
DE LA SINAPSIS A LA COHERENCIA CUÁNTICA: AL ENCUENTRO DE LA NEUROBIOLOGÍA DE LA CONSCIENCIA

Daniel Manrique Castaño

Pontificia Universidad Javeriana Cali / Colombia

Referencia Recomendada: Manrique-Castaño, D. (2012). De la sinapsis a la coherencia cuántica: Al encuentro de la neurobiología de la consciencia. *Revista de Psicología GEPU*, 3 (2), 176 - 205.

Resumen: El presente artículo plantea la relevancia de considerar la teoría cuántica para configurar modelos y abordar estudios sobre la neurobiología de la consciencia. En la actualidad, la mayoría de los estudios sobre la consciencia en la Psicología y la Neurociencia son realizados y descritos desde el ámbito de la Mecánica Clásica. Por su parte, la Mecánica Cuántica ofrece un marco conceptual distinto para abordar cuestiones como ¿qué es la consciencia? y ¿qué permite la experiencia consciente?, preguntas que siguen sin una respuesta satisfactoria en los ámbitos de la Psicobiología teórica y experimental, y que le permitirían a profesionales de la Psicología y la Neurociencia ampliar su modelo teórico sobre la consciencia.

Palabras Clave: Mecánica Cuántica, Consciencia, Cerebro, Coherencia, Neurobiología de la Consciencia, Microtúbulos.

Recibido: 24/08/2011 **Aprobado:** 25/05/2012

Daniel Manrique Castaño. Estudiante de Psicología de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, interesado por el área clínica y de las Neurociencias. Presidente de la Escuela de Astronomía de Cali enfocado en las líneas de Cosmología y Mecánica Cuántica. Correo electrónico: danielmanriquecastano@gmail.com

Introducción

La consciencia y su planteamiento como problema de la ciencia carece de un consenso general (Crick, 1994). A pesar de ello, todo el mundo tiene una idea aproximada del fenómeno mental al que se refiere la palabra consciencia. Por tal motivo, este texto adoptará una posición teórica seguida por académicos como el matemático Roger Penrose, quien afirma que hasta que no sepamos qué es la consciencia propiamente y cuál es su naturaleza, debemos optar por no conceptualizarla; definirla sería equivocado (Penrose, 1996); y Crick (1994) quien refiere que no se ha encontrado la forma correcta de conceptualizar la consciencia y lo único que se puede hacer es abrirse camino hacia ese concepto. De esta manera, es factible eludir una definición de consciencia por los peligros, errores o desajustes que puede generar una definición prematura.

No obstante, estos y otros autores como Searle (2000, 2006) o Damasio (2000, 2010) brindan descripciones de elementos o cualidades implicados en el fenómeno consciente pero aciertan al no brindar una definición estricta de ésta. Se realiza esta aclaración para que el lector no se sorprenda por no encontrar una definición o una operacionalización de consciencia como generalmente se hace en Psicología y entienda el porqué.

Este texto parte de la visión de consciencia como problema científico (Cairns-Smith, 2000; Crick, 1994; Damasio, 2000, 2010; Penrose, 1996). Aunque hay abordajes científicos dualistas de la consciencia como los del conocido neurofisiólogo australiano y premio Nobel John Eccles (Beck & Eccles, 1992), la perspectiva de este texto asume una postura monista, donde la consciencia se puede explicar desde las leyes naturales. Sin embargo, como se hará ver más adelante, para abordar el problema de la consciencia en su totalidad puede que haga falta una nueva Física que provea nuevos elementos teóricos para acercarnos a este problema, y en especial, una Física relevante para entender de forma coherente la actividad cerebral que permitiría la consciencia (Penrose, 1996). Aunque esta nueva ciencia no está configurada aún, la Mecánica Cuántica (MC), plantea conceptos y modelos que delimitan un camino para explicar la consciencia desde las leyes naturales.

Por lo anterior, el objetivo de este texto es exponer de manera introductoria un modelo de la consciencia desde el paradigma de la MC. Para lograrlo, primero se contextualizará al lector en el problema de la consciencia y algunas de sus implicaciones en el marco de la ciencia. Posteriormente se referirán algunas generalidades de la MC para que el interesado tenga en cuenta cómo surge esta ciencia y cuáles son algunos de sus postulados y objetivos. En un tercer momento, el lector se encontrará con algunas relaciones que puede tener la MC con la neurociencia, y verá la relevancia de ésta como marco de referencia para abrir nuevos caminos en el estudio del cerebro y de la consciencia en particular. Después, se pasará a la exposición de algunos conceptos y fenómenos de la MC que se pueden vincular con procesos cerebrales,

elemento clave para entender los procesos físicos que pueden permitir la emergencia de la consciencia. Y Finalmente, se tendrán en cuenta algunas críticas y nuevas perspectivas para los estudios cerebrales que pueden incluir la MC para explicar mecanismos como la consciencia y otros procesos poco entendidos o desconocidos hasta ahora.

El Problema de la Consciencia

Aunque el problema de la consciencia se planteó hace siglos, en los últimos años diversos estudios, experimentos y prácticas clínicas en la neurociencia como las de Damasio (2000, 2010), Díaz (2008), Koch & Greenfield (2007) o Llinás (2003) han explorado las posibles bases neurobiológicas de la consciencia sin resultados determinantes. A pesar de los avances en la comprensión del cerebro, la neurociencia no ha logrado una explicación satisfactoria que permita desnudar el misterio de la consciencia en su totalidad. En la actualidad, se proponen varios modelos que tratan de explicar la función cerebral que daría origen a la consciencia en el ser humano. Para ello los científicos se basan en la descripción de procesos neurales conocidos y otros que se están explorando hasta ahora, además de prácticas clínicas donde se estudia la consciencia a partir de la deficiencia y el daño cerebral. Sin embargo, preguntas como ¿Qué es la consciencia? o ¿Qué permite que surja la experiencia consciente a partir de la actividad neuronal? siguen escapando a la mirada de la ciencia.

La primera pregunta se puede rastrear hasta la antigua Grecia, donde se formularon modelos para el funcionamiento de la mente, que van desde la existencia del alma inmaterial, hasta una localización específica en el cuerpo. Estas dos posiciones se ven reflejadas en los filósofos clásicos Platón y su discípulo Aristóteles. Para el primero, la mente y la consciencia se reflejaban en el cuerpo material pero eran de origen inmaterial; los contenidos de la mente se encontraban en el mundo de las ideas y se expresaban a través del cuerpo. Por otro lado, Aristóteles consideró que la mente y la consciencia se encontraban en el corazón, argumentando que las emociones y los pensamientos aceleraban sus latidos. Posteriormente, gracias a la diversidad de estudios de los siglos XVIII y XIX, las visiones griegas fueron dejadas atrás y se estableció que la mente y la consciencia tenían una ubicación en el cerebro, o por lo menos una relación estrecha con éste. Hoy día esta corriente es la que predomina en la ciencia, se asegura que si la consciencia tiene una base física en el cuerpo, esta base debe estar en algún lugar del cerebro o en la totalidad del cerebro mismo (Díaz, 2008; Tapia, 2008).

Entre los modelos que parten de esta lógica se encuentran los holísticos, que proponen una imagen donde todas las neuronas del cerebro actúan colectivamente para producir la consciencia. Según este planteamiento, no se podría encontrar un área específica en el cerebro que indique un correlato neuronal único que dé cuenta del fenómeno. Así, la consciencia se extendería por vastas áreas cerebrales configurando un fenómeno global. Por otro lado, los modelos de especificidad neuronal plantean que la consciencia depende de grupos neuronales

específicos que se podrían localizar en sectores específicos del cerebro, por ejemplo en la formación reticular, como propone el neuropsicólogo ruso Alexander Luria. En este sentido, habría varios grupos a nivel cerebral que producirían diferentes formas de consciencia o de integración de información que permitirían el surgimiento de la actividad consciente (Viljoen, 2009). Los modelos de especificidad neural son los modelos más utilizados en las prácticas clínicas de la neurociencia, porque relacionan zonas como la formación reticular, o las conexiones tálamo-corticales como las responsables del estado consciente.

A pesar del auge actual de esta última corriente, hace algunos años surgieron estudios que se podrían ubicar dentro de un modelo holístico que ubican el estudio de la consciencia desde una perspectiva distinta con el fin de aportar algunas respuestas a los acertijos de la mente, incorporando un marco de referencia distinto a los modelos experimentales y clínicos de especificidad. Por esto, se ha considerado abordar la consciencia desde la MC, con el fin de considerar nuevas dinámicas cerebrales y avanzar en las preguntas ancestrales sobre la consciencia y la experiencia consciente.

Llama la atención especialmente que la mayoría de los académicos que trabajan la consciencia desde la MC, no tienen una formación neurocientífica de base ni un fondo filosófico común (Pastor, 2002). En este campo, se ha surgido varias descripciones cuánticas de la consciencia desde diferentes paradigmas científicos y filosóficos, pero lo importante es que implementan nuevos métodos de análisis y comprensión del cerebro, poco abordados en la neurociencia clásica. En este texto se presentará una de estas perspectivas, dejando claro que no es la única propuesta que existe en la actualidad y que aborde la MC y la consciencia. Así, con el fin de que el lector tenga algunas bases sobre la MC, se dará una breve descripción que proveerá herramientas suficientes para ubicarse dentro de este marco de referencia, y que permitirá comprender la concepción presentada, sin ahondar mucho en el tema, para lo cual hay obras disponibles que no requieren un conocimiento en matemática como Penrose (1996, 2006), Hacyan, (2003), Ynduráin (2006) o Hoofst (2008).

El Universo Cuántico

Se podría establecer que la MC tiene su inicio formal en 1900 con los trabajos del físico alemán Premio Nobel Max Planck sobre la radiación de un cuerpo negro. En ese instante Planck planteó que la energía no es continua, como se pensaba por la teoría electromagnética formulada por James Clerk Maxwell en 1873, sino que viaja en pequeños paquetes a los que denominó 'cuantos'. Así, por ejemplo, el fotón es el cuanto de la luz y transporta la fuerza electromagnética en todo el universo y los fotorreceptores ubicados en los ojos son especializados para detectarlos.

Teniendo como base el planteamiento de Planck, Albert Einstein publicó en 1905 su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico que le valió el premio nobel en 1921. Con este artículo Einstein resolvió un enigma que había planteado Isaac Newton sobre la imposible pero real acción a distancia de un cuerpo sobre otro en el fenómeno gravitatorio y electromagnético. Aunque en la época de Einstein se tenía la noción de un "campo" electromagnético que explicaba la acción a distancia de los cuerpos, Einstein postuló que la interacción electromagnética se daba por el intercambio de los cuantos de luz -fotones- entre las dos partículas cargadas eléctricamente.

En otros estudios no menos importantes, De Broglie describió el comportamiento ondulatorio de la materia. Posteriormente, el físico Alemán Werner Heisenberg, planteó el principio de incertidumbre, que rige en gran parte el comportamiento de las partículas subatómicas en el mundo cuántico, referido el límite de exactitud que se puede tener en una medición de nivel cuántico. La incertidumbre implica que no es posible medir con la misma exactitud la posición y el movimiento de una partícula al mismo tiempo, entre más exactamente se mida una de estas propiedades más incertidumbre habrá en la medición de la otra. Por otro lado, Erwin Schrödinger y Paul Dirac desarrollaron las ecuaciones que describen la función de onda para una partícula en el espacio; trabajo por el que compartieron el Premio Nobel de Física en 1933. De esta forma, y con otros trabajos importantes en la primera mitad del siglo XX, se conformaron las bases de la nueva rama de la Física denominada Física Cuántica o Mecánica Cuántica indistintamente, que dominaría las interacciones del mundo atómico y subatómico.

Esta teoría utiliza formalismos como la constante de Planck ($h = 6.6 \times 10^{-34}$ joule – segundo) que es la relación entre la cantidad de energía y de frecuencia asociadas a un cuanto o a una partícula; la longitud de Planck, aproximadamente $10^{-36}m$, que indica la distancia mínima medible y la distancia por debajo de la cual el espacio deja de tener una geometría clásica; y el tiempo de Planck, aproximadamente $10^{-44}seg$ que denota la unidad mínima de tiempo medible en el universo. Junto con otras constantes y propiedades, este formalismo matemático se encarga de describir todas las interacciones cuánticas conocidas por el hombre que se presentan en todo el universo.

Como parte importante de este texto, hay que resaltar que la MC describe los sistemas (electrón, protón, átomo, quark, etc.) por medio de la llamada función de onda (ψ) que representa toda la información que podemos conocer del sistema bajo estudio. La ecuación que contiene a (ψ) relaciona las amplitudes de la onda de probabilidad con las fuerzas que actúan sobre el sistema; esta función es tan básica para la MC como lo son las leyes del movimiento de Newton para la física clásica. Solo con motivos ilustrativos, la ecuación de función de onda propuesta por Schrödinger se representa como:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \psi = i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t}$$

Una característica de la MC es que las funciones de onda obedecen el principio de superposición que está ligado al principio de incertidumbre propuesto por Heisenberg. Si dos funciones de onda representan adecuadamente al sistema, la combinación lineal de ambas funciones también lo representa. Así, el número de funciones que contribuyan a un estado cuántico puede ascender hasta el infinito. Este concepto es crucial en la MC porque no cuenta con un homólogo macroscópico -como la gran mayoría de elementos de la MC-. La resolución de la ecuación de Schrödinger es complicada y es favorable en sistemas simples con pocas partículas (Pastor, 2002). En contextos más complejos -como el cerebro- la formulación cuántica se complica tanto y se vuelve tan extensa e intrincada, que el mismo Heisenberg, después de ser uno de los fundadores de la MC, vio más favorable trabajar haciendo investigaciones ferroeléctricas a las que dedicó el resto de su vida.

Considerando que la mayoría de los fenómenos de la MC no tienen homólogos en la física macroscópica, la MC se diferencia en gran parte de la mecánica clásica -que es la física que se utiliza para el estudio de los objetos macroscópicos- porque incluye principios, conceptos, leyes, energías, distancias y longitudes que no se pueden estudiar, comprender o implementar desde la mecánica clásica, como la longitud de Plack o la constante de Plack, entre otros. Otra diferencia importante es que una versión de la MC es probabilística a diferencia de la Física Clásica que es determinista.

En la MC se habla de la probabilidad de que un hecho suceda o de la probabilidad que cierta partícula se encuentre en determinada posición. Mientras que en la Física Clásica los elementos están o no, en la cuántica se dice que hay una mayor probabilidad de que el elemento esté o no esté en ese sitio. Además, la MC permite que hechos que son poco probables como traspasar una pared caminando, se puedan dar -aunque tocaría esperar más que la edad actual del universo- pero en principio no es imposible como en el mundo clásico. Sin este nivel de la física, hubiese sido imposible la comprensión de la naturaleza microscópica del universo. Además, gracias a ella se puede contar con los avances tecnológicos que han cambiado la sociedad en los últimos años: televisión, computadores, celulares, medicina, satélites, etc. (Ynduráin, 2006).

Hoy día, la teoría cuántica está formalizada por lo que se conoce como la 'Teoría Estándar'. Ésta se constituyó formalmente en los años 70's y explica gran cantidad de interacciones entre las partículas subatómicas, los constituyentes de la materia, partículas elementales, antimateria, física de altas energías, etc. Por ello la Teoría Estándar, que describe tres de las cuatro fuerzas del universo¹, es la teoría más exitosa y exacta que se ha formulado en la

¹ La teoría estándar puede cuantificar la fuerza nuclear débil, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electromagnética, incluso ha logrado fusionar la fuerza electromagnética y la nuclear débil. Sin embargo, los

historia del hombre (Kaku, 2004; 2011), aunque su interpretación carece de tal unificación (Pastor, 2002).

Mecánica Cuántica y Neurociencias

Poco tiempo después de los inicios de la MC a principios del siglo XX, la teoría fue utilizada en otras áreas de la ciencia. Para mencionar uno de los primeros casos, se conoce que tres años después de que Heisenberg realizara sus postulados, Erich Hückel, químico y físico alemán, desarrolló métodos simplificados basados en la mecánica cuántica para analizar la estructura de moléculas orgánicas. En particular explicó el estado de los electrones en componentes aromáticos. Sin embargo, sus conceptos fueron reconocidos solo hasta 1950 cuando la llegada de los computadores hizo posible hacer cálculos más detallados (Hunter, 2006).

Teniendo en cuenta utilidades de la MC de este tipo, en el campo de la biología desde 1990 se abrió formalmente el campo de investigación en MC para explicar fenómenos naturales que no se habían abordado hasta entonces (Hunter, 2006). En esta área, la MC puede explicar interacciones entre partículas, átomos y enlaces químicos (Ynduráin, 2006); incluyendo los fenómenos de radiación, los factores de herencia y ADN (Kaku, 2011; Penrose, 2006).

En el área de las neurociencias, algunos principios de la MC son usados actualmente en la clínica neurológica, por ejemplo, con los estudios de tomografía por emisión de positrones, utilizada para medir la actividad de diversas áreas cerebrales por medio del flujo de sangre hacia dichas áreas; cuanto mayor actividad cerebral exista en determinada área, más flujo de sangre habrá en ese lugar. En este estudio se inyecta en la sangre un componente químico radiactivo que al desintegrarse emite positrones, la antipartícula del electrón, predicha matemáticamente por Paul Dirac y descubierta poco después. Como es descrito en el modelo estándar, cuando los positrones se encuentran con electrones presentes en muchas moléculas del cerebro, se aniquilan mutuamente produciendo rayos de alta energía que son detectados por la máquina. De esta forma, teniendo en cuenta que el radiactivo se encuentra en la sangre, se puede determinar la actividad neural de ciertas áreas cerebrales observando el flujo sanguíneo hacia esas áreas.

En otras aplicaciones clínicas se ha utilizado la MC para exploración por resonancia magnética nuclear o para cirugía láser. En la primera se pueden observar tejidos gracias a los electrones que reaccionan con el campo magnético presente en el paciente. En el láser se hace uso de mecanismos como la superposición donde todos los fotones tienen una misma función de estado. En otros contextos, por ejemplo, la cuántica permitiría hacer nanobots que serían de gran

esfuerzos por cuantificar la gravedad, que es la fuerza que nos es más común, ha sido infructuosa y la búsqueda del hipotético gravitón –el cuanto de la gravedad- continúa activa. Para Penrose una teoría cuántica de la gravedad es fundamental para el abordaje completo del fenómeno de la consciencia desde el punto de vista de la MC.

aplicación en bastantes áreas de la salud (Kaku, 2011). Aunque sin duda las investigaciones apuntan a que el uso de la teoría cuántica es viable para avances tecnológicos en el área de diagnóstico clínico, algunos investigadores han ido más allá.

Desde la década del 1980 surgieron varios estudios que planteaban probables efectos de la MC en las dinámicas cerebrales, que a nivel neural podían desencadenar efectos macroscópicos como la consciencia. A partir de esto se han postulado modelos del funcionamiento neural y cerebral, usando los principios de la cuántica para explicar o describir ciertos tipos de actividad en diferentes niveles del cerebro. Sin embargo, se puede decir que estas visiones han tomado caminos alternos porque la neurociencia no las ha considerado seriamente, como es fácilmente observable en la literatura y la academia neurocientífica, que ha considerado que se pueden explicar fenómenos como la consciencia a través de los mecanismos cerebrales clásicos conocidos.

En este sentido, hay que entender que hasta ahora las concepciones de los procesos cerebrales son descritas por la neurociencia con conceptos presentes en la Física Clásica. Así, el cerebro está compuesto de materia y campos causales localizados y deterministas entre sí. De este modo, la neurociencia considera que todas las propiedades del funcionamiento cerebral, incluida la consciencia, se pueden describir en esos términos clásicos (Schwartz, Stapp, & Beauregard, 2005). Por ejemplo, los estudios neurofisiológicos de electromagnetismo, ondas cerebrales y electroencefalograma, son procesos que se describen a través de la Mecánica Clásica y que se llevan a cabo hoy día en las prácticas clínicas como medios de estudio prevalentes.

En un camino alterno, al margen de estos estudios comunes en neurociencia, se encuentran autores que trabajan el modelo cuántico del cerebro como Sir Roger Penrose, matemático de la universidad de Oxford² y el anestesiólogo Stuart Hameroff³, profesor de los departamentos de Anestesiología y Psicología, y director del Centro para el Estudio de la Conciencia en la Universidad de Arizona en Tucson. Otro académico importante dentro de la rama de MC y cerebro es Jack Tuszynski, profesor de física de la Universidad de Alberta, Canadá, quien ha centrado sus investigaciones en la dinámica de las proteínas y la función microtubular, constituyéndose como uno de los principales colegas de Hameroff. Se pueden encontrar otros

² Penrose es sin duda uno de los matemáticos más sobresalientes de las últimas décadas. Es conocido por los estudios de agujeros negros que desarrolló con el cosmólogo inglés Stephen Hawking, con quien, dando solución a ecuaciones relativistas, desarrolló un modelo cosmológico en el que el tiempo tuvo que haber iniciado en la singularidad del *Big Bang*. En la actualidad Penrose trabaja en análisis y propuestas matemáticas para modelos cosmológicos y de teorías de campo unificado en la física, además, ha centrado gran parte de su investigación en describir fenómenos de la cuántica que se pueden presentar en el cerebro, haciendo la formulación matemática correspondiente para tales efectos.

³ Desde 1974 Hameroff empezó a explorar horizontes distintos en la investigación neurocientífica, hasta convertirse en uno de los principales académicos con más de 150 publicaciones sobre el tema de la consciencia y MC. Su investigación ha partido desde las propiedades químicas de los anestésicos para eliminar la consciencia y las exploraciones a nivel molecular de las estructuras cerebrales.

académicos que han hecho aportes a este modelo como Pokorný, Brown, Stapp, Hagan, Hu, Portet, Satric, entre otros, quienes cuentan con formación en Física, ya que los modelos matemáticos de la MC y cerebro no son fáciles de formular, y cómo se dijo anteriormente, los aportes a la comprensión de la neurobiología de la consciencia desde la MC han venido desde otras disciplinas, la Física especialmente.

Hameroff ha hecho énfasis en que los estudios en el marco de la mecánica clásica para develar los misterios de la consciencia, han sido infructuosos y están casi agotados. Para él, si se desea alguna vez encontrar alguna explicación satisfactoria que difiera de las ya conocidas, se debe estudiar el fenómeno desde una nueva física -que aún no existe- que tiene gran base en la MC (Penrose, 1996). Aquí, se hará un paréntesis para explicar un poco más esta idea de Hameroff, que se puede extrapolar a muchos modelos cerebrales basados en la MC.

Se parte del hecho que no hay nada en la física que indique que los organismos biológicos se rijan por unas leyes distintas a las conocidas en la naturaleza. En este sentido, los organismos que habiten en este universo, deben obedecer las leyes de la naturaleza descritas por la física clásica y la MC. A partir de allí, los organismos a nivel microscópico deben presentar fenómenos cuánticos subyacentes que podrían desencadenar en funciones cerebrales o mentales, para este caso, la consciencia (Koch & Klaus, 2006). Sin embargo, científicos como Penrose recalcan que la Física actual no cuenta con una teoría unificada que incorpore los efectos microscópicos de la MC y los efectos macroscópicos de la física clásica.

Lo anterior, desemboca en que no se tiene claro cómo los fenómenos cuánticos pasan a ser macroscópicos. Para solucionar esto, según los autores mencionados, se debe formular una teoría unificada que incluya la gravedad cuántica que es la única que no se ha podido cuantificar -recordemos que la teoría estándar describe las otras tres fuerzas del universo-. Una vez se posea esta teoría, Penrose asegura que esta nueva Física proporcionaría un marco relevante y completo para estudiar de la mejor manera los procesos cuánticos neurales (Penrose, 1996). El argumento de Penrose se basa en una cuestión que no se tratará en este texto, la Reducción Objetiva Orquestada (OR), proceso que necesita de una teoría cuántica de la gravedad para configurar un modelo estable de la consciencia a nivel cuántico.

De todos modos, se ha optado por estudiar fenómenos cuánticos antes de formular la nueva física necesaria porque, según los teóricos de la MC y cerebro, estos están en la capacidad de ofrecer abordajes que desemboquen en respuestas a varias de las cuestiones sin resolver. Si se ha entendido hasta aquí, debe quedar claro que las propuestas y análisis que han hecho algunos investigadores entre los que se cuentan físicos, matemáticos, neurólogos, biólogos e incluso filósofos que trabajan la MC, apuntan a generar modelos de dinámica neuronal basados en la MC que puedan explicar la consciencia.

Sin embargo, es necesario hacer claridad en que estos acercamientos desde la teoría cuántica son en su mayoría modelos no comprobados directamente, porque las investigaciones en cuántica son difíciles y aún más cuando se trata de sistemas biológicos (Reimers, McKemish, McKenzie, Mark, & Hush, 2009). Por este motivo, las propuestas del modelo cuántico de la consciencia han sido fuertemente revisadas y atacadas, ya que incluyen muchos datos no verificados, y sobre todo, la necesidad de que se den circunstancias improbables de organización y dinámica de sistemas biológicos como el cerebro, tema que se tratará al final del texto.

En este sentido, la importancia de utilizar el marco de la mecánica cuántica para generar modelos de funcionamiento cerebral y de la consciencia, se basa en que la teoría clásica ha sido incapaz de proveer respuestas satisfactorias y completas a cuestiones formuladas desde hace miles de años. Se verá cómo, a pesar de los problemas metodológicos de la cuántica, se pueden generar modelos viables que logran zanjar el problema y logran constituir nuevas perspectivas de estudio en la neurobiología de la consciencia.

El Extraño Mundo de la Mecánica Cuántica

Antes de referir uno de los modelos cuánticos de la consciencia como se planeó al principio del texto, es preciso hacer referencia a algunos conceptos y fenómenos de la MC usados en la teoría para que el lector comprenda mejor las bases cuánticas formuladas para la actividad neuronal. Para efectos de este escrito, se hará énfasis en los procesos de coherencia y el entrelazamiento cuántico, aunque más adelante se referirán otros como la tunelación y la superposición que sirven para complementar la información, pero que no son el foco de este artículo ya que tienen que ver más con el procesamiento cuántico de la información.

A diferencia de la Física Clásica, la MC es indeterminista. La teoría cuántica implica que a escala microscópica la naturaleza tiene un carácter puramente aleatorio (Kaku, 2004). Además, el mundo de la MC posee fenómenos que serían extraños en un nivel macroscópico, pero en realidad mucho más comunes en el universo. Efectos como la superposición en el que, dada una función de onda, una partícula puede estar en dos sitios al mismo tiempo; el efecto EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) en la que una partícula en algún punto del universo se puede ver influida por otra partícula que está en el otro extremo del cosmos; o la coherencia, en la que varios átomos o moléculas pueden ser descritos por una sola función de onda, son algunos de estos fenómenos que no tienen homólogo macroscópico. Sin embargo, la naturaleza ha hecho uso de estos efectos para organizar y proveer el universo que hoy se conoce, mucho antes de que fueran descubiertos.

Para ahondar un poco más en detalles, una intuición común refiere que solamente se pueden afectar cosas que sean contiguas. En este sentido, si X afecta Y, debe estar contigua a éste y

si no lo está, se intuye que lo afectó de un modo indirecto (Albert & Galchen, 2009). A esa intuición se le llama principio de localidad y es lo común para cualquier persona que entiende el mundo a través de fenómenos causales y conectados entre sí. Sin embargo, la MC, con el fenómeno de entrelazamiento y coherencia cuántica, destruye ese principio de localidad.

En el entrelazamiento o efecto EPR, dos partículas pueden estar entrelazadas sin necesidad de que haya algún contacto entre ellas o alguna señal electromagnética que las comunique. Si dos electrones vibran inicialmente al unísono, pueden permanecer en ese estado incluso a una gran distancia, aun cuando se encuentren en dos sitios diferentes del universo, sigue habiendo una onda de Schrödinger que los conecta. En ese momento, si algo sucede a un electrón, se transmite inmediatamente al otro porque sus funciones de onda están conectadas por un hilo invisible (Kaku, 2009).

Esto significa que, en cierto sentido, lo que nos ocurre a nosotros afecta de manera instantánea a cosas en lejanos confines del universo, puesto que nuestras funciones de onda probablemente estuvieron entrelazadas en el comienzo del tiempo. En cierto sentido hay una madeja de entrelazamiento que conecta confines lejanos del universo, incluyéndonos a nosotros (Kaku, 2009, p.90).

Cuando las partículas tienen esta relación, se dice que están entrelazadas mecanocuánticamente: el concepto de que partículas tienen una conexión profunda que las vincula (Kaku, 2009). *"El entrelazamiento engendra una especie de intimidad entre entes materiales que habría resultado inconcebible antes de que se formulase la mecánica cuántica"* (Albert & Galchen, 2009, p.16). En experimentos hechos con telescopios en el Observatorio del norte Europeo se ha confirmado que el entrelazamiento entre fotones se preserva a través de 144 kilómetros, lo que parece indicar que este fenómeno cuántico tiene lugar con independencia de la distancia (Zeilinger, 2009).

"Desde los años setenta los experimentos han confirmado con creciente precisión las predicciones de la física cuántica, refutando la imagen local y realista del mundo" (Zeilinger, 2009, p.34). Para estos efectos, en la década de 1980 los experimentos de John Bell y Alain Aspect demostraron que el mundo es no-local (Albert & Galchen, 2009). Aspect realizó un experimento con dos detectores separados 13 metros, concordando exactamente con la teoría cuántica. Aunque este efecto no se reconoció como una utilidad práctica inmediatamente, todo cambió cuando en 1993, científicos de IBM, demostraron que era físicamente posible teletransportar objetos en un nivel atómico utilizando el experimento EPR (Kaku, 2009).

Actualmente se hace uso de este concepto para planear el desarrollo de ordenadores cuánticos, los sistemas del futuro (Kaku, 2011). Para agrupar un poco las ideas presentadas, esta circunstancia de no localidad se puede entender como un conjunto de partes que forman

un sistema así estén separados entre sí, de este modo, se pueden describir conjuntamente mediante una ecuación de onda.

Con la información suministrada sobre este efecto, se espera que el lector entienda porque el entrelazamiento entraña un fenómeno misterioso y contrario a la intuición, la no-localidad o posibilidad de afectar algo sin tocarlo directa o indirectamente. Este fenómeno es de gran importancia filosófica porque como ya se ha mencionado, pone en entre dicho la posición común sobre la acción de un cuerpo sobre otro para configurar la causalidad, y como ya se verá, este sutil fenómeno de la naturaleza hace parte del rompecabezas de la consciencia humana.

Por otro lado, los albores del fenómeno de coherencia cuántica, en amplia relación con el efecto EPR, se pueden remontar a Albert Einstein quien, revisando los trabajos del físico indio Satyendra Nath Bose, descubrió que si un grupo de átomos se congelaba al cero absoluto, éstos se condensaban en un solo estado cuántico en el cual actuarían como un superátomo. Con esta propuesta se preveía un nuevo estado de la materia nunca visto en la Tierra. Así, cerca de una millonésima de grado sobre el cero absoluto, los átomos vibrarían al unísono, y los sutiles efectos cuánticos tan solo observados al nivel de átomos individuales, se pueden distribuir por todo el condensado incluso hasta escalas macroscópicas. De este modo, los componentes atómicos de un condensado Bose-Einstein, como se le llama a este fenómeno, actúan como si todos sus elementos vibraran al unísono (Kaku, 2004).

En 1924 Einstein no creía que podría verse este tipo de condensado. No obstante, en 1995 Eric Cornell y Carl Weiman produjeron un condensado Bose-Einstein puro de 2000 átomos de rubidio a veinte millonésimas de grado sobre el cero absoluto. Además, Wolfgang Ketterle produjo estos mismos condensados con suficientes átomos de sodio para poder hacer experimentos con ellos (Kaku, 2004). Los fenómenos de coherencia observados hasta el momento se relacionan con la condensación Bose-Einstein, superconductividad, superfluidez, emisión láser y otros fenómenos únicos envueltos en coherencia cuántica macroscópica (Reimers, et al., 2009).

Ahora bien, para que se presente la coherencia cuántica, un sistema debe estar lo suficientemente aislado, de tal manera que no se vea afectado por el "ruido" ni provea a este mismo entorno información sobre su estado (Zeilinger, 2009). Por otra parte, estos estados que se presentan en la superconductividad o superfluidez, donde hay coherencia cuántica, ocurren a temperaturas muy bajas cercanas al cero absoluto. Estas dos condiciones representan el reto para los teóricos de la cuántica del cerebro como se verá a continuación.

Coherencia Neuronal a Gran Escala: Formula para la Consciencia

Retomando lo que se dijo anteriormente, las condiciones de aislamiento y temperatura que requiere la coherencia cuántica para producirse, son tal vez, la cuestión más complicadas para la teoría mecanocuántica de la consciencia y de donde se han desprendido todas las críticas y revisiones al modelo. En primer lugar, como todos los sistemas biológicos, el cerebro es un sistema que dista bastante del cero absoluto, y en segundo lugar, configura un sistema lleno de corrientes electromagnéticas que afectarían el aislamiento, y por ende, la coherencia dentro de sistema si se presentara. No obstante, hay algunos indicios que indican que la coherencia puede ocurrir en otras situaciones menos extremas y raras en la naturaleza, aún más, la naturaleza se habría servido de la coherencia para conocerse a sí misma.

Tal vez, el primer trabajo referido en la literatura sobre el tema, que observó fenómenos de coherencia cuántica en sistemas biológicos es el de Herbert Fröhlich en 1968. En ese año el físico alemán con los artículos, *Long-range coherence and energystorage in biological systems* y *Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes*, abrió un nuevo campo de estudio y reflexión sobre la conductividad en sistemas biológicos que serían respaldadas, pero también contrariadas, por teóricos y experimentadores.

Antes de que fuera observado el fenómeno de la superconductividad, Herbert Fröhlich sugirió el papel de los efectos cuánticos colectivos para sistemas biológicos a través del hallazgo de oscilaciones cuánticas coherentes en membranas biológicas (Fröhlich, 1968a, 1968b). Además, mostró que oscilaciones impulsadas con energía metabólica pueden condensarse con casi toda la energía suministrada, activando el modo de vibración de frecuencia más baja en el cuerpo biológico, propiedad comparada con la condensación Bose-Einstein o superconductividad (Fröhlich, 1968b). Es decir, que la energía suministrada no se convierte totalmente en energía térmica, sino que una parte permanece altamente organizada para ser almacenada.

La idea de Fröhlich surgió a partir de un fenómeno que ya él había observado en membranas biológicas en 1938 y que lo llevó a proponer que debía haber efectos vibracionales dentro de las células que resonarían con la radiación de microondas a 10^{11} Hz como resultado de un fenómeno de coherencia cuántica biológica (Penrose, 1996) y que se parecería a la condensación de un gas a baja temperatura. Para este efecto, en lugar de necesitar una temperatura baja, los efectos existen a partir de una energía metabólica que los impulsa. De esta manera, mostró cómo colecciones impulsadas de osciladores pueden conseguir un estado altamente ordenado que tiene ciertas propiedades del condensado Bose-Einstein. Tal condensación tiene una profunda influencia en las propiedades dinámicas del sistema y algunos investigadores han tenido en cuenta este hecho para buscar aplicaciones en Física, Biología y Medicina (Reimers, et al., 2009).

Las condensaciones de Fröhlich se clasifican en tres tipos: condensaciones débiles donde el efecto de condensación es cineticoquímico; condensaciones fuertes donde una gran cantidad de energía es encaminada en un solo modo vibracional; y las condensaciones coherentes donde la energía es puesta en un estado cuántico simple en el sistema (Reimers, et al, 2009) que se podría describir por una ecuación de onda que represente toda la dinámica del sistema.

Así, suponiendo que puede existir coherencia cuántica en sistemas biológicos, como refiere Fröhlich, no existe un nexo que evidencie una clara relación entre este fenómeno y la actividad cerebral conocida. Para establecer este nexo y dar forma a un planteamiento cuántico que implique en principio estos estados coherentes en el cerebro, hizo falta que científicos como Penrose, Hameroff, Tuszynsky y Hu, entre otros, formularan algunas dinámicas de este tipo para el sistema neuronal y que consideraran que estos estados pueden desencadenar fenómenos macroscópicos como la consciencia.

Entendido lo planteado anteriormente, el modelo cuántico de la consciencia plantea que en niveles subyacentes del cerebro los efectos cuánticos coherentes desempeñan un papel importante para que la consciencia emerja a partir de la actividad neuronal.

Para empezar a ubicar MC en el cerebro, se debe referir que las fuerzas químicas que controlan las interacciones de átomos y moléculas, incluso el número e intensidad de los potenciales de acción son de origen cuántico. Por ejemplo, John Eccles ha defendido la importancia de los efectos mecánico cuánticos en la acción sináptica (Beck, & Eccles, 1992). Él señala el retículo vesicular presináptico-una red hexagonal paracristalina en las células piramidales del cerebro- como un lugar cuántico apropiado. Entre otras descripciones, Eccles afirma que hay partes en las neuronas que realizan procesos enteramente cuánticos y que en este sentido, se pone en duda la ley del todo o nada del potencial de acción, sino que podría ser todo y nada a la vez (Beck & Eccles, 1992).

A este respecto, al igual que Eccles, Penrose refiere que son importantes los efectos cuánticos para el cambio de intensidad sináptica. Por lo tanto, si las sinapsis estuvieran fijas, el cerebro se parecería más a un ordenador, idea que no le gusta al matemático y que utiliza para argumentar la no compatibilidad de la mente basado en el teorema de incompletitud de Gödel (Penrose, 2006) que no es objeto de discusión aquí.

Si se tiene en cuenta lo anterior, y observamos los abordajes clásicos del cerebro, cualquier actividad en el tejido nervioso debe tomarse como ocurriendo o no ocurriendo, pero en la cuántica es diferente. Por otra parte, se debe hacer claridad que formulaciones de coherencia neuronal como las de Rodolfo Llinás, Francis Crick o Christof Koch, entre otros neurocientíficos, no son las mismas que plantea la mecánica cuántica. En particular esta triada de neurocientíficos afirma que la actividad cerebral sincronizada es la responsable de la

conciencia. Para ilustrar un poco más al lector, se hará un paréntesis aquí para referir el modelo propuesto por Llinás y dejar ver algunas características propias de los estudios modernos que distan de las pretensiones de la MC.

El neurólogo empieza su descripción con lo que él denomina "propiedades intrínsecas oscilatorias del cerebro". Parte del hecho de que el sistema nervioso está dotado de actividad eléctrica particular que le da cierta funcionalidad. Esta actividad eléctrica se manifiesta en la membrana que rodea la célula por medio de vibraciones de voltaje diminutas -milésimas de voltio-. Estas ondulaciones muestran dinámicas no lineales que confieren al sistema gran agilidad temporal. Dicha actividad es relacionada por Llinás con la actividad eléctrica y de potenciales de acción de la célula, que entre otras cosas, determinan si la célula responde a la señal que le llega o si la ignora (Llinás, 2003).

Las neuronas, cuyo comportamiento es rítmico y oscilatorio, pueden impulsar la actividad de otras neuronas mediante potenciales de acción, conformando así grupos neurales que oscilan en fase, es decir en forma coherente, que es la base de la actividad simultánea (algo así como lo que ocurre en la marcha de los desfiles militares, en el ballet o en las danzas de grupo) (Llinás, 2003, p.14).

Para Llinás esta coherencia es el modo por el cual la comunicación entre las neuronas es efectiva. Un grupo de neuronas que resuene en fase entre sí, puede hacerlo con neuronas distantes afines. De forma importante, el neurólogo refiere que no todas las neuronas resuenan de manera continua, sino que pueden modificar su actividad de oscilación, de tal manera que pueden hacerlo o no hacerlo para representar el mundo externo en continuo cambio. "*La raíz de la cognición se encuentra en la resonancia, la coherencia y la simultaneidad de la actividad neuronal, generadas no por azar, sino por actividad eléctrica oscilatoria*" (Llinás, 2003, p.15).

Más importante aún y en relación con el tema de la conciencia que es el que nos atañe en este artículo, Llinás refiere que tal actividad intrínseca conforma la sensación de "nosotros mismos" (Llinás, 2003). Sin ahondar más en la propuesta de Llinás, el lector se habrá dado cuenta de las diferencias entre esta forma de coherencia que propone Llinás, basado en actividad eléctrica coherente, y el modelo cuántico neuronal que se basa en condensados Bose-Einstein que distan mucho de ser descritos desde el modelo clásico. Con lo anterior no se quiere decir que estas descripciones y modelos sean obsoletos, pero en el concepto del autor, pueden responder a características mucho más básicas presentes en la MC.

Así pues, para volver a lo que compete aquí, se hará referencia a dos elementos sobre los que se basa esta teoría desde el punto de vista de Penrose (1996, 2006). La primera hace referencia a la no computabilidad de la mente humana, lo que indica que ningún ordenador podrá simular los mismos procesos que un ser humano ejecuta en el cerebro. La segunda,

refiere que toda explicación de la consciencia humana se debe basar en perspectivas globales del cerebro, es decir, considerar varias zonas del cerebro para generar la consciencia. A partir de estas dos ideas básicas y la MC Penrose desarrolla el concepto de computación de microtúbulos, propuesto por Stuart Hameroff para dar a luz a su teoría de la consciencia humana (Hameroff y Penrose, 1998). Penrose además, propone un modelo que utiliza la coherencia cuántica neuronal en los microtúbulos de la neurona, cuestión que se tratará a continuación.

Como ya se dijo en las primeras secciones de este texto, existen varios modelos que incorporan la MC con la actividad neuronal. Para seguir la línea argumentativa, la descripción se reducirá a la teoría Hameroff&Penrose (1998), para la cual ya se dieron las bases conceptuales de la MC necesarias para entender a grandes rasgos el fenómeno. Éste planteamiento indica que los microtúbulos de las neuronas son sitios ideales para que se produzca la coherencia cuántica. En este sentido, grandes grupos de neuronas podrían estar actuando coherentemente si en los microtúbulos de cada una de ellas se dan las condiciones necesarias para que esto ocurra.

Este estado coherente, según Penrose, es lo que permite que surja la consciencia en los sistemas biológicos, en palabras del matemático, la coherencia cuántica "*se refiere a circunstancias en que grandes números de partículas pueden cooperar colectivamente un simple estado cuántico que permanece esencialmente no enmarañado con su entorno*" (Penrose, 1996, p.371). En otras palabras, la palabra coherencia en este contexto neural, se refiere al hecho de que las oscilaciones cuánticas, que parten de los microtúbulos, pueden variar a unísono en lugares diferentes del cerebro. Por su parte, Hameroff había sugerido que en los microtúbulos se realizaba computación binaria (0 y 1) gracias a las dos configuraciones distintas que pueden tomar las tubulinas que conforman el microtúbulo. Así, cada microtúbulo se puede comportar como un autómatas celular, es decir, como un ordenador cuántico capaz de llevar a cabo computaciones simples (Pastor, 2002).

En este sentido, el modelo Hameroff-Penrose de la consciencia se ha basado en la función del citoesqueleto, como sistema nervioso de la célula conformado en parte por microtúbulos, para explicar actividad neuronal que permita configurar la consciencia. Es importante resaltar que, aunque se parte de la propuesta de condensados de Fröhlich, la teoría Hameroff-Penrose refiere que los estados coherentes no ocurren en las membranas de las neuronas, sino en el citoesqueleto o los microtúbulos propiamente.

Para hacer una distinción aquí, los componentes del citoesqueleto son principalmente filamentos de distintos calibres (6 y 7 nm) y microtúbulos, largos cilindros huecos con un diámetro externo (24nm), mayor que cualquiera de los otros filamentos, que entraremos a describir con algo más de precisión en los párrafos que siguen. Para esta descripción, se

empezará por la estructura de los microtúbulos, se pasará a describir algunas dinámicas y después se hará referencia a sus funciones.

¿Lugares Cuánticos Apropiados?

Los microtúbulos tienen una exquisita estructura supramolecular. Su pared tiene 13 protofilamentos longitudinales que se encuentran en paralelo formando un cilindro con un espacio central de (14nm). Los protofilamentos son a su vez una cadena de proteínas conocidas como Tubulina α y Tubulina β que se asocian como parejas consecutivas. La disposición de las tubulinas que conforman los protofilamentos, se van desfasando progresivamente hasta constituir un helicoide que no tiene extremos equivalentes. Esta situación permite que los microtúbulos posean una bipolaridad estructural intrínseca (Hameroff & Penrose, 1998). Las parejas de tubulina α y β pueden estar desensambladas (despolimerizadas) o ensambladas (polimerizadas), esta última situación ocurre preferentemente en uno de los dos extremos. La configuración del citoesqueleto puede variar entre las células, en la neurona, los microtúbulos se encuentran dispuestos en paralelo y conectados por vínculos radiales de proteínas asociadas conocida como MAP (*Microtubule Associated Proteins*) (Frixione, 2007).

La dinámica de este mecanismo de procesamiento celular se podría describir como sigue. La excitación en la membrana plasmática induciría por los MAP, o por movimiento de iones de canales activados, un cambio transitorio en la forma de las moléculas de tubulina en los microtúbulos cercanos. Por este cambio reversible, cada microtúbulo afectado tendría por un momento una modificación de sus tubulinas, apagada o excitada. Dicho cambio puede inducir cambios iguales en protofilamentos adyacentes por lo que el número de tubulinas excitadas tiende a ser mayor, lo que configura un patrón de excitación en la pared del microtúbulo -los 13 protofilamentos-. Además, las dinámicas de excitación de las tubulinas en cada microtúbulo se comunican por medio de los MAP, lo que genera un patrón de excitación a través del citoesqueleto como si este fuera una especie de sistema neural dentro de la misma célula (Frixione, 2007).

Por otra parte, los dos estados de las moléculas de tubulina representarían información binaria que se puede comunicar, por ello se considera el citoesqueleto desde perspectivas como la de Hameroff, una diminuta computadora con un rendimiento muy elevado (Penrose, 1996). Según el modelo cuántico más simple la capacidad de cálculo del cerebro por segundo es de 10^{23} bits, mientras que la visión neurofisiológica clásica estiman unos 10^{16} bits por segundo (Frixione, 2007). Sin embargo esta sola capacidad de cómputo no puede explicar la consciencia, para lo que se ha puesto a consideración la superposición de estados cuánticos que se tomará más adelante.

Para finalizar con la descripción de los microtúbulos, se pueden referir algunas funciones conocidas para estos autómatas celulares, como los llama Hameroff. A grandes rasgos, se conoce que en la neurona, los microtúbulos pueden transportar moléculas neurotransmisoras dentro de ésta y son los responsables de mantener la intensidad de la señal sináptica o modificarla cuando se necesite-en relación con la propuesta de Eccles-. Por otro lado, pueden organizar el crecimiento de nuevas terminaciones nerviosas guiándolas hacia sus conexiones con otras células nerviosas para formar sinapsis en el axón, dendritas o espinas dendríticas.

Estas espinas están sujetas a crecimiento y degeneración como característica importante de la plasticidad cerebral. En este sentido, hay evidencia de que los microtúbulos están involucrados en el control de dicha plasticidad. De la misma forma, se postula que los microtúbulos gobiernan el número de sinapsis y organizan los lugares en donde deben hacerse conexiones sinápticas activas entre neuronas (Penrose, 1996).

Basados en las funciones de autómatas celulares, Hameroff y sus colegas han defendido que en los microtúbulos hay señales complicadas que pueden ser transmitidas y procesadas a lo largo de ellos como ondas de diferentes estados de polarización eléctrica de las tubulinas (Hameroff & Penrose, 1998); señales que parecen ser relevantes para la forma en que los microtúbulos realizan diversas funciones. Desde 1974 Hameroff había propuesto que los microtúbulos podrían actuar como "guías de onda dieléctricas" y en 1983 Emilio del Giudice argumentó que un efecto cuántico de autoenfoco de ondas electromagnéticas dentro del material citoplasmático en las células, hace que las señales queden confinadas en una región cuyo tamaño coincide precisamente con el diámetro interno de los microtúbulos (Penrose, 1996). Hay que resaltar que este tipo de coincidencias no son extrañas realmente en la Física de Partículas, el Modelo Estándar o la Cosmología y no hay razón para pensar que no puedan tener una utilidad interesante dentro del cerebro humano.

Coherencia Cuántica en los Microtúbulos

La propuesta diseñada hasta el momento, arroja que los microtúbulos pueden ser aptos para contener oscilaciones cuánticas coherentes que estarían ocurriendo dentro de las células nerviosas. Gracias a este efecto numerosas áreas cerebrales estarían vibrando al unísono para producir la consciencia. En relación a esto, se ha mencionado que para avanzar en los estudios de la neurobiología de la consciencia se deben estudiar grupos de neuronas y no neuronas individuales (Crick, 1994). Por tal motivo, la coherencia brindaría un marco desde el cual se pueden estudiar miles de neuronas que estarían enmarañadas en un estado cuántico simple. Ahora se verán en particular las características que postularon a los microtúbulos como los agentes primarios de la consciencia.

El primer examen para proponer a los microtúbulos como posible base biológica para que exista coherencia cuántica que dé origen a la consciencia, surge de lo que desconecta la consciencia de forma muy concreta, los anestésicos generales. Éstos tienen la propiedad de dejar en un estado de inconsciencia a la persona, y es un hecho que la anestesia puede ser inducida con un gran número de sustancias químicas que no poseen relación química entre sí. Para estudiar los efectos anestésicos, Hameroff observó que existen interacciones entre moléculas que son más débiles que las fuerzas químicas, una de estas se conoce como la fuerza de Van Der Waals. Esta fuerza es una atracción débil entre moléculas que tienen momentos dipolares eléctricos, como los dímeros de tubulina que conforman los microtúbulos (Hameroff, 1998).

La capacidad del dímero de "conmutar" de una conformación a la otra -polarizada o despolarizada- está influida por la fuerza de Van Der Waals. Con ello, se ha sugerido que los anestésicos generales pueden actuar a través de las interacciones de Van Der Waals en regiones donde el agua ha sido expulsada, interfiriendo así con las acciones conmutadoras de la tubulina. A medida que los gases anestésicos se funden entre células nerviosas individuales, sus propiedades dipolares eléctricas pueden interrumpir de este modo las acciones de los microtúbulos y desconectar la consciencia. Para apoyar esta idea, un paramecio, una ameba, o incluso el martillo verde de las ciénagas, es afectado de forma análoga por los anestésicos. Si se afirma que el sistema que controla un animal de este tipo es el citoesqueleto, entonces se tiene una imagen consistente de que el anestésico general actúa allí (Penrose, 1996; 2006).

Hay que ser claros en que no se está afirmando que estos seres sean conscientes, ese es un tema aparte, además de citoesqueletos funcionando adecuadamente, se necesita más para evocar un estado consciente. Lo importante de este punto, es que el estado de consciencia que se conoce en el ser humano, por ejemplo, requiere de los citoesqueletos activos y funcionando. Lo que este argumento proporciona es que no sólo es la organización o el desarrollo cortical del cerebro lo importante, los citoesqueletos son esenciales para la consciencia y si entendemos los fenómenos cuánticos a ese nivel, podríamos llegar a saber realmente en qué consiste realmente el estado consciente.

Recordemos la idea de Fröhlich de que un fenómeno cuántico colectivo a gran escala - quizá como un condensado Bose-Einstein- es una posibilidad biológica definida incluso dentro del cerebro caliente (Fröhlich, 1968a). La coherencia cuántica en los microtúbulos se llevaría a cabo a través de la excitación de las moléculas de tubulina que estaría acompañada por transiciones cuánticas de electrones. Puesto que en cada conformación de tubulina el cambio de formación molecular sería idéntico, las tubulinas que hacen parte del grupo de microtúbulos en una neurona, se encontrarían distribuidas en un momento dado en dos estados cuánticos diferentes. En cada uno de estos estados, todas las tubulinas compartirían un mismo nivel de energía, apareciendo la coherencia cuántica entre ellas (Frixione, 2007).

Cuando se ha llegado a este punto, los microtúbulos deben estar implicados en un estado cuántico coherente a gran escala, además, a través de los MAP, tal estado debería extenderse desde un microtúbulo al siguiente (Pastor, 2002), ya que estas propiedades cuánticas pueden "contagiarse" (Alemañ, 2011). En opinión de Hameroff y Penrose, a través de los MAP se formaría una red intracelular de microtúbulos coherentes que constituirían el primer nivel funcional en el sistema nervioso y la consciencia (Hameroff & Penrose, 1998).

En el caso de que este fenómeno efectivamente se presentara, la coherencia cuántica se vería favorecida por la estructura particular de los microtúbulos y las formaciones que constituyen. La geometría cilíndrica de cada uno de ellos, el arreglo helicoidal de su pared y la agrupación en paralelo interconectada a través de los MAP, representan un ordenamiento especial para promover oscilación cuántica coherente entre macromoléculas.

Por otra parte, se ha advertido que la cara interna de la pared del microtúbulo ofrece una superficie con propiedades aptas para una estructuración ordenada de moléculas de agua en su interior (Penrose, 1996). Así, compensando la temperatura cercana al cero absoluto necesaria para la coherencia, como ya se ha descrito, el interior del microtúbulo podría conformar una varilla de agua estructurada, semejante a una fibra de hielo cristalina (Frixione, 2007). Un dispositivo de este tipo, tendría la propiedad de convertir energía desordenada en energía coherente, como lo propone Fröhlich.

Así pues, cada microtúbulo sería capaz de oscilar sin dificultad en un mismo estado cuántico. Los vínculos laterales que proveen los MAP, servirían para promover la coherencia a través de todo el citoesqueleto de la neurona. Éstas a su vez producirían una actividad simultánea en varios tractos nerviosos o redes neurales específicas, que contribuirían a si mismo a ampliar la coherencia cuántica entre moléculas de tubulina en diferentes regiones del encéfalo (Frixione, 2007).

Si se observa con detenimiento, esta última parte se acerca más a la perspectiva neurofisiológica descrita por Llinás (2003) o Díaz (2008). De este modo, la dinámica cuántica de las tubulinas acoplada a vastas zonas del cerebro, estaría en superposición de estados coherentes originados en los microtúbulos, descriptibles por una sola función de onda, generando una unidad macroscópica que ayudaría a explicar el fenómeno de la consciencia. Penrose y Hameroff refieren que cuando la coherencia cuántica excede cierto nivel en función de energía, masa y tiempo se produce lo que ellos llaman "Reducción Objetiva Orquestada", debido a la propia gravedad cuántica del sistema -se recuerda que no hay una teoría cuántica de la gravedad por lo que es necesario constituir una nueva física para explicar este proceso- (Hameroff & Penrose, 1998).

La Reducción Objetiva Orquestada en la pared del microtúbulo, constituiría el elemento unitario para la experiencia consciente y daría lugar al surgimiento perceptible de la consciencia. Lo expuesto anteriormente es un tema fundamental y de sumo interés porque tiene que ver con el problema del "observador en la MC", pero no se tratará porque nos alejaría mucho de los objetivos de este texto.

Como si fueran pocos los requisitos dentro del mismo ambiente neuronal, la coherencia cuántica debe saltar la barrera sináptica entre neurona y neurona. A este respecto hay una clara dificultad, objeto de estudio y de debate, que indica que la sinapsis y el potencial de acción pueden destruir cualquier estado de coherencia cuántica si existiera (Koch & Klaus, 2006). Y esto sí que es un gran problema porque el cerebro lleva a cabo millones de sinapsis por segundo y es la forma en la cual trasmite la información.

El modelo además requiere que los cambios en las conformaciones de los dímeros de tubulina no perturben de forma significativa el material externo de la neurona. Para ello, se ha trabajado en modelos y métodos que puedan soportar una coherencia cuántica a gran escala a pesar del ruido propio de las sinapsis entre neuronas (Tuszynsky, et al., 2005). Para esto, Hameroff refiere que los microtúbulos poseen agua molecularmente organizada en el exterior, lo que brindaría otro aislante importante para la coherencia. Por otro lado Penrose defiende que los microtúbulos son sitios, que gracias a su estructura, permiten aislar lo que hay dentro de ellos del exterior (Hameroff y Persone, 1998; Penrose, 1996, 2006).

Resulta interesante pensar que la naturaleza ha escogido tubos huecos para algún buen propósito. Los microtúbulos son vacíos, solo poseen agua. Como ya se vio es un agua en un estado especial, altamente organizada, sus moléculas no están en movimiento aleatorio como el agua de los océanos; ésta organización se conoce como agua vicinal, y de este modo, el ambiente en los microtúbulos favorecería fuertemente la posibilidad de oscilaciones cuánticas coherentes en los tubos (Penrose, 1996). Por tanto, posiblemente, los tubos sirven para proporcionar el aislante efectivo que permitiría que el estado cuántico en el interior del tubo permanezca durante un tiempo apreciable sin enmarañarse con el entorno, además, el agua en el exterior de la neurona podría brindar un aislante adicional. Si se dan estas circunstancias, las funciones de ondas cuánticas permanecerían siendo válidas en un nivel macroscópico (Penrose, 1996) y se podrían desencadenar oscilaciones entre neuronas como las descritas por Llinás (2003).

Con lo visto hasta ahora, puede comentarse que el tipo de frecuencia que Fröhlich había imaginado para sus oscilaciones colectivas, apoyada por las observaciones de Grundler y Keilmann en 1983 en la región de frecuencias de 5×10^{10} Hz, es del mismo orden que la imaginada por Hameroff de los dímeros de tubulina. Así pues, si el mecanismo de Fröhlich es en realidad lo que está operando dentro de los microtúbulos, la teoría Penrose-Hameroff

brindaría una descripción de este estado cuántico explorado por Fröhlich, aunque trasladando esto a los microtúbulos. En este estado "La consciencia sería alguna manifestación de este estado citoesquelético interno cuánticamente enmarañado" (Penrose, 1996, p. 398).

En la visión clásica, el sistema de neuronas interconectadas u oscilando entre sí como ya revisamos, se vería influido por la actividad citoesquelética como manifestación de lo que conocemos como "libre albedrío". En consecuencia, el nivel neuronal de descripción que proporciona la imagen actualmente vigente del cerebro y la mente, sería una mera sombra del nivel más profundo donde debemos buscar las bases físicas de la mente, las neuronas serían básicamente amplificadoras de los fenómenos cuánticos subyacentes.

Por otra parte, la teoría este modelo cuántico de la consciencia utiliza un efecto que permitiría la sincronización de disparo y el procesamiento de la información que dan origen a la experiencia consciente. La tunelación cuántica, es un efecto que se da a través del fenómeno de indeterminación y que explicaría cómo varios miles de neuronas están habilitadas para coordinar simultáneamente su ritmo de disparo. En este ámbito, Crick (1994), describe que es necesario que las neuronas se enlacen para producir un disparo conjunto y sincrónico que dé como resultado las oscilaciones de 40Hz, que para Crick son la clave de la consciencia visual según los estudios que ha realizado. Además, Koch y Crick consideran que en procesos como la atención, es importante que no sólo exista una tasa media de disparos por neurona, sino momentos exactos en los que se dispara cada neurona, así, las neuronas asociadas se dispararían al mismo tiempo (Crick, 1994). Sin embargo él mismo refiere:

Hasta el momento, he dicho bien poco sobre posibles soluciones al problema del enlace: a cómo enlazar todas las neuronas que se disparan ante diferentes rasgos del mismo objeto... el enlace es importante porque parece necesario por lo menos para ciertos tipos de conciencia (Crick, 1994, p.303).

Por su parte, la tunelación cuántica explota la característica de indeterminación de la posición del electrón para producir las condiciones que, según refiere Crick, son necesarias para que se produzca la consciencia y las funciones cerebrales, tasa media de disparos y momento de disparo. Es decir, con la tunelación, la coherencia que se crea entre varias neuronas permitiría modular de manera armónica estos factores temporales que inquietan a Crick. La indeterminación refiere la posibilidad de que un electrón esté cerca del núcleo de átomo y con una probabilidad más baja que esté en los confines del sistema solar-se recuerda que la MC es probabilística-.

Así, con la incertidumbre presente en la naturaleza, el electrón aparenta saltar de una posición a otra. A diferencia del mundo clásico común a toda persona, en el mundo cuántico la materia existe sólo como una nube de probabilidades y existe una posibilidad alta de que esté en cierto sitio y una más baja de que este en otro. La "realidad" emerge cuando la ecuación de onda

usada para describir esas posibles ubicaciones, colapsa en un estado fijo, lo que la traslada a un evento clásico obedeciendo las leyes del movimiento de Newton (Stapp, 2009).

De acuerdo con este modelo, tal estado cuántico de posibilidades infinitas existe en las subunidades de tubulina de los microtúbulos en las neuronas y células de la glía, donde están asiladas de su entorno para evitar un colapso como resultado de una interacción entre ellas. Además, las proteínas y sus estados cuánticos asociados, están ligados a través de una tunelación cuántica que permite a las partículas superar las barreras de energía y espacio-tiempo. La consciencia ocurre cuando una serie de estados cuánticos conectados a través de las neuronas no pueden ser preservados mucho más e interactúan como una señal a la que el cerebro puede responder (Hameroff & Penrose, 1998). Este modelo explica la observación de que la consciencia parece implicar la coordinación simultánea de múltiples disparos neuronales como es planteado por Francis Crick y Christof Koch en su modelo.

Horizontes para la Neurobiología de la Consciencia en el Mundo Cuántico

Frente al modelo MC para la consciencia expuesto anteriormente, se pueden presentar numerosos estudios que dan apoyo a la teoría y que han enriquecido este marco teórico con investigaciones y nuevos elementos que resultan pertinentes para tal fin. Por mencionar algunos -llevaría todo un artículo revisar la gran cantidad de estudios que hay- se verá que son modelamientos que pueden representar algunas predicciones de la dinámica de los microtúbulos.

Cálculos en MC demostraron que las fuerzas y las cargas dipolares en la formación de microtúbulos y sus interacciones con otras proteínas, juegan un rol significativo en la coherencia cuántica (Tuszynski, et al., 2005) porque se ha encontrado que la coherencia pueda viajar mediante proteínas complejas como los MAP que conectan microtúbulos.

Otro estudio que incluyó los fenómenos de polimerización y despolimerización de las tubulinas, evidencia que los estados que se presentan en estas conformaciones se podrían tratar con una sola gran ecuación de onda, que contenga las propiedades de los estados de acuerdo con la coherencia oscilatoria (Bolterauer, Limbach, & Tuszynsky, 1999). Lo anterior en acuerdo con la condensación Bose-Einstein en que se podría describir un estado cuántico coherente con una sólo función de onda como si fuera un solo "objeto". Además, un estudio por medio simulación de dinámica molecular, refiere, basado en la estructura atómica recientemente obtenida de las tubulinas, que estas presentan evidencia que soporta el procesamiento cuántico de la información que según el modelo cuántico, ejecutan los microtúbulos (Hameroff & Tuszynsky, 2003).

Por otra parte, se realizó un modelamiento de los estados dinámicos de los dímeros de tubulina que componen los microtúbulos. Se exploró el comportamiento de los estados de tubulina, observando las fuerzas en la superficie de la tubulina y en las proteínas MAP de los microtúbulos adyacentes. Los resultados del modelo sugieren que algunas perturbaciones específicas generadas por la interacción de la tubulina con canales MAP vecinos, se pueden propagar a grandes distancias entre los microtúbulos adyacentes. Así, se encontró que la estructura MAP puede actuar como un guía de transmisión de onda de un microtúbulo al otro (Priel, Tuszynsky, & Woolf, 2005).

Usando otro modelo basado en la dinámica de los dímeros, se describieron las propiedades de la dinámica microscópica de los microtúbulos. Se hicieron predicciones sobre las relaciones de dispersión de la vibración y la velocidad de la propagación de la vibración. Las frecuencias vibratorias y las velocidades fueron expresadas como funciones de las constantes de las características geométricas de los microtúbulos. Con ello se mostró que las vibraciones que se propagan a lo largo de los protofilamentos son más rápidas que a través del helicoide (Portet, Tuszynsky, Hogue, & Dixon, 2005).

En otro aspecto, se investigaron las condiciones en los filamentos de actina del citoesqueleto para servir de transmisores eléctricos como parte de la coherencia cuántica. Se propuso un modelo donde cada monómero de actina tiene propiedades similares a las tubulinas. Basados en las leyes de Kirchhoff tomadas en límite continuo, se resolvieron ecuaciones no lineales para dos diferentes conformaciones de los monómeros. Se encontró que se podían producir y analizar ondas a través de los filamentos de actina que podrían hacer parte de la coherencia cuántica (Tuszynsky, Portet, Luxford, & Cantiello, 2004) -los filamentos de actina son otra parte del citoesqueleto como lo son los microtúbulos-.

A pesar del atractivo intrínseco de esta teoría novedosa y sugestiva, hay que tener en cuenta que este y los demás modelos cuánticos de la consciencia, son hasta ahora un buen modelo que se ha fundamentado en la teoría cuántica y en modelamientos computacionales como los descritos anteriormente. Hasta que no se cuente con herramientas metodológicas que confirmen sus predicciones por fuera de los modelos, no se puede dar como un hecho. Otra dificultad importante se puede encontrar en este modelo, deriva de que está basado en una física que ha tenido poco desarrollo, la MC en macromoléculas biológicas (Frixione, 2007). Unos primeros avances han podido demostrar la existencia de interferencias cuánticas en moléculas de C_{60} . Si esto se puede presentar, no existe razón dentro de las leyes de la física por la que no pueda verse en sistemas mucho mayores. Sería interesante hacer una exploración a este nivel y ampliar las perspectivas del estudio de la cuántica en moléculas (Zeilinger, 2009).

Lo anterior, está ligado al hecho de que los sistemas cuánticos son difíciles de analizar rigurosamente excepto en modelos idealizados. Además, los planteamientos cuánticos aplicados

a trillones de partículas que harían parte de los microtúbulos y las neuronas, muestran discrepancias entre los diferentes autores (Koch & Klaus, 2006). Incluso si estos efectos en los microtúbulos y en el cerebro fueran ciertos, actualmente sería difícil demostrar su existencia mediante experimentos concluyentes (Penrose, 2006). A pesar de los reportes de Fröhlich, intensas investigaciones en este marco de la biología no han documentado casos que aporten datos sin ambigüedades, por lo que se considera que científicamente este fenómeno no es un hecho (Reimers, et al., 2009) pero es una posibilidad física.

A pesar del inconveniente referido a la carencia de métodos de comprobación científicos, que verifiquen la existencia de las dinámicas cuánticas propuestas para los sistemas biológicos, hay que hacer la salvedad de que la teoría estándar y el modelo cosmológico de la Física han dejado ver que el Universo en muchos de sus aspectos está finamente ajustado y que las improbabilidades están presentes en gran parte del universo, la existencia misma del universo como se conoce es una improbabilidad (Barrow, 2009), pero aquí estamos.

Así, Hameroff refiere que los críticos de estas teorías no tienen un modelo mejor que explique la dinámica cerebral a nivel cuántico, ni un modelo que brinde respuestas satisfactorias a las múltiples preguntas sin resolver en el tema de la consciencia. Mientras que las descripciones y modelos que ofrecen los teóricos de la teoría cuántica de la consciencia, sí ofrecen respuestas satisfactorias a muchas preguntas irresueltas en las teorías neurocientíficas actuales (Penrose, 1996).

Por otro lado, otras objeciones a este modelo proceden de que no se tiene evidencia de que esta coherencia se pueda dar en el cerebro por factores como el ruido y la temperatura propias de este sistema. Al respecto se ha referido el físico Max Tegmark del MIT, quien trabaja en la teoría de universos paralelos y teoría de cuerdas y quien arguye que el cerebro es un ambiente muy caliente para que los efectos cuánticos ocurran y que los procesos de tunelación y oscilación cuántica coherente no están ocurriendo realmente en las neuronas, ya que se necesitarían temperaturas muy bajas para que se dé un estado coherente parecido a la superconductividad o condensado Bose-Einstein (Tegmark, 1999). Por otro lado, un estudio de Lagües en 1993 parece indicar la presencia de superconductividad a temperaturas siberianas. Aunque todavía muy baja para el nivel biológico, esto da respaldo a la idea de que podría haber efectos de coherencia cuántica en sistemas mucho más calientes que en los presentes en fenómenos de superconducción (Penrose, 1996), sin mencionar las observaciones de Fröhlich que ya han sido tratadas.

A todo esto, se suma lo referente a la necesidad de una nueva física. Como se vio en la descripción de la coherencia, el momento de consciencia se produciría cuando el estado cuántico no es capaz de mantenerse, cayendo ante el efecto de la gravedad cuántica. En la concepción del autor esta es la mayor limitación que presenta la teoría. El sueño de una física

unificada se puede remontar a Einstein quien en los últimos años de su vida intentó conseguir una teoría de campo unificado que incluyera la física cuántica y la relatividad general -no lo habría logrado porque todavía no se conocían las particularidades de la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte que hacen parte de las fuerzas del universo-.

Actualmente, básicamente hay dos teorías que trabajan en este objetivo, la teoría cuántica de bucles (Bojowald, 2010) y la teoría de cuerdas (Greene, 2001, 2010). Las opiniones están divididas sobre si se logrará a no la unificación de la Física en lo que se ha solido llamar "la teoría del todo" (Barrow, 2008). Ligado a estas propuestas de unificación de la Física, existen dificultades teóricas por las complicadas formulaciones matemáticas de ambas teorías y en el caso de la teoría de cuerdas, por ejemplo, se necesitaría explorar longitudes del tamaño de la longitud de Planck ($10^{-36}m$), lo cual no es posible en este momento, y para colmo se necesitarían aceleradores de partículas de tamaños estelares para comprobar muchas de las predicciones. Por tal motivo, por el momento no se puede hablar de una teoría que pueda proveer un modelo cuántico de la gravedad que pueda ser aplicado a la dinámica cerebral.

Aquí, es preciso referir que si se llegará a comprobar que tales fenómenos cuánticos no suceden en el cerebro, la ciencia también se construye con fracasos e intentos fallidos (Ynduráin, 2006). Por otra parte, el hecho de que las predicciones y las dinámicas descritas por los modelos cuánticos de la consciencia no se puedan develar por experimentación en este momento, no significa que la naturaleza no se haya servido de ellos para organizarse. Sería como asegurar que la naturaleza no había hecho de las suyas con la gravedad antes que fuera formalizada por la relatividad general de Einstein.

Para otros efectos, incluso en la teoría de la evolución, Hameroff ha hecho el intento de definir la relación entre complejidad y consciencia, dado que el fenómeno no existía al principio de la evolución y debió haber emergido en algún punto gradualmente o abruptamente, no se sabe (Penrose, 1996). Su explicación depende de algún grado de la teoría Penrose-Hameroff y postula que la consciencia surge en el límite entre los clásicos eventos estáticos, como las señales neurales que pueden ser reconocidas o procesadas como información y el proceso cuántico subyacente que las genera.

Se hace necesario que la neurociencia investigue o establezca campos de exploración que permitan incluir el modelo cuántico de la consciencia. En la academia actual solamente se utilizan los conceptos convencionales del mundo de la neurociencia, por lo que son los físicos los que han planteado estos modelos. La mecánica cuántica ha abierto nuevos caminos en muchas disciplinas del conocimiento y ayudará en un futuro a entender otros fenómenos y mecanismos. Además, si la MC es la base de la realidad, como algunos investigadores creen, no sería sorprendente que se viera envuelta en todo tipo de procesos biológicos como sensación y cognición (Hunter, 2006). Sería interesante que el campo de la neurociencia experimental

estableciera investigaciones propias en MC para desnudar un poco más el misterio de la consciencia, que a pesar de que está dentro de nosotros, aun no deslumbra los misterios de sí misma.

La consciencia es una característica sorprendente en el universo. Existe un sentido en el cual la física del universo debe implicar la existencia de la consciencia, si definimos la Física cómo la ciencia fundamental de lo que surge todo lo demás. Estas ideas de la MC son muy especulativas, pero es al menos concebible que pueden ayudar a explicar ciertos elementos del funcionamiento cognitivo humano (Chalmers, 1999). Si se tiene en cuenta, la perspectiva con la que se inició este texto, la consciencia debe estar gobernada por las leyes naturales y eventualmente podría existir una teoría razonable de ella, una teoría que pueda describir el microuniverso de la consciencia.

Referencias

- Albert, D., & Galchen, R. (2009). El principio de localidad. *Investigación y Ciencia*, 392, 14-21.
- Alemañ, R. (2011). *Física para Andrea*. Unión Europea: Editorial Laetoli, S. L.
- Barrow, J. D. (2009). *Teorías del todo*. Barcelona, España: Editorial Crítica, S. L.
- Bojowald, M. (2010). *Antes del Big Bang*. Bogotá, D.C.: Random House Mondadori, S.S. - Debate.
- Beck, F., & Eccles, J. (1992). Quantum aspects of brain activity and the role of consciousness. *Biophysics*, 89, 11357-11361.
- Bolterauer, H., Limbach, H., & Tuszynsky, J. (1999). Microtubules: strange inside the cell. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, (48), 285-295.
- Cairns-Smith, A. G. (2000). *La evolución de la mente*. Madrid, España: Cambridge University Press.
- Chalmers, D. (1999). *La mente consciente*. Barcelona, España: Editorial Gedisa.
- Crick, F. (1994). *La búsqueda científica del alma*. Madrid, España: Debate.
- Damasio, A. (2000). *Sentir lo que sucede: cuerpo y emoción en la fábrica de la consciencia*. Santiago de Chile: Editorial Andrés Bello.
- Damasio, A. (2010). *Y el cerebro creó al hombre*. Barcelona, España: Ediciones Destino.

- Diaz, J.L. (2008). *La consciencia viviente*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Frixione, E. (2007). Un modelo cuántico de la conciencia. En E. Frixione (Coor.), *Conciencia, nuevas perspectivas en torno a un viejo problema* (pp. 11-47). México, D.F.: Siglo XXI Editores.
- Fröhlich, H. (1968a). Long-range coherence and energy storage in biological systems. *International Journal of Quantum Chemistry*, 2, 641-649. doi:10.1002/qua.560020505
- Fröhlich, H. (1968b). Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes. *Physics Letters A*, 26 (9), 402-403
- Greene, B. (2010). *El tejido del cosmos*. Barcelona, España: Crítica.
- Greene, B. (2001). *El universo elegante*. Bogotá, D.C.: Editorial Crítica, S.L. - Editorial Planeta, S.A.
- Hacyan, S. (2003). *Del mundo cuántico al universo en expansión*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Hameroff, S. (1998). Anesthesia, consciousness and hydrophobic pockets—a unitary quantum hypothesis of anesthetic action. *Toxicology Letters*, 100, 31-39.
- Hameroff, S. R., & Penrose, R. (1998). Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: a model for consciousness. En S. R. Hameroff, A. W. Kasniak, & Scott, A. C. (Eds.), *Toward a science of consciousness II: The second Tucson discussions and debates* (pp. 507-540). Estados Unidos: Massachusetts Institute of Technology.
- Hameroff, S., & Tuszyński, J. (2003). Search for quantum and classical modes of information processing in microtubules: implications for "the living state". *Energy and Information Transfer in Biological Systems*, 31-62.
- Hunter, P. (2006). A quantum Leap in biology. *EMBO reports*, 7(10), 971-974.
- Hooft, G. (2008). *Partículas elementales*. Barcelona, España: Editorial Crítica.
- Kaku, M. (2004). *El universo de Einstein*. España: Antoni Bosch Editor, S.A.
- Kaku, M. (2009). *Física de lo imposible*. Bogotá, D.C.: Random House Mondadori, S.S.

- Kaku, M. (2011). *La Física del Futuro*. Bogotá, D.C.: Random House Mondadori, S.S. - Debate.
- Koch, C., & Greenfield, S. (2007). ¿Cómo surge la conciencia? *Investigación y Ciencia*, 375, 50-57.
- Koch, C., & Klaus, H. (2006). Quantum Mechanics in the brain. *Nature*, 440, 611-612.
- Llinás, R. (2003). *El cerebro y el mito del yo*. Bogotá, D.C.: Editorial Norma S.A.
- Pastor, J. (2002). Mecánica cuántica y cerebro: una revisión crítica. *Revista de Neurología*, 1 (35), 87-94.
- Penrose, R. (1996). *Sombras de la mente*. Barcelona, España: Editorial Crítica.
- Penrose, R. (2006). *Lo grande, lo pequeño y la mente humana*. Madrid, España: Ediciones Akak, S.A.
- Portet, S., Tuszynsky, J., Hogue, C., & Dixon, J. (2005). Elastic vibrations in seamless microtubules. *European Biophysics Journal*, 34 (7), 912-920.
- Priel, A., Tuszynsky, J., & Woolf, N. (2005). Transitions in microtubule C-termini conformations as a possible dendritic signaling phenomenon. *European Biophysics Journal*, 35 (1), 40-52.
- Reimers, J., McKemmish, L., McKenzie, R., Mark, A., & Hush, N. (2009). Weak, strong, and coherent regimes of Fröhlich condensation and their applications to Terahertz medicine and quantum consciousness. *PNAS*, 106 (11), 4219-4224.
- Schwartz, J., Stapp, H., & Beauregard, M. (2005). Quantum physics in neuroscience and psychology: a neurophysical model of mind-brain interaction. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 360, 1309-1327.
- Searle, J. (2006). *La mente una breve introducción*. Bogotá, D.C.: Grupo Editorial Norma.
- Stapp, H. P. (2009a). *Mind, Matter and quantum Mechanics*. Berlin, Alemania: Springer-Verlag.
- Tegmark, M. (1999). The importance of Quantum Decoherence in Brain Processes. *Physics Review*, 61, 4194-4206.
- Tapia, R. (2008). *Las células de la mente*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica

Tuszynsky, J., Brown, J., Crawford, E., Carpenter, E., Nip, M., Dicon, J., y otros. (2005). Molecular dynamics simulations of tubulin structure and calculations of electrostatic properties of microtubules. *Mathematical and Computer Modelling*, 41 (10), 1055-1070.

Tuszynsky, J., Portet, S. D., Luxford, C., &Cantiello, F. (2004).Ionic wave propagation along actin filaments. *Biophysical Journal*, 86 (4), 1890-1903.

Viljoen, N. (2009). Neural correlates of consciousness. *African Journal of Psychiatry*, 12 (4), 265-269.

Ynduráin, F. (2006). *Electrones, neutrinos y quarks*. Barcelona, España: Crítica.

Zeilinger, A. (2009). La realidad de los cuantos. *Investigación y Ciencia*, 393, 30-38.