplokos deltaeiberi* y el espirilo gigante *Titanospirillum velox*, protagonista este último de uno de nuestros trabajos más recientes, todavía inédito.

A lo largo de mi carrera y de mi vida profesional, he tenido muchos amigos y compañeros de trabajo, de los cuales he aprendido mucho y, creo, que ellos también de mí. Sería largo nombrarlos a todos, pero voy a referirme hoy a los españoles. En primer lugar, está el Prof. Ricardo Guerrero, con quien llevo muchos años colaborando y que fue quien me permitió conocer al grupo más entusiasta y numeroso de investigadores en este país. A lo largo de más de quince años de trabajo en conjunto, tanto en ambientes naturales como en el laboratorio, he podido comprobar con él que el científico no tiene por qué abandonar las inquietudes intelectuales, y que la ciencia y la cultura son dos frutos inseparables del intelecto humano. Al Prof. Ricardo Amils doy las gracias porque merced a él estoy hoy aquí, recibiendo este honor inmerecido, que me emociona y que agradezco muy profundamente.

El camino recorrido desde que conozco a Ricardo Guerrero y a Ricardo Amils ha sido largo y fructífero, porque nos ha permitido trabajar juntos en muchas ocasiones. Han venido a España personas de mi grupo y han ido a Estados Unidos muchos miembros de sus equipos. Y siempre, trabajando juntos en cualquier lugar, algo que hoy resulta mucho más fácil con este sistema a veces fantástico, a veces exasperante de Internet y el correo electrónico, hemos estado unidos por un lenguaje común, el método científico, y por un común objetivo, el descubrimiento de los arcanos vitales que subyacen en el interior de los organismos más pequeños. No puedo menos de nombrar aquí a mis colegas y compañeros Isabel Esteve, Núria Gaju, Carlos Pedrós-Alió, Mónica Solé, Jordi Mas-Castellà, Toni Navarrete, y otros entrañables amigos, sobresalientes científicos que ustedes conocen y yo quiero recordar, Ramon Margalef, Marta Estrada, Mercè Durfort, Juli Peretó, Martí Domínguez.

¿Cómo se inició el camino que me ha traído aquí? Tenía entre 13 y 14 años cuando con la Sra. Kniazza, norteamericana de origen italiano, estudiaba en la Hyde Park High School, de Chicago, y elegí el estudio como segunda lengua del castellano, en lugar del alemán o del francés. Dos años después, mi magnífico profesor de ciencias sociales, David Riesman, buscaba estudiantes para trabajar en México. Su colega, el antropólogo Oscar Lewis (autor de *Hijos de Sánchez*, *Cinco Familias*, *Tepoztlan Revisited*, etc.) necesitaba ayuda para acabar su libro *Life in a Mexican Village Revisited*.

Yo tenía un buen acento, pero apenas conocía el léxico castellano. No obstante, después de una entrevista telefónica, el Prof. Lewis me "empleó" (en realidad, tuve que pagar créditos de la Universidad de Illinois-Urbana). Era la segunda vez que iba a "nuestro vecino del sur". El año anterior, cual si se tratara de una aventura adolescente, había viajado en autobús desde Chicago a Ciudad de México, donde estuve dos semanas. La aldea que se extiende bajo el Tepozteco cambió mi vida. Empecé a comprender la organización social de la comunidad y la importancia del dicho africano "para educar a un muchacho, se necesita un pueblo". Acabé hablando con bastante soltura el idioma de los Conquistadores y aprendí unas 200 palabras de la lengua de los vencidos, el nahuatl, el idioma de los Tlahuicas, que vivían desde hacía 3000 años en el "lugar del hierro" (tlan=lugar, tepoz=hierro).

Había estudiado ya los siete curanderos de Tepoztlan para el párrafo sobre cambios de la salud en *Life in a Mexican Village Revisited*, cuando poco después, en compañía de Carl Sagan, asistí a una reunión sobre el origen de la vida. En el curso de esa reunión de la New York Academy of Science (NYAS) conocí al Prof. Joan Oró, y trabamos una amistad que sigue manteniéndose en la actualidad. Él sabe que cuenta con mi respeto y admiración por su trabajo. Y él, y otras personas en diferentes lugares, me dijeron que nunca comprendería México sin conocer la "madre patria". Tenían toda la razón.

Luego de casi veinte años de vivencias en América Latina, especialmente en México y Colombia, recibí una invitación de Joan Oró para dar un cursillo en Barcelona sobre la evolución de la célula. Era el año 1973 cuando crucé el "charco" y pude conocer lo hispano en su propia cuna.

Para el ojo no habituado, unas planicies como las que se encuentran en Baja California (México) no serían más que capas de lodo de diferentes tonalidades; pero son algo más que eso, son vastas extensiones de comunidades de microorganismos, lo que conocemos como tapetes microbianos, que muestran una textura pegajosa y flexible. Son la piel viva de la Tierra. Y durante más de dos mil millones de años, la única vida sobre ella. A los tapetes microbianos he dedicado una gran parte de mi investigación. Su estudio me ha permitido unas veces ir afianzándose en mis ideas sobre la evolución de los seres vivos y otras me ha sugerido su modificación. Esas ideas sobre la evolución, y especialmente sobre la revolución que tuvo lugar en ella, es sobre lo que voy a tratar desde este podio, con el permiso de todos ustedes.

El papel esencial que ha desempeñado en la evolución la simbiosis de dos tipos muy diferentes de microorganismos es una auténtica revolución, un nuevo paradigma. Una simple ojeada a los libros de texto permite comprobar, sin embargo, que la simbiosis no ha sido una de las ideas tomadas como base de la evolución. Mi teoría del origen simbiogénico de las células animal y vegetal, y de cualquier otro tipo de célula con núcleo, se basa en cuatro postulados. En todos ellos interviene la simbiogénesis: incorporación y fusión del cuerpo celular por simbiosis. La teoría destaca con precisión los pasos que probablemente tuvieron lugar en el pasado, especialmente en el caso de las células verdes de las plantas. Las células que precedieron a las plantas eran verdes, de gran tamaño y dotadas de pared, y estaban ya presentes en las algas verdes.

Donde mejor se aprecia que las células nucleadas se originaron por fusión es en las plantas, ya que las células vegetales son grandes y hermosas y resulta muy fácil ver sus orgánulos. La idea es muy clara: cuatro antecesores que una vez fueron totalmente independientes y estuvieron separados físicamente se combinaron en un orden determinado para convertirse en las células de las algas verdes. Los cuatro eran bacterias, cada una de un tipo diferente, y los descendientes, tanto de las formas combinadas como libres, siguen viviendo en la actualidad. Se puede decir que los cuatro tipos son mutuamente dominantes, atrapados en la planta y como parte de la célula. Cada uno de dichos tipos proporciona indicios de sus antepasados; en sentido químico, la vida es tan conservadora que incluso se puede deducir el orden preciso en que se combinaron. El término "seriada" de "la teoría endosimbiótica seriada" se refiere al orden en que se produjeron las diferentes combinaciones.

Creo que ya son muchos los científicos que están convencidos de que las células y los orgánulos se originaron como consecuencia de simbiosis a largo plazo. Por supuesto, sólo una pequeña parte de la teoría y de las pruebas que la corroboran se debe a mi trabajo, pues a ella han contribuido numerosos científicos. Mi preocupación, y ocupación, es ahora extender esa idea para mostrar que otros organismos y órganos, e incluso sistemas de órganos en individuos de mayor tamaño también se originaron por simbiogénesis. Cuando los simbiosistas se unieron totalmente, cuando se fusionaron dando lugar a un nuevo organismo, el nuevo "individuo" resultado de dicha unión por definición decimos que se originó por simbiogénesis. Si bien el concepto de simbiogénesis es de hace un siglo, sólo ahora disponemos de las herramientas necesarias para examinar rigurosamente su significado e implicaciones.

Intentaré esbozar la idea de la forma más sencilla. Tenemos en primer lugar un tipo de bacteria con apetencia por el azufre y por el calor, fermentadora, llamada "arqueobacteria". Y también tenemos una "eubacteria" nadadora. Ambas se juntan y de esta combinación integrada surge el núcleo- citoplasma o la sustancia básica de los antecesores de las células animal, vegetal y fúngica. (Las células fúngicas incluyen setas y levaduras.) Las células animales, vegetales y fúngicas se denominan "células nucleadas" ("eucariotas") porque, acuosas y traslúcidas, contienen un núcleo visible. En la división celular, el núcleo rodeado de membrana desaparece, la membrana nuclear se disuelve y los cromosomas se hacen visibles cuando la cromatina, el material del que están hechos los cromosomas, se enrolla y forma estructuras más gruesas. En los libros de texto, la explicación de este proceso es que la cromatina se condensa en

cromosomas visibles y contables, cuyo número es representativo de las especies en cuestión. La danza de los cromosomas, que después desaparecen en cromatina apenas enrollada, cuando la membrana nuclear vuelve a formarse, constituyen algunas fases de la conocida forma de división celular llamada "mitosis". La mitosis, con sus muchas variaciones, se originó en las células nucleadas primitivas. Más tarde, otro tipo de microorganismo de vida libre, una eubacteria respiradora de oxígeno (que acabaría siendo la mitocondria) se incorporó a la combinación anterior. Aparecieron incluso células mayores y más complejas. El conjunto formado por la combinación de una bacteria con apetencia por el calor y por el azufre, una nadadora y una respiradora de oxígeno adquirió la capacidad de asimilar alimentos particulados. Estos seres complejos y sorprendentes, estas células con núcleo, nadadoras y respiradoras de oxígeno, aparecieron por primera vez en la Tierra hace unos dos mil millones de años.

La segunda combinación, que permitió respirar oxígeno, condujo a células de tres componentes que toleraban cada vez más cantidad de oxígeno libre en el aire. Unidas, la sutil eubacteria nadadora, la arqueobacteria amante del azufre y del calor y la eubacteria respiradora de oxígeno, formaron un único individuo, capaz de proliferar y generar millones de descendientes.

En la última adquisición de la serie generadora de células complejas, las bacterias respiradoras de oxígeno fueron ingeridas, pero las bacterias fotosintéticas, verdes y brillantes, no pudieron ser digeridas. La "incorporación" literal tuvo lugar solamente después de una gran lucha, en el curso de la cual prevalecieron las bacterias verdes no digeridas. Finalmente se convirtieron en los cloroplastos que conocemos hoy. Estas bacterias verdes, con apetencia por la luz del sol, se integran totalmente con las otras, siendo el cuarto componente. Esta última unión condujo a la aparición de las algas verdes nadadoras. Las antiguas algas verdes nadadoras no solamente fueron las antecesoras de las actuales células vegetales, sino que todos sus componentes individuales están vivos y siguen nadando, fermentado y respirando oxígeno.

Creo que mi mejor trabajo ha sido el desarrollo de los detalles de la teoría endosimbiótica seriada (SET, *serial endosymbiosis theory*). La idea principal es que los genes extra del citoplasma de las células animales, vegetales y de otras células nucleadas no son "genes desnudos", sino que se originaron como genes bacterianos. Estos genes son un legado palpable de un pasado violento y competitivo. Las bacterias, hace mucho tiempo, fueron parcialmente devoradas y atrapadas dentro de los cuerpos de otras; devinieron así orgánulos. Las bacterias verdes fotosintetizadoras y productoras de oxígeno, llamadas cianobacterias, todavía existen en estanques, arroyos, lodos y playas. Sus parientes cohabitan con un gran número de organismos mayores: son todas las plantas y todas las algas.

La razón de que los primeros genetistas vegetales descubrieron genes en los cloroplastos de las células vegetales es que siempre están ahí. Esos pequeños descendientes verdes de las cianobacterias están en todo momento presentes en cualquier célula vegetal.

Las cianobacterias y los cloroplastos están tan emparentadas como las mitocondrias y las bacterias respiradoras de oxígeno de vida libre. Los antecesores de las mitocondrias de animales y plantas también empezaron como bacterias libres. Ésta es mi opinión, compartida por algunos estudiosos anteriores a mí, a menudo injustamente ignorados. Las mitocondrias, fábricas de energía intracelular, producen energía química en el interior de las células de todos los animales. Y en las plantas y en los hongos. Las mitocondrias también son residentes habituales en la mayoría de la oscura miríada de seres microbianos-los protoctistas- de los que se originaron plantas, animales y hongos. En números absolutos, cloroplastos y mitocondrias son las formas de vida dominantes en la Tierra, por encima de los humanos. Dondequiera que vayamos los humanos, también van las mitocondrias que habitan nuestro organismo, aportando la energía necesaria para el metabolismo.

La simbiogénesis, una idea que tomé de la persona que acuñó el término, Konstantin Mereschkovky (1885-1921), se refiere a la formación de nuevos órganos y organismos mediante uniones simbióticas, y es un hecho fundamental en la evolución. Todos los organismos suficientemente grandes como para que podamos verlos están compuestos de microorganismos que en otro tiempo fueron

independientes y se agruparon para formar un organismo completo mayor. Con dicha unión, muchos perdieron lo que retrospectivamente reconocemos como su individualidad original.

Permítanme hacer alarde, junto con mis estudiantes y colegas, de haber vencido en tres de las cuatro batallas de la teoría endosimbiótica seriada. Actualmente, podemos identificar tres de los cuatro componentes en el origen de la individualidad celular. Los científicos preocupados con esta historia admiten hoy que la sustancia básica de la célula, el nucleocitoplasma, procede de las arqueobacterias; en particular, que la mayor parte del metabolismo productor de proteínas proviene de "arqueobacterias similares a *Thermoplasma*". Las mitocondrias respiradoras de oxígeno de nuestras células y de otras células nucleadas se originaron a partir de simbioses bacterianos, actualmente denominados "bacterias purpúreas" o "proteobacterias". Los cloroplastos y otros plástidos de algas y plantas fueron antes cianobacterias fotosintéticas de vida libre.

Queda pendiente una cuestión importante y conflictiva: ¿cómo se originaron los apéndices nadadores, los cilios? Aquí es donde la mayoría de los científicos no están de acuerdo conmigo. Prefieren la descripción de Max Taylor a mi teoría simbiótica. Taylor y sus colegas de la Universidad de British Columbia, en Vancouver (Canadá), están a favor de una teoría no simbiótica, "ramificada", del origen de las primeras células nucleadas. La suya es todavía la idea que prevalece. Pero tenemos pruebas de la existencia de otro enigmático integrante bacteriano. Mi propuesta es que otro organismo diferente, un tipo de bacteria nadadora, fue incorporado simbióticamente en aquella primera fase del origen de las células nucleadas. Esa primera combinación ocurriría hace quizá dos mil millones de años. La idea fundamental es que los cilios, las colas de los espermatozoides, las protuberancias sensoriales y otros muchos apéndices de las células nucleadas se originaron en la primera fusión auténtica de la arqueobacteria de tipo termoplasma con una eubacteria nadadora. Me atrevo a pronosticar que en una década alcanzaremos este punto final.

Las bacterias que se combinaron en simbiosis nos dejaron indicios de su anterior independencia. Tanto las mitocondrias como los plástidos son bacterianos en cuanto a forma y tamaño. Aún más, estos orgánulos se reproducen de manera tal que pueden observarse muchos de ellos simultáneamente en el citoplasma, pero nunca dentro del núcleo. Los dos tipos de orgánulos, plástidos y mitocondrias, no sólo proliferan en el interior de las células, sino que se reproducen de manera diferente a como lo hace el resto de los materiales de la célula en la que residen, y en tiempos también distintos. Ambos tipos conservan, probablemente después de mil millones de años de su incorporación inicial a la otra célula, una parte de su DNA inicial. Los genes de DNA ribosómico de las mitocondrias todavía se parecen sorprendentemente a los de las actuales bacterias respiradoras de oxígeno de vida libre. Los genes ribosómicos de los plástidos son muy parecidos a los de las cianobacterias. Al principio de la década de 1970, cuando se compararon por primera vez las secuencias de nucleótidos en el DNA de los plástidos en las células algales con las secuencias de cianobacterias de vida libre, se encontró que el DNA del cloroplasto era mucho más parecido al DNA de cianobacterias que al del núcleo de su propia célula. El caso se cerró. La triple comparación de estas secuencias de DNA (del núcleo, de orgánulos y de codescendientes de vida libre de estos orgánulos) mostró el origen bacteriano de los plástidos. Un caso análogo fue el de unos orgánulos menos vistosos, las mitocondrias. No hizo falta ningún testigo, viajero del tiempo, para contarnos su historia.

Los cilios, la cola de los espermatozoides, las protuberancias sensoriales y otros flagelos celulares siempre tienen en la parte inferior pequeños puntitos, los llamados "centriolo-cinetosomas". Los cilios y los componentes celulares con el mismo origen están asociados al movimiento celular. Estos orgánulos están incluso más integrados en las células que mitocondrias y plástidos. Parte del problema para explicar el origen de este tipo de orgánulos es que se les han dado diferentes nombres, todos ellos confusos. La parte crucial de la teoría empieza en los puntitos subyacentes.

Los enigmáticos centriolo-cinetosomas actúan como semillas diminutas. Las colas de los espermatozoides, los cilios, y, en algunos otros organismos, el huso mitótico, son esenciales para el movimiento de los cromosomas en la división celular, que se extiende desde las pequeñas semillas, como

por arte de magia. Una célula, dependiendo de su linaje, puede ser que desarrolle uno o varios centriolo-cinetosomas, tanto en conexión con centriolos preexistentes como aparentemente de la nada. (Ésta forma es la llamada aparición "de novo" de los centriolo-cinetosomas.) La cronación, o "timing", es crucial. Una célula desnuda puede formar muchas "semillas" de centriolo-cinetosomas, que fabrican todas ellas protuberancias simultáneamente. Todas las "semillas" de centriolo-cinetosomas están hechas de túbulos proteicos delgados, llamados microtubulos. La proteína de las paredes de los túbulos, como cabría esperar, recibe el nombre de tubulina.

La aceptación del origen simbiótico de las mitocondrias y de los plástidos fue completa cuando se descubrió que ambos tipos de orgánulos contienen DNA diferente, separado del del núcleo e inequívocamente bacteriano por su composición y su organización. El DNA de estos orgánulos codifica sus propias y peculiares proteínas, que, como en las bacterias de vida libre, se sintetizan en el interior de las mitocondrias y de los plástidos. Ford Doolittle y Michael Gray, biólogos moleculares de la Universidad de Dalhousie en Halifax (Canadá), muestran secuencias de DNA en mitocondrias y plástidos extremadamente parecidas a aquéllas de determinadas bacterias de vida libre. En este momento los científicos aceptan éstas y muchas otras señales como prueba de la versión moderada de la endosimbiosis seriada (la que explicaría el origen del núcleo, de los cloroplastos y de las mitocondrias).

Pero ¿qué hay de mi teoría "extrema"? ¿Existe algún remanente bacteriano diferente o algún centriolo-cinetosoma ancestro de las células eucarióticas? Pienso que la integración de la bacteria centriolo-cinetosómica fue el primer paso para la aparición de la célula eucariota. Si estoy en lo cierto, la simbiogénesis marcaría la diferencia entre la vida constituida por células nucleadas y todas las bacterias. No hay término medio: o un grupo de organismos se originó por simbiogénesis o no lo hizo. Mi afirmación es que todos los organismos nucleados (protistas, plantas, hongos y animales), se originaron por simbiogénesis cuando las arqueobacterias se fusionaron con antepasados de los centriolo-cinetosomas, para dar lugar al primer ancestro de los protistas: la célula con núcleo.

Radney Gupta, de la Universidad McMaster (Canadá), continúa presentando pruebas detalladas, aunque arcanas, de la naturaleza "quimérica" de las primeras células nucleadas. Se basa exclusivamente en el análisis de las secuencias de aminoácidos en muchas proteínas indispensables. Utiliza diferentes términos y criterios, pero compartimos algunas ideas básicas: la fusión arqueobacteriana-eubacteriana produjo los primeros ancestros nucleados.

En lo que sí hay acuerdo es en admitir que la aparición de las células fue una innovación esencial en la evolución que llevó a formas de vida de mayor tamaño en la Tierra. Los primeros microorganismos con núcleo fueron pequeños nadadores que evitaban el oxígeno. Hoy en día estarían incluidos en el reino de los protoctistas.

Mis estudiantes de doctorado, tanto los antiguos, que ya siguen sus propias carreras profesionales, como los actuales (Greg Hinkle, David Bermudes, Mike Dolan, Betsey Dyer, el español Ugo d'Ambrosio) y yo misma, seguimos estudiando la hipótesis "extrema". En nuestro esquema hipotético se pueden detectar restos de la antigua unión bacteriana en la composición química de todas las células nucleadas y en su comportamiento. Desde luego, necesitamos más pruebas para convencernos completamente a nosotros mismos.

El orden de los acontecimientos es esencial en la evolución. Las espiroquetas, con su forma de sacacorchos, enrolladas como serpientes, son los velocistas del mundo microbiano. Se desplazan de un lado para otro, arriba y abajo, a derecha e izquierda, en fluidos viscosos como lodo, fango, mucus y tejidos vivos. Como en la actualidad, en el pasado remoto también nadaban más rápidamente que otras bacterias. Veloces y prolíficas, invadieron el espacio interior de las arqueobacterias, y las espiroquetas que interactuaron con dichas arqueobacterias sobrevivieron. Sus descendientes participan hoy en día inextricablemente en el movimiento mitótico y en otros comportamientos de las células complejas. Sus socios están tan fusionados que resulta difícil reconstruir el panorama original. Pero no imposible.

Todas las células con mitocondrias tienen también microtúbulos, remanentes de las antiguas formas de movimiento ondulante. Esto es coherente con la idea de que la simbiosis entre espiroquetas y arqueobacterias ocurrió en primer lugar. Hoy, algunas células nadadoras que no toleran el oxígeno y se reproducen por mitosis carecen todavía de mitocondrias. De ello se puede deducir que el ancestro mitótico de la vida eucariótica se originó antes de que el oxígeno llegara a todos los rincones de la atmósfera.

Las espiroquetas actuales nadan tanto en ambientes ricos en oxígeno (estanques) como en otros pobres en dicho elemento (intestino de los termites o comejenos). A veces se adhieren tan hábilmente a sus vecinos, que los biólogos confunden sus puntos de unión con centriolos-cinetosomas y sus cuerpos con cilios. Es muy abundante el número de espiroquetas que habitan actualmente en el intestino de insectos xilófagos. Unas pocas viven en tejidos humanos, por ejemplo, boca, intestinos o testículos. Las hay que se desarrollan bien en el lodo y otras que viven en las membranas de algunos protistas, como los ciliados del lodo o las tricomonas. Las espiroquetas en general se desarrollan bien en hábitats húmedos, ricos y oscuros. Su vida consiste básicamente en moverse de forma rápida y ondulante, en alimentarse y clonarse. Se reproducen por división transversal como las eubacterias. La formación de los cilios empezó cuando las primeras espiroquetas se trasladaron al interior de vecinos vulnerables donde los hubiera; algunas nunca regresaron al exterior. Del movimiento mutuo de un buen número de pequeñas espiroquetas, y tras un largo proceso de integración, se originaron los primeros protistas, que eran células nadadoras con núcleo.

Los centriolos y los cinetosomas, a modo de amigables Dr. Jeckyll y Mr. Hyde, nunca coinciden en la misma célula simultáneamente. En muchas células los centriolos se transforman en cinetosomas que desarrollan sus ejes en cuanto termina la división celular mitótica. Esto apunta hacia una única identidad para ambos componentes celulares. En 1898, Henneguy, profesor de fisiología en París, y Y. von Lenhossek, en Budapest, se dieron cuenta de la identidad del centriolo con el cinetosoma en el tejido animal y escribieron sobre ello. Su idea de que los centriolos mitóticos se reproducen y mueven desde los polos mitóticos, convirtiéndose en los cinetosomas de los cilios, se llamó "teoría Henneguy-Lenhossek". Una vez probada su validez por microscopía electrónica, ya fallecidos ambos biólogos, aquella teoría me sugirió la utilización de la palabra "centriolo-cinetosoma". Pienso que las espiroquetas formaron originariamente estructuras de anclaje a estructuras de arqueobacterias susceptibles. A medida que se interpretaron simbióticamente, el punto de anclaje pasó a ser el centriolo cinetosoma actual. El experto en simbiosis de la Universidad de Oxford, David C. Smith, compara los restos teóricos de las espiroquetas simbióticas en el interior de células nucleadas con el gato de Cheshire, de Lewis Carroll. Así como el gato desaparece lentamente, dejando una sonrisa enigmática flotando en el aire, "el organismo pierde progresivamente piezas de sí mismo, lentamente se confunde con la materia básica y su existencia anterior es traicionada por alguna reliquia". El organismo incorporado pasa a formar parte del interior de la otra célula participante en la unión. Cuando la fusión es completa, es difícil determinar las contribuciones genéticas relativas de cada integrante.

Incapaz de detectar el DNA del centriolo-cinetosoma en las algas verdes, Joel Rosenbaum de la Universidad de Yale, y otros investigadores, niegan su existencia. Incluso la prueba circunstancial de la hipótesis de las espiroquetas resulta desesperadamente insuficiente. Estoy preparada para reconocer que me he equivocado. Tal vez bacterias que no eran espiroquetas, o algún otro tipo de eubacterias, según la hipótesis de Radney Gupta, dieron lugar a otras células hace mucho tiempo. Tal vez ni tan siquiera intervino la simbiosis en el origen de los eucariotas anaeróbicos. Ni Carl Woese ni Thomas Cavalier-Smith comparten mis ideas; no ven el papel de la simbiogénesis en el origen de los protistas anaeróbicos primitivos. De todas formas, creo que no hace falta ser Sherlock Holmes para sugerir que en el pasado un actor microbiano aumentó muchísimo la velocidad natatoria de lo que luego se convirtió en un consorcio. La descendencia idéntica de la motilidad se mantiene.

Las neuronas, las células nerviosas de nuestro cerebro y los nervios periféricos, están repletos de microtubulos formados de tubulina. Son idénticos a los microtubulos de los que están hechos los cilios, las colas de los espermatozoides y las paredes de los centriolo-cinetosomas. Los axones y las dendritas,

que son las extensiones de las células nerviosas que procesan la información en nuestras mentes, están formadas esencialmente por microtubulos. Nuestro cerebro, y el pensamiento necesario para oír o leer esta frase, si mi radical teoría simbiótica es correcta, se formaron gracias a las proteínas microtubulares que evolucionaron primero en las bacterias. Incluso si algún día llegase a demostrarse que esta especulación sobre las espiroquetas es incorrecta, el propio hecho de pensar en la simbiosis es un fenómeno simbiótico en sí mismo. El oxígeno que respiramos y que alcanza nuestro cerebro a través del torrente circulatorio, es metabolizado incesantemente por las mitocondrias, que sabemos que son antiguas bacterias respiradoras de oxígeno. Sean o no las espiroquetas la base de nuestro organismo, somos igualmente seres simbióticos en un planeta simbiótico.

Vladimir I. Vernadsky, científico ruso de la primera mitad del siglo xx que fue pionero en el estudio de la biosfera, considera la vida como un tipo especial de mineral: agua animada. Por su parte, Karl Popper, uno de los principales filósofos del siglo xx, ve a los seres vivos como "solucionadores de problemas". Tanto Verndasky como Popper reconocen un aspecto de los sistemas vivos que no es tenido suficientemente en cuenta por los neodarwinistas que se centran en la adaptación y en el número de individuos, y que tratan de hacer explícito quienes abrazan la autopoyesis. En la visión autopoyética del mundo los seres vivos hacen algo más que adaptarse a un ambiente físico-químico que es pasivo; la actividad de cada organismo es la causa de que se produzcan cambios continuados en el ambiente. El oxígeno que respiramos, la húmeda atmósfera en cuyo interior vivimos, y las aguas ligeramente alcalinas de los mares donde crecen algas y nadan las ballenas no están determinados por un universo físico regido por leyes mecánicas; el ambiente es producto de la interacción entre la vida y la superficie del planeta.

La vida se organiza en entidades individuales limitadas por membranas y paredes, incluyendo las uniones simbióticas de dichas entidades. Plantas y animales se originaron gracias a treguas entre los ancestros bacterianos depredadores y sus presas, ya que como hemos visto, algunos orgánulos celulares son reliquias de alimento no digerido. Fundamentalmente, la vida en la Tierra debe su larga y continuada existencia a esas interacciones metabólicas, fisiológicas, y de comportamiento y evolución. La Tierra y el conjunto de la vida que soporta-Gaia-, es decir, 30 millones de especies diferentes de organismos y las consecuencias de su presencia en la superficie del planeta, son los autores de la selección natural.

Los neodarwinistas, algunos de los cuales se dedican a catalogar a duras penas la evolución de las formas animales y vegetales de los últimos 540 millones de años, permanecen ajenos a la evolución de los sistemas genéticos y metabólicos de las bacterias que se llevó a cabo en los primeros 3000 millones de años de la historia de la vida en la Tierra. Tampoco tienen en cuenta la ecopoyesis en sus cálculos.

Al considerar los organismos como entidades independientes que han evolucionado por acumulación de mutaciones adquiridas al azar, estos científicos tienen que ser reacios por fuerza a la autopoyesis y a la visión gaiana del mundo. El dilema actual que surge de los mitos y estilos de pensamiento en conflicto en el mundo de la biología no es fácil que halle pronto una solución. Pero el diálogo y la discusión razonada pueden ser armas poderosas que alerten a las jóvenes generaciones que se preparan para avanzar en el mundo de la biología, del hecho que, entre los biólogos, los mismos fenómenos pueden verse de manera distinta y que, a pesar del adelanto de la ciencia, siguen existiendo profundos dilemas.