

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

La supervivencia de las bacterias del azufre en ambientes críticos y los albores de la biología cuántica

Karina Galache · Monday, April 18th, 2022

Categorías: [Ciencias Exactas](#), [Ciencias Naturales y de la Salud](#), [Zona Abierta](#)

El cielo es increíblemente azul en el año 2098. El aire, libre de contaminantes, recuerda a una campiña francesa del siglo XVIII. La ciudad y sus edificios están recubiertos de reflejos tornasol de sus cristales que contrastan con los muros de color verde turquesa. En ellos, millones de organismos forman un ecosistema que se encarga de captar la luz solar, limpiar el aire aledaño e incluso recabar información ambiental para transmitirla a un lugar distante que la procesa para controlar el microclima. En esta época, el desarrollo y control de los sistemas biológicos ha sido posible, modificando inteligentemente al planeta en una forma armónica con la propia vida y explotando el comportamiento oculto que le brindan su persistencia y adaptabilidad.

La vida ha evolucionado en el planeta por más de 3,500 millones de años. Cada paso dado, cada generación y especie establecen la posibilidad de replicarse y sobrevivir. Detrás de esa tendencia, ¿qué es lo que hay? El físico Niels Bohr especuló en 1933 en su artículo “Luz y Vida”, sobre las implicaciones que pudiera tener la mecánica cuántica sobre la conformación de la vida, dado que ésta estaba basada primordialmente en la interacción entre luz y materia, un fenómeno fundamentalmente explicado mediante esta disciplina. Años después, en 1935, el físico cuántico Max Delbrück, publicaría el artículo “Sobre la naturaleza de la mutación y estructura de los genes”, en donde se establecen las bases de la biología molecular y la comprensión a pequeña escala de la vida. Finalmente, en 1944 el físico Erwin Schrödinger en su libro “¿Qué es la vida?”, expresaba la incapacidad de la física (clásica) y la química para explicar la vida. Plateaba la idea provocadora de que la naturaleza de la vida podía ligarse a los fenómenos cuánticos.

La mecánica cuántica rige el comportamiento de la materia, la vida incluida. También, los comportamientos más sorprendentes del mundo cuántico difieren de la experiencia clásica diaria, pues se mimetizan y parecen desdibujarse sobre el mundo macroscópico. Eso se creía hasta hace unos años. La comprensión de los efectos cuánticos sobre algunos aspectos de los organismos vivos, como la migración de aves y el olfato, apenas comienza en la era que corre. Aún no sabemos si bastan las reglas heredadas de la física clásica sobre las macromoléculas dentro de la química, para explicar la responsabilidad de tal variabilidad, adaptación y replicación que las mantienen.

A pesar de su complejidad, se ha comenzado a explorar con más detalle cómo la mecánica cuántica se filtra sutilmente en el comportamiento de los organismos vivos y, a entender, si los aspectos

notables de la vida son en menor o mayor grado el resultado de las reglas básicas de la naturaleza. Es probable que la persistencia de la vida tenga mucho que ver con las reglas cuánticas que subyacen en la física clásica que en apariencia la rigen. Así, a través de algunos efectos en los seres vivos, no explicados por las leyes clásicas, se comienza a analizar si son las propiedades cuánticas de la materia las que los permiten. Si bien la física clásica es una síntesis macroscópica de la mecánica cuántica, se podría arribar a ella a partir de leyes diferentes. Algunos fenómenos biológicos parecen poner al descubierto el carácter fundamental de las leyes cuánticas. Así, experimentos y estudios sobre seres vivos en el régimen cuántico han comenzado: la inducción de entrelazamiento cuántico entre luz y bacterias, la transmisión eficiente de energía en bacterias autótrofas, la navegación geográfica de las aves o el mismo sentido del olfato en los seres vivos.

Uno de los fenómenos biológicos fundamentales para la supervivencia de las especies en la Tierra es la fotosíntesis. La conversión especializada de energía proveniente de la luz del Sol en energía química explota su espectro característico en forma eficiente y se vuelve vital para las especies vivas superiores que no producen sus propios alimentos, tomándolos de las plantas y sosteniendo con ello la mayoría de las formas de vida del planeta.



Figura 1: (A) Síntesis del proceso fotosintético en una planta. (B) Síntesis del proceso fotosintético en una bacteria.

Durante la fotosíntesis (Figura 1A), agua y carbono se combinan para formar carbohidratos (azúcares) como parte final del proceso como recipiente de energía química, liberando oxígeno. Sin embargo, para que esto ocurra, y se obtenga finalmente una molécula denominada trifosfato de adenosina (ATP), capaz de almacenar dicha energía, la luz debe ser absorbida y preparada para dichas reacciones químicas en un proceso químico denominado ciclo de Calvin. El mesófilo es un tejido en las hojas que recibe el dióxido de carbono del exterior y realiza las primeras reacciones químicas en los cloroplastos, las cuales requieren un flujo constante de energía luminosa. Este proceso de captación de luz es hecho previamente transformando las excitaciones luminosas en vibraciones que ceden su energía a estas primeras reacciones químicas.

Las plantas no son los únicos seres vivos que realizan fotosíntesis. De hecho, las bacterias primigenias fueron las primeras en realizarla y con ello hace unos 3 mil millones de años transformaron la atmósfera con la liberación de oxígeno a partir del bióxido de carbono atmosférico. Sin estos primigenios fotosintetizadores, la vida en la Tierra jamás hubiera evolucionado. Dentro de estas bacterias, hoy sobreviven las bacterias verdes y moradas del azufre. Éstas son microorganismos fotoautótrofos (generan su alimento convirtiendo la energía luminosa en energía química que queda almacenada en la conformación de ciertas configuraciones de carbohidratos) que utilizan el sulfuro de hidrógeno (H_2S) o el azufre (S) como donantes de electrones para realizar fotosíntesis anoxigénica (sin liberar oxígeno, mientras que las plantas usan agua y realizan fotosíntesis aerobia al liberarlo).

En este artículo se explora al primer ser vivo analizado mediante la mecánica cuántica en algunas características de su prevalencia en el planeta. Estas bacterias viven principalmente en lagos, pero pueden hacerlo en condiciones extremas en diferentes ecosistemas. Algunas bacterias verdes se encontraron en ecosistemas árticos a temperaturas tan bajas como $-100^{\circ}C$ y también en el Golfo de México alrededor de fumarolas volcánicas marinas viviendo del tenue resplandor del respiradero termal a $70^{\circ}C$ aproximadamente. Al vivir en ambientes árticos donde no hay luz solar por periodos extendidos o a más de dos kilómetros de profundidad en el mar donde la luz del sol no puede

penetrar, ¿cómo es posible su existencia dependiente de la fotosíntesis en tales condiciones? La respuesta está en la eficiencia de absorción y conversión de energía que se ha estimado en 98%. Aún se desconoce con precisión el mecanismo real de tan alta eficiencia.

Aunque no existe consenso, una de las explicaciones de la eficiencia de absorción de energía para ser transferida al proceso químico, pudiera entenderse gracias a la transmisión de excitaciones cuánticas dentro del complejo de Fenna-Mathews-Olson (FMO). Este complejo químico y soluble en agua es un fotopigmento proteico que media la excitación energética entre la membrana y el centro de reacción (RC) como muestra la Figura 1B. El FMO es una estructura trimérica y cada monómero tiene ocho moléculas llamadas bacterioclorófilos (BChl) sostenidas por una configuración proteica que en gran medida es su medio ambiente directo (Figura 2). Fue la primera estructura analizada por rayos X y mediante espectroscopía para entender dichas excitaciones de carácter cuántico.



Figura 2: (A) Complejo de Fenna-Mathew-Olson y su estructura trimérica. (B) Uno de los monómeros con su estructura proteica rodeando la estructura de BChl's. (C) BChl's con sus momentos dipolares representados. (D) Estructura molecular de un BChl.

La fotosíntesis en estas bacterias se realiza captando la luz del espectro solar, la cuál debe ser transferida eficientemente hasta el centro de reacción (aspecto trascendente en la captación de energía luminosa en este proceso). Esa energía es transformada en un proceso denominado ciclo TCA para obtener carbono como parte final del almacenamiento de energía. La absorción de luz en interacción con la materia produce vibraciones en la estructura molecular del FMO en forma de una vibración elástica al interior y siguiendo el camino óptimo hasta llegar a otra estructura denominada centro de reacción, un complejo proteico con pigmentos que como resultado del proceso libera electrones y permite reacciones de oxido-reducción para el empaquetamiento de energía en ciertas configuraciones de carbohidratos. Es la optimización en la conducción de las excitaciones lo que brinda la eficiencia de captación de energía luminosa y parece ser un fenómeno completamente cuántico.

La mecánica cuántica en sus aspectos fundamentales permite la superposición (ocurrencia simultánea) de estados en los sistemas que rige. La permanencia duradera de coherencia cuántica en el FMO es el periodo en el que las excitaciones mantienen su fase y son capaces de sufrir fenómenos de superposición cuántica, antes de convertirse en una simple mezcla estadística de estados. En este periodo, las características cuánticas emergen del mundo atómico al nivel mesoscópico (dimensión intermedia) al menos, y la observación de la transmisión de excitación energética entre los ocho BChl's conectando la membrana y el centro de reacción, ponen evidencia de que la mecánica cuántica está presente en la eficiencia del proceso. De ello surge la estabilidad de la especie en ambientes críticos. Según la evidencia espectroscópica, el secreto de la efectividad de absorción de estas bacterias se halla en que la mecánica cuántica permite a la energía proveniente de la luz viajar no transmitiéndose de uno a otro BChl en forma lineal o definida siguiendo un único camino, sino varias rutas a la vez para determinar la manera más rápida de hacerlo. Un fenómeno cercano al conocido efecto túnel en los semiconductores y a los caminantes cuánticos conocidos en el procesamiento cuántico.

Hoy en día, el consenso alrededor del FMO está en favor de que tanto la transferencia coherente (cuántica) como incoherente (clásica) juegan un papel compartido en ello, es decir, aquellas permitidas por la mecánica cuántica y las dictadas por el comportamiento clásico estructural de las

moléculas. Estos organismos son, por mucho, los primeros que por su sencillez se han estudiado en el marco cuántico, combinando una gran cantidad de disciplinas, como la preparación biológica de muestras, la espectroscopía molecular y la simulación computacional, la cual ha jugado un importante papel en el estudio del FMO al resolver las complicadas ecuaciones del FMO como un sistema cuántico abierto (interactuante con el exterior).

Los sistemas cuánticos abiertos están inmersos en un medio semiclásico con el que interactúan. Su estudio se ha modelado con ecuaciones que preservan el comportamiento cuántico del sistema en interacción con un ambiente clásico regido por la termodinámica como lo es el FMO. En este caso, debe notarse la complejidad del problema, pues las macromoléculas exceden por mucho el nivel atómico en el que el comportamiento cuántico se sitúa. Las ecuaciones que rigen a los sistemas cuánticos abiertos, como las de Redfield, Lindblad o las ecuaciones jerárquicas de movimiento (HEOM), son derivadas a partir de la ecuación de Schrödinger de la mecánica cuántica. Estas expresiones, a partir de una aproximación experimental espectroscópica del Hamiltoniano, permiten describir al sistema de ocho BChl's en cada monómero como un sistema cuántico con niveles de energía. En este caso, los Hamiltonianos para especies como *Chlorobaculum tepidum* y *Prosthecochloris aestuarii* entre otras, han obtenido experimentalmente y pueden introducirse en los modelos anteriores que sólo se resuelven mediante técnicas computacionales. Las computadoras tradicionales de alto desempeño quizá tarden días enteros para determinar el flujo de excitación energética en estos sistemas durante los primeros picosegundos posteriores al inicio de la absorción, lo suficiente como para predecir y verificar los observables que es posible medir en los laboratorios.

La modelación computacional permite corroborar el comportamiento observado, viendo cómo la excitación se transmite en promedio entre BChl's, moviéndose del más próximo a la membrana hacia aquél cercano al centro de reacción, en un camino difuso regido por la mecánica cuántica. La energía clásica no puede viajar en tiempos tan cortos y permitir al sistema físico restituirse para continuar con la absorción. Se observa cierta evidencia de que, aunque pudiera existir variabilidad en la absorción de energía a través de otros BChl's, la eficiencia del proceso se mantiene en un orden invariable.

Adicionalmente, comparando cepas de dichas bacterias, parecen lograr, incluso de manera independiente, eficiencias características que permiten su existencia en ambientes críticos con muy poca luz o radiación, a la vez en un rango de temperaturas en donde el fenómeno parece seguir presente. La simulación computacional de dichos sistemas fotosintéticos en estos organismos, nos permite comprender mejor los efectos diversos y variables que exhiben. Además, su caracterización nos permite vislumbrar la explotación de éstos en aplicaciones más sofisticadas, como su uso en sistemas de procesamiento cuántico. Si se controlara el entrelazamiento presente en sus componentes, se podría emplear a los sistemas biológicos para realizar procesamiento computacional cuántico. Así, la biología cuántica no sólo permitiría comprender mejor la biología de los seres vivos, sino su adaptación, evolución y explotación en la frontera del conocimiento. Como quiera que sea, es trascendente saber que, muy probablemente la vida en la Tierra no hubiera sido posible si en el proceso fotosintético y los fenómenos cuánticos no hubieran emergido de los componentes moleculares de bacterias como las mencionadas, confirmando las primeras opiniones de Bohr sobre la vida y la mecánica cuántica.

Referencias

Bohr, N. Light and Life*. Nature 131, 421–423 (1933).

Schrödinger, E. 1983. ¿Qué es la vida? Tusquets Editores: Madrid, España.

Miret, S. 2019. Biología Cuántica. CSIC: Madrid, España.

Al-Khalili, J. and McFadden, J. 2019. Life on the Edge: The coming of age of quantum biology. Bantam Press: New York, USA.

Gribbin, J. 1984. En busca del gato de Schrödinger. Biblioteca Científica Salvat: México, México.

am Busch, M.S.; Müh, F.; Madjet, M.E.A.; Renger, T. 2011. The Eighth Bacteriochlorophyll Completes the Excitation Energy Funnel in the FMO Protein. J. Phys. Chem. Lett. 2, pp. 93–98.

González-Soria, B., Delgado, B. and Anaya-Morales, A. 2020. Parametric Mapping of Quantum Regime in Fenna–Matthews–Olson Light-Harvesting Complexes: A Synthetic Review of Models, Methods and Approaches. Appl. Sci. 10 (18), pp. 6474.

González-Soria, B., Delgado, B. and Anaya-Morales, A. 2021. Predicting entanglement and coherent times in FMO complex using the HEOM method. Journal of Physics Conference Series 1730, pp. 12033.

Marletto, C., Coles, D., Farrow, T. and Vedral, V. 2018. Entanglement between living bacteria and quantized light witnessed by Rabi splitting. Journal of Physics Communications 2 (10) pp. 101001.

This entry was posted on Monday, April 18th, 2022 at 9:31 am and is filed under [Ciencias Exactas](#), [Ciencias Naturales y de la Salud](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.