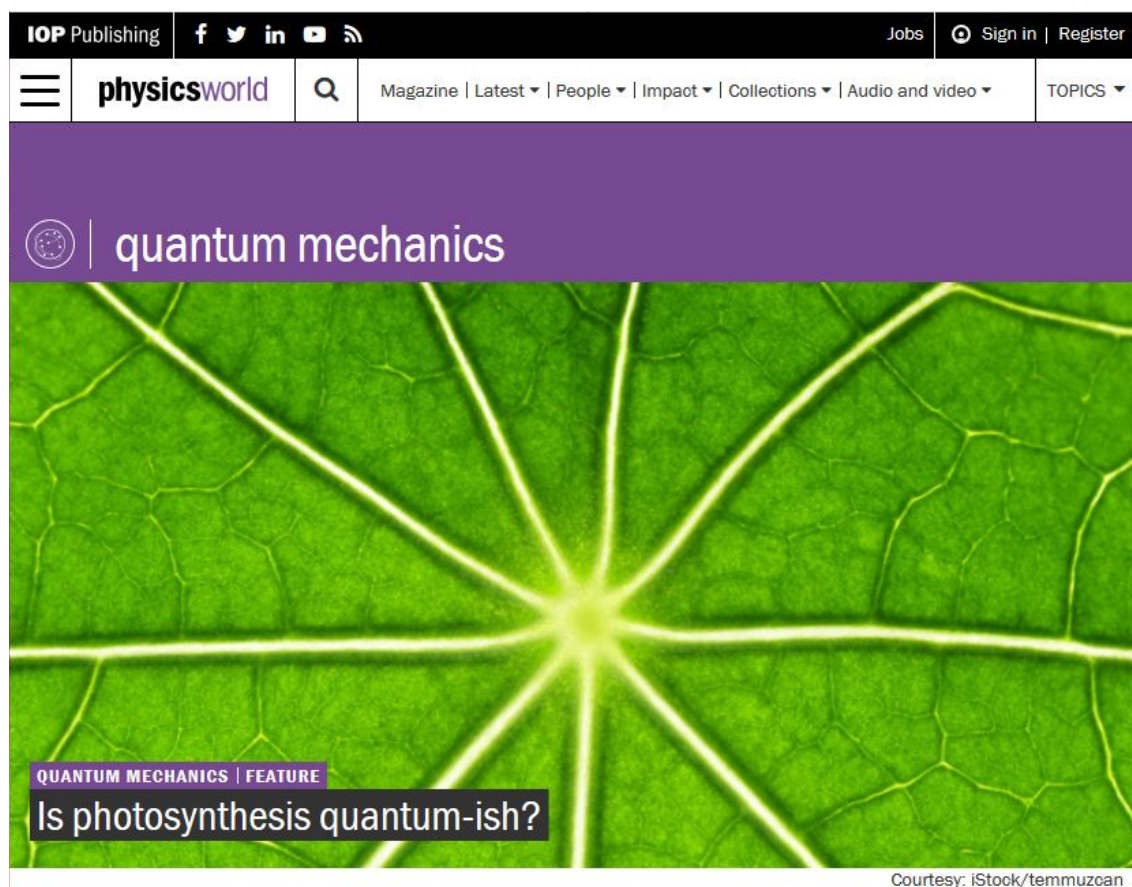


Traducción de un artículo científico publicado en la excelente WEB Physicsworld.com:



¿La fotosíntesis es cuántica?

10 abr 2018

Enhorabuena a Philip Ball, cuyo artículo "Is photosynthesis quantum-ish?" ha sido elegido como uno de los cinco artículos favoritos de Physics World de 2018. Este artículo apareció por primera vez en el número de abril de 2018 de Physics World.

Hay algo inherentemente cuántico en el proceso natural altamente eficiente que es la fotosíntesis, ¿o los investigadores están ladrando al árbol equivocado? Philip Ball investiga el debate.

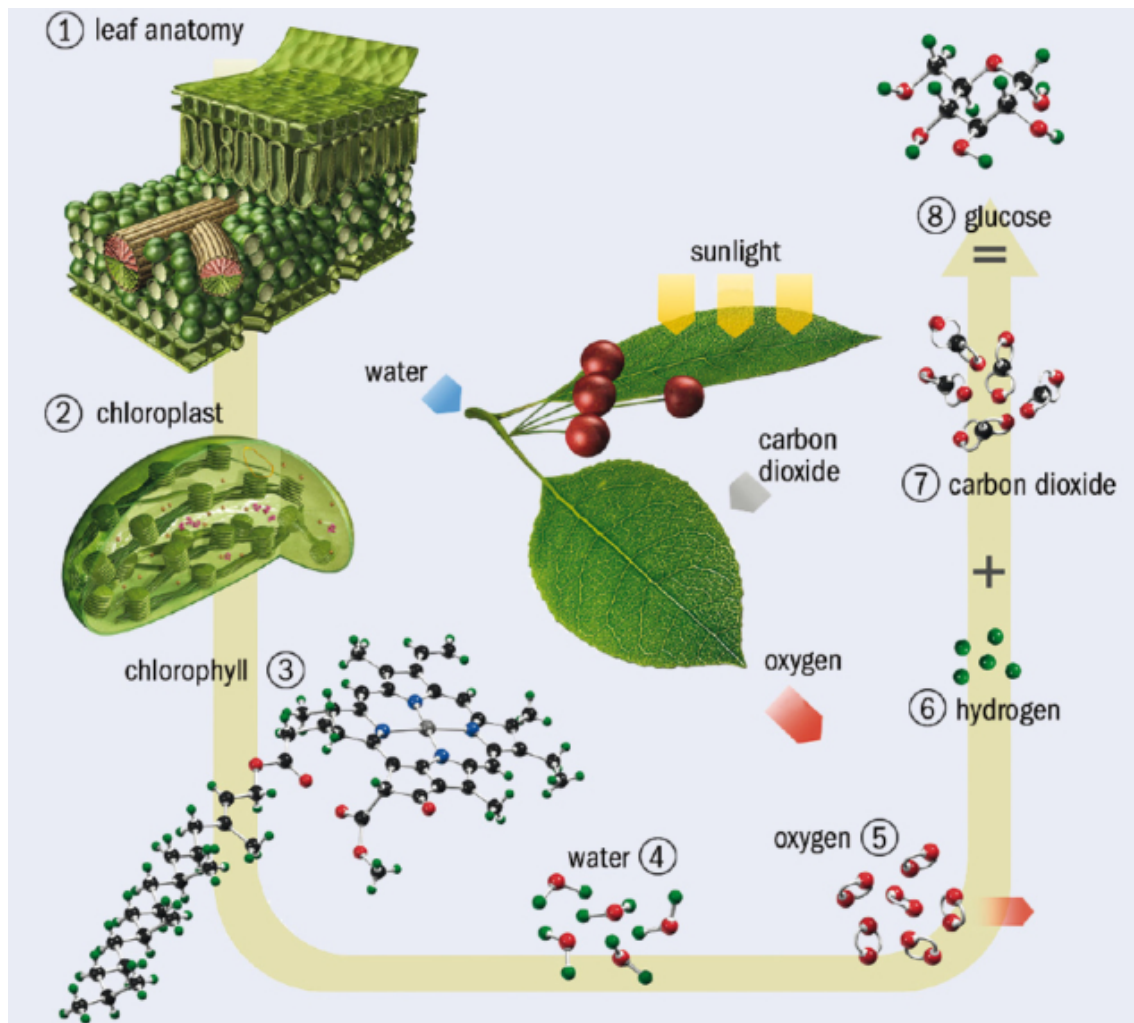
Las peculiaridades de la física cuántica son algo que se puede esperar encontrar en condiciones exóticas en un laboratorio, pero no en un prado. Sin embargo, en los últimos años, una idea en auge llamada biología cuántica propone que los mecanismos moleculares de la vida despliegan algunos de esos comportamientos notoriamente contra intuitivos. Hace diez años, los investigadores demostraron que la fotosíntesis -el proceso por el que las plantas verdes y algunas bacterias transforman la luz solar en energía química- es más eficaz para captar la luz gracias al fenómeno de la "coherencia cuántica". Se trata de las superposiciones de estados cuánticos electrónicos, que parecen capaces de explorar muchas vías de transmisión de energía a la vez. Si es así, la mecánica cuántica está ayudando al proceso energético fundamental que impulsa toda la vida en la superficie de la Tierra.

Era una afirmación notable. ¿Pero era cierta? La cuestión ha sido objeto de un acalorado debate durante la última década. Los primeros rumores de que la "coherencia cuántica"

de la fotosíntesis es similar a la de los ordenadores cuánticos, donde se basa el cálculo más rápido y eficiente que consiguen esos dispositivos, se han evaporado en favor de una imagen más matizada. Y algunos investigadores insisten en que dicha coherencia no desempeña ningún papel útil en la fotosíntesis.

Por un lado, Greg Engel, de la Universidad de Chicago, que participó en el trabajo inicial que sugería la coherencia cuántica como un nuevo principio de diseño de la naturaleza, dice que "la noción general de que el lenguaje y las matemáticas de la información cuántica, incluida la coherencia, pueden utilizarse para entender la dinámica fotosintética en experimentos de espectroscopia ultrarrápida parece estar creciendo en aceptación". Pero el químico biofísico Sebastian Westenhoff, de la Universidad de Gotemburgo (Suecia), afirma que cada vez más científicos del sector consideran que el trabajo anterior es un error de interpretación y que "no existe la coherencia cuántica en la fotosíntesis [natural]". Entonces, ¿a qué se debe la discusión?

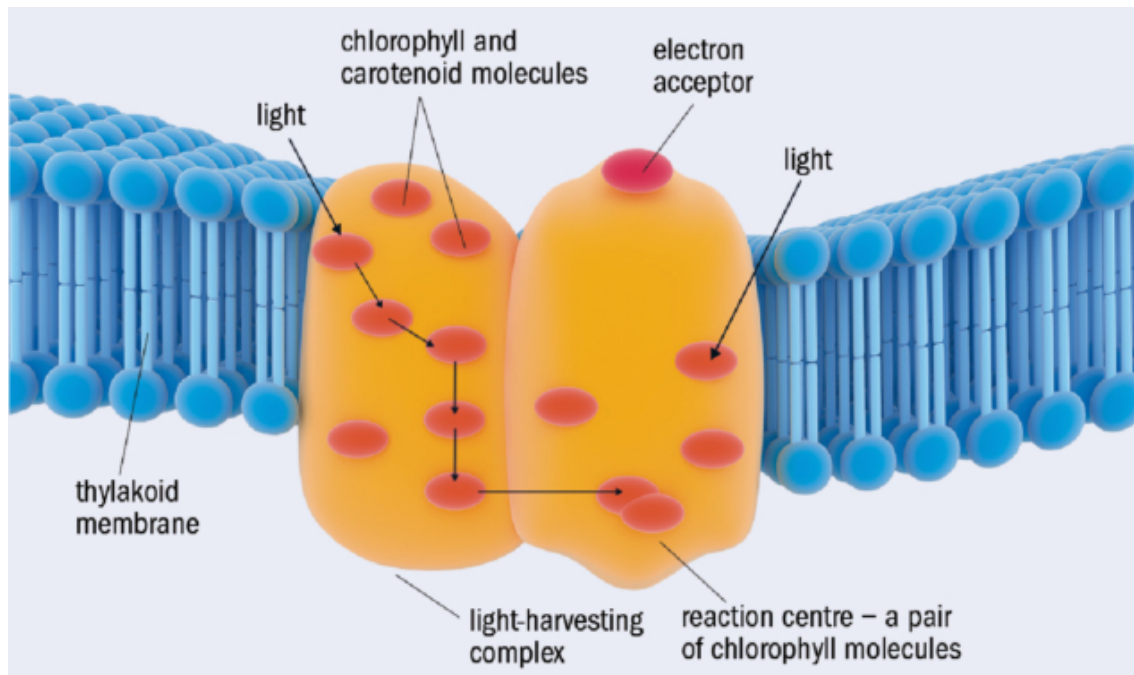
Obtener la luz verde



[Que se haga la luz: En la fotosíntesis, la luz solar se convierte en energía química en forma de azúcares \(glucosa\). En las plantas, la fotosíntesis se produce en los cloroplastos de las células vegetales. La clorofila dentro de los cloroplastos se utiliza para sintetizar la glucosa a partir del agua \(\$H_2O\$ \) y el dióxido de carbono \(\$CO_2\$ \) utilizando la energía de la luz solar, con la liberación de oxígeno \(\$O_2\$ \) como subproducto. \(Cortesía: Carlos Clarivan/Science Photo Library\)](#)

Tanto las plantas como las bacterias fotosintéticas captan la energía solar de forma muy parecida (figura 1). Los fotones de la luz solar son absorbidos por la molécula de clorofila y otros "cromóforos" que absorben la luz en un gran conjunto de proteínas y otras estructuras moleculares, que en conjunto forman un "fotosistema" incrustado en la llamada membrana celular tilacoide. Esta energía crea un estado de excitación electrónica de los cromóforos, y la energía debe ser canalizada hacia otras moléculas en el "centro de reacción fotosintética", una enzima que es el lugar de las reacciones lumínicas de la fotosíntesis. Contiene los pigmentos, como la clorofila, y está rodeado de complejos captadores de luz que potencian la absorción de los fotones. Allí, la energía separa los iones positivos y negativos a una distancia considerable, lo que hace que no puedan neutralizarse mutuamente por recombinación de cargas. Esta separación de cargas crea un potencial electroquímico que, en última instancia, se aprovecha para impulsar las reacciones asistidas por enzimas para fabricar la molécula de almacenamiento

de energía adenosina trifosfato (ATP), la principal reserva de energía química para impulsar las reacciones metabólicas bioquímicas en las células (figura 2).



[Cosecha brillante: El complejo captador de luz \(naranja\) que se encuentra en la membrana del tilacoide \(azul\) en los cloroplastos de las plantas. Aquí se encuentran las moléculas de clorofila y de pigmentos carotenoides \(naranja\) que participan en la fotosíntesis. Absorben los fotones entrantes y la energía de excitación se transfiere al "centro de reacción", que en este caso está formado por un par de moléculas de clorofila. La energía se transfiere al exterior a través de un aceptor de electrones \(rojo, en la parte superior del centro\) y se utiliza en otras reacciones en otras partes de la membrana. \(Cortesía: Science Photo Library\)](#)

Pero esta transferencia de energía solar al centro de reacción es extremadamente eficiente: casi cada fotón de la energía solar captada es utilizado por la célula. El misterio es cómo los organismos fotosintéticos logran tal eficiencia en un entorno cálido, húmedo y desordenado.

¿Saltos al azar o paseos en línea recta?

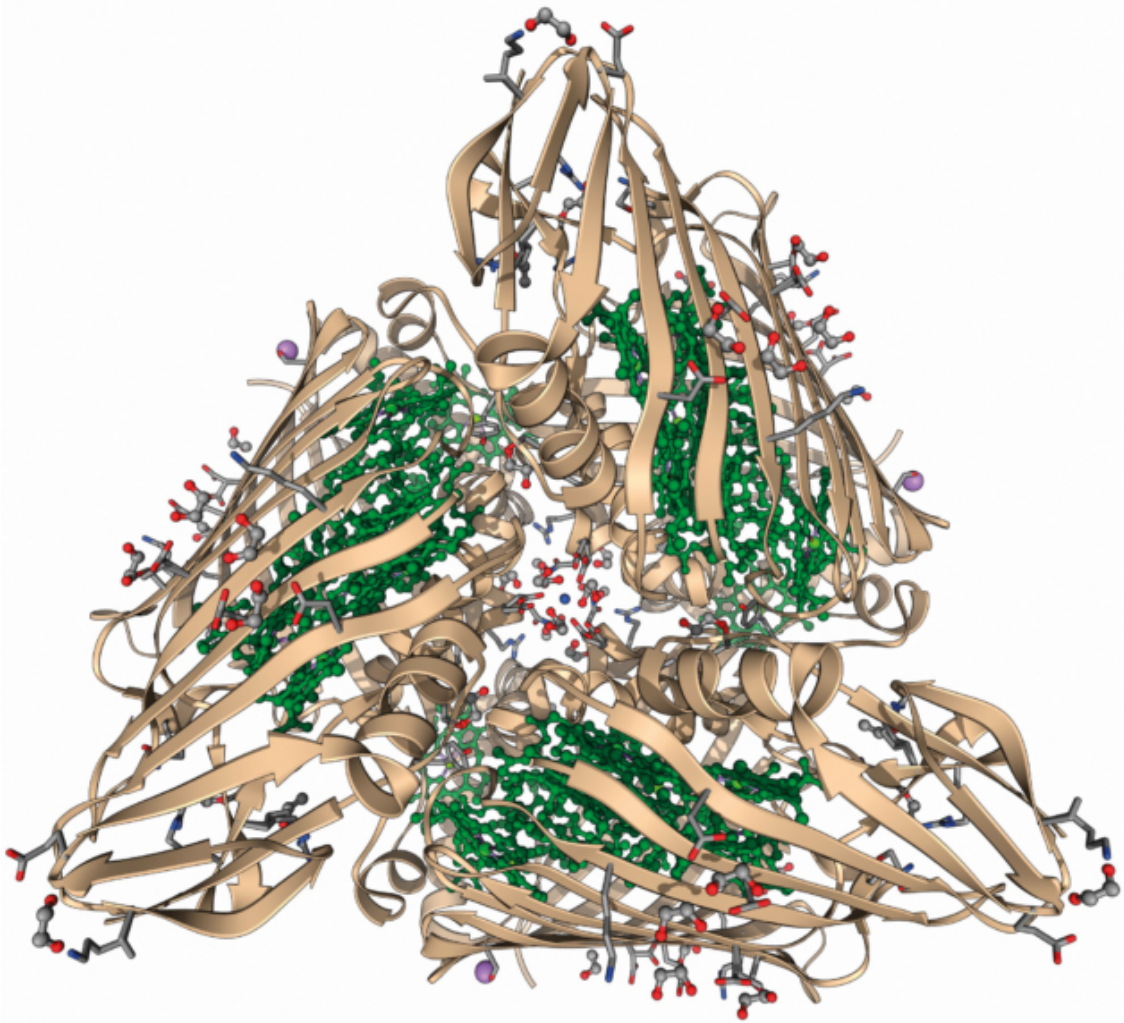
Hasta que la coherencia cuántica -la relación de fase sincrónica entre diferentes estados de un sistema cuántico- entró en escena, se pensaba que el transporte de energía en la fotosíntesis implicaba interacciones entre los estados electrónicos de los cromóforos. La idea era que la energía se transmitía a un cromóforo vecino con un nivel de energía ligeramente inferior. Sin embargo, se pensaba que no había coherencia, ni resonancia en fase, en este acoplamiento. En su lugar, el transporte de energía se imaginaba como un proceso de salto aleatorio (incoherente) entre cromóforos, guiado por un gradiente energético global, como un marinero borracho que se tambalea cuesta abajo.

Pero ya en la década de 1930 se sugirió que la eficiencia de la transferencia de energía fotosintética podría provenir de algún tipo de sincronización de las excitaciones electrónicas onduladas -conocidas como excitones- entre los cromóforos. En 2007, el físico-químico [Graham Fleming](#) de la Universidad de California en Berkeley y sus

colaboradores afirmaron haber encontrado pruebas de que esto es lo que realmente ocurre. Si realmente existiera coherencia entre los excitones, razonaron, debería ser posible ver interferencias entre las distintas vías: los llamados latidos cuánticos, como los latidos acústicos que se escuchan cuando interfieren ondas sonoras de frecuencia similar. Esta coherencia permitiría a la excitación encontrar la ruta óptima hacia el centro de reacción, sin desperdiciar energía en saltos aleatorios.

Fleming, con el postdoctorado de Engel y otros, utilizó una técnica llamada espectroscopia de eco-fotón para estudiar el proceso de transferencia de energía en el llamado complejo pigmento-proteína Fenna-Matthews-Olson (FMO), la parte del aparato fotosintético que media la transferencia de energía en la bacteria termófila *Chlorobium tepidum*. Este método consistía en excitar excitones coherentes mediante un pulso de "bombeo" ultracorto de un láser y, a continuación, sondear la evolución de la excitación a lo largo del tiempo mediante pulsos de láser ultracortos posteriores para buscar signos de batido.

Al mismo tiempo, Fleming y sus colaboradores [Hohjai Lee](#) y [Yuan-Chung Cheng](#), también en Berkeley, estudiaron la transferencia de energía entre dos tipos de pigmentos en el centro de reacción fotosintética de un tipo diferente de bacteria foto sintetizadora. Aunque los investigadores observaron los latidos que habían previsto en ambos casos (lo que sugiere que la coherencia estaba implicada), los estudios se realizaron a temperaturas mucho más frías que las condiciones fisiológicas en las que operan estos organismos en



[Centro de reacción: Un modelo molecular del complejo pigmento-proteína Fenna-Matthews-Olson, tal como se encuentra en la bacteria verde del azufre *Prosthecochloris aestuarii*. En el centro de cada una de las tres proteínas hay una molécula de bacterioclorofila. \(Cortesía: Laguna Design/Science Photo Library\).](#)

Pero en 2010 Engel, ahora en Chicago, informó de que la coherencia cuántica en el complejo FMO de *C. tepidum* sobrevivía incluso a temperatura ambiente. Mientras tanto, otro antiguo postdoctorado de Fleming, el fotoquímico [Gregory Scholes](#) en la Universidad de Toronto (Canadá), colaboró con el químico [Elisabetta Collini](#) y sus colaboradores buscaron estos efectos en condiciones ambientales en otro tipo de organismo: las algas criptófitas fotosintéticas, que pueden recoger la luz con la suficiente eficacia como para realizar la fotosíntesis incluso en condiciones de poca luz. También vieron latidos que duraban más de una décima de picosegundo a temperatura ambiente. Esta supuesta coherencia electrónica, dijeron, era un orden de magnitud más duradera de lo que se pensaba, y lo suficientemente larga como para que la energía se transfiriera de los cromóforos al centro de reacción fotosintético.

¿Computación natural?

Esto parece extraordinario. La coherencia cuántica entre bits cuánticos (qubits) colocados en estados entrelazados es lo que los físicos tratan de explotar en los ordenadores cuánticos. Pero los qubits suelen enfriarse a una fracción de grado del cero absoluto y, aun así, la coherencia sólo sobrevive durante breves instantes, entre sólo un puñado de bits, antes de que se produzca la decoherencia debido a las perturbaciones del entorno. Así que la intuición parecía insistir en que un efecto cuántico como éste nunca sobreviviría a las condiciones cálidas y húmedas de las células vivas. ¿Cómo podrían mantenerlo los organismos fotosintéticos?

Pero cuanto más se han acercado los investigadores, más complicaciones y matices han surgido. ¿Los primeros trabajos detectaron realmente el latido cuántico electrónico? Lo que se midió en realidad fue una señal espectroscópica oscilante; la cuestión es cómo interpretarla. En 2013 [David Jonas](#) de la Universidad de Colorado en Boulder y sus colaboradores argumentaron que los "latidos" eran en realidad causados puramente por vibraciones moleculares -el proceso de dispersión Raman- y no por la coherencia cuántica entre estados electrónicos excitados ([PNAS 110 1203](#)).



Engel reconoce que en los experimentos originales era imposible distinguir definitivamente entre las dos posibilidades. Una forma de distinguirlas es fabricar sistemas químicos sintéticos que absorban la luz y que estén ajustados para evitar cualquier coincidencia en las energías de los estados energéticos excitónicos y moleculares, ya que así esos dos tipos de estados son menos propensos a acoplarse. Engel y sus colaboradores hicieron precisamente eso, fabricando dímeros de dos moléculas diferentes que imitaban los grupos absorbentes de luz de los fotosistemas rígidamente unidos entre sí ([Science 340 1431](#)). En 2013 informaron de que este sistema también muestra latidos cuánticos que no aparecían en las señales Raman vibracionales.

Pero cuando la misma idea fue probada por [Dwayne Miller](#) del Instituto Max Planck para la Estructura y la Dinámica de la Materia en Hamburgo, Alemania, y su equipo, utilizando moléculas de colorante unidas en pares por un enlazador más flexible, llegaron a una conclusión diferente ([Nature Chem. 6 196](#)). Argumentaron que la coherencia observada anteriormente era demasiado pequeña en amplitud para originarse en los excitones, y que en realidad era un tipo de efecto de resonancia clásico que implicaba vibraciones moleculares. Además, decían, cualquier coherencia electrónica decae demasiado rápido como para tener consecuencias biológicas significativas.

Miller también ha reexaminado ahora el comportamiento del propio complejo FMO ([PNAS 114 8493](#)). "Volvíamos a realizar el trabajo original a temperatura ambiente y en condiciones fisiológicas reales, y es absolutamente seguro que no hay coherencias electrónicas de larga duración que dirijan la transferencia de energía", afirma. "Los latidos son comparables en amplitud, frecuencia y tasa de decaimiento a las triviales vibraciones Raman del estado electrónico básico excitado en el proceso. Es el Raman lo que vieron, no la coherencia electrónica de larga duración".

Vibraciones mixtas

Un teórico cuántico [Michael Thorwart](#) de la Universidad de Hamburgo está de acuerdo. En 2011 presentó cálculos de los estados electrónicos y vibracionales de la proteína FMO que, según él, implicaban que la coherencia de larga duración no era factible ([Phys. Rev. E 84 041926](#)). "En aquel momento, estos cálculos teóricos eran los mejores disponibles", dice Thorwart. Ha colaborado con Miller en la interpretación de las recientes mediciones experimentales de las excitaciones de la FMO, y afirma que los resultados coinciden con aquellas predicciones anteriores. Cualquier coherencia es minúscula y proviene del acoplamiento vibracional de los estados electrónicos, algo parecido a la famosa sincronización de los relojes de pared observada por Christiaan Huygens en el siglo XVII debido al acoplamiento vibracional a través de la tabla de madera en la que estaban montados.



[Amante de la luz: Micrografía electrónica de barrido coloreada de Rhodomonas salina, un alga criptófita marina. La mayoría de estos organismos unicelulares contienen cloroplastos, por lo que pueden realizar la fotosíntesis en entornos poco iluminados. \(Cortesía: Dennis Kunkel Microscopy/Science Photo Library\)](#)

Cada vez más, el consenso parece ser que las vibraciones moleculares están en el centro de las observaciones controvertidas. Y sin embargo [Elisabet Romero](#) de la Universidad

Libre de Ámsterdam y sus colaboradores han llevado a cabo experimentos espectroscópicos que interpretan como una prueba de que las vibraciones en el centro de reacción del fotosistema de las espinacas favorecen la coherencia cuántica entre los estados excitónicos, reforzando las interacciones entre ellos y promoviendo la transferencia coherente de energía ([Nature Phys. 10 676](#)).

Muy recientemente, Scholes (ahora en la Universidad de Princeton) y sus colaboradores, entre ellos el veterano experto en fotosíntesis [Robert Blankenship](#) de la Universidad de Washington en San Luis, Missouri, han contado una historia ligeramente diferente. Realizaron espectroscopia de sonda de bombeo en versiones mutantes a medida del complejo proteico FMO ([Nature Chem. 10.1038/nchem.2910](#)). Estas variantes tienen estados electrónicos diferentes a los de la forma nativa, por lo que si los excitones están implicados en los latidos observados espectroscópicamente -el signo característico de la coherencia-, estos latidos deberían tener una frecuencia desplazada. Pero no es así: la señal sigue siendo la misma. Scholes dice que esto indica que las oscilaciones provienen puramente de las vibraciones del estado electrónico básico (el estado de menor energía). Miller dice que esto coincide con trabajos anteriores de otros grupos, y que "ahora parece haber consenso en que los latidos originales eran vibraciones, no excitones".

Así que, aunque los hallazgos de Romero y sus colaboradores son similares a los que Engel afirmó originalmente, los equipos de Miller y Scholes están seguros de que es el acoplamiento vibrónico el que está en juego. Aunque los latidos son bastante reales, el problema es cómo interpretarlos.

Quantum(ish)

Sin embargo, Scholes admite que sus nuevos resultados apoyan la afirmación original de que "las moléculas de la proteína FMO están acopladas de una manera especial y esto puede ayudar al transporte de energía dirigiéndolo o haciéndolo más rápido". Según Romero, este ajuste de las vibraciones moleculares a las frecuencias adecuadas para la transferencia de energía convierte al fotosistema en lo que ella llama una "trampa de luz de diseño cuántico". Cuando se observan los centros de reacción fotosintéticos de una serie de organismos, dice, "sólo hay un diseño que se conserva, lo que sugiere que la naturaleza ha encontrado un diseño capaz de realizar una separación de cargas eficiente y lo ha mantenido". En otras palabras, dice, la selección natural parece haber favorecido este proceso cuántico optimizado.

“Hasta antes que coherencia cuántica entre en escena, el transporte de energía en la fotosíntesis se imaginaba como un proceso de salto aleatorio, guiado por un gradiente de energía global, como un marinero borracho que se tambalea cuesta abajo”

Pero Miller sostiene que la fuerza del acoplamiento vibracional es demasiado baja para mejorar el transporte de energía. Ve una huella de optimismo evolucionado en la propia ausencia de coherencia cuántica, en el hecho de que se pierde muy rápidamente tras la foto absorción por decoherencia. "Resulta que la naturaleza ha evolucionado no para vencer la decoherencia, sino para explotarla", afirma. Precisamente porque la decoherencia provoca la disipación de energía, la transferencia de energía puede encontrar su camino gradualmente por la vía más eficiente desde el punto de vista energético, guiada por la forma en que las propiedades electrónicas varían de un lugar a

otro en el entorno molecular. "Es un poco como poner adoquines en una ladera para que los excursionistas se queden en el camino y no exploren todo el paisaje", dice.

Círculo completo

Entonces, ¿la fotosíntesis es "cuántica" o no? "Las observaciones muestran que hay correlación entre las funciones de onda de los estados implicados en la transferencia de energía o de electrones", dice Romero. "Pero estos efectos no son considerados por algunos científicos como una verdadera coherencia cuántica en el sentido en que se entienden los estados enredados de la computación cuántica". Y Engel está de acuerdo en que comparar los dos es invocar "un lenguaje equivocado".

Tal vez sea así, o tal vez estas correlaciones y coherencias, mediadas por las vibraciones, sean en cualquier caso demasiado débiles para tener alguna relevancia biológica, y tengamos que seguir pensando que los estados de excitones en el fotosistema están más o menos localizados en grupos moleculares concretos, con una transferencia incoherente de energía entre ellos. Eso es lo que piensan Miller y Thorwart. "Hemos cerrado el círculo", dice Miller, "y parece que la primera imagen del transporte de energía como un proceso en gran medida incoherente ha resistido el desafío".

Romero dice que discutir si el transporte de energía es un verdadero efecto cuántico o no; no es terriblemente productivo de todos modos. "En mi opinión, la cuestión relevante es entender cómo las plantas u otros organismos fotosintéticos son capaces de transferir energía y electrones en una escala de tiempo ultrarrápida en la dirección correcta con una alta eficiencia cuántica", dice. Si lo entendiéramos, podríamos hacer algo útil con ello". "Este conocimiento encierra lecciones cruciales sobre cómo diseñar sistemas fabricados por el ser humano con la capacidad de convertir la energía de la luz solar en energía electroquímica para producir electricidad o, mejor aún, para producir combustibles solares de forma catalítica", asegura Romero. Es una idea que todos podemos apoyar, pero primero tenemos que saber cómo lo hace la naturaleza".

%%%%%%%%%

Traducción libre de Physicsworld:

<https://physicsworld.com/a/is-photosynthesis-quantum-ish/>

Traducido por Jorge Spicel solo para efectos de divulgación.

Se respetó toda referencia a derechos editoriales, intelectuales y autorales a cuyas páginas fueron ligados como si de la página WEB de Physicsworld se tratase.