

NOVEDADES CIENTÍFICAS EN 2015

EN FÍSICA

ASTROFÍSICA Y COSMOLOGÍA

Sin duda la noticia más importante del año 2015 fue la detección por primera vez de ondas gravitatorias. Aunque se hizo pública oficialmente en febrero de 2016, la detección real (la señal GW150914) tuvo lugar el día 4 de septiembre de 2015. Esta detección abre un nuevo campo para la astrofísica que permitirá obtener información hasta ahora inaccesible sobre la composición y evolución del universo.

La estructura del Universo está determinada por la materia oscura: está constituye aproximadamente el 80% del contenido total de materia (que a su vez es tan solo un 27% del contenido del Universo, siendo el 73% restante la energía oscura). Sin embargo, los modelos de universo con materia oscura predicen unos perfiles de densidad de materia ordinaria que no coinciden con los observados: en particular, debería haber muchas más galaxias enanas próximas a los centros de los cúmulos galácticos. Estas diferencias se han reducido ahora con el descubrimiento de muchas galaxias enanas con tan solo unos centenares o unos miles de estrellas. (arXiv: 1503.02584v2)

La propia composición de la materia oscura sigue siendo un misterio. Unos de los candidatos habituales a materia oscura eran las WIMP (*Weak Interactive Massive Particles*). Ahora se han propuesto modelos de materia oscura basados en SIMP (*Strong Interactive Massive Particles*), una especie de piones oscuros que interactúan y se aniquilan parcialmente dando partículas de materia ordinaria. La aniquilación sería menos probable a medida que el universo se expande, lo que justificaría también la escasez de galaxias enanas en el núcleo de los cúmulos. (Phys. Rev. Lett. 115, 021301)

Una teoría alternativa propone que la materia oscura interactúa con la materia ordinaria vía un quinta fuerza mediada por un axiÓN pseudoescalar de espín 0. Con esto se pretende explicar una variación estacional de

sucesos extraños detectada en el experimento DAMA (por DARK MATter), con un máximo en junio y un mínimo en diciembre, que correspondería a una especie de “viento” de materia oscura que vería la Tierra en su órbita alrededor del Sol. También se ha propuesto que esta señal periódica es debida a un flujo de muones solares. Sin embargo, casi ningún otro experimento con el mismo objetivo (con excepción de CoGeNT, *Coherent Germanium Neutrino Technology*) ha visto una señal parecida.

El descubrimiento por parte de Henrietta Leavitt de una relación entre el brillo y el periodo de estrellas variables fue clave para establecer una escala de distancias en astronomía. Muchas estrellas variables tienen dos frecuencias principales. Ahora se ha descubierto que algunas estrellas RRc Lyrae en las que la relación de frecuencias está próxima a la razón áurea se comportan como un atractor fractal no caótico (con una dinámica intermedia entre orden y caos). Es el primer objeto natural en que se ha observado este comportamiento. (Phys. Rev. Lett. 114, 054101)

La teoría de la nucleosíntesis primordial explica la formación de hidrógeno, helio y litio en los primeros minutos de vida del Universo tras el Big Bang. A medida que descendía la temperatura se formaban núcleos de deuterio, dos núcleos de deuterio se fusionaban para formar núcleos de helio y dos núcleos de helio se fusionaban para dar núcleos de berilio que posteriormente se desintegraban dando litio. Las predicciones que hace la teoría para las cantidades de hidrógeno y de helio coinciden muy bien con las observadas, pero la predicción para el litio primordial es aproximadamente el triple de la observada, lo que constituye el principal defecto de la teoría de la nucleosíntesis. Se ha propuesto una explicación mediante una modificación en la teoría de las cascadas electromagnéticas resultantes de colisiones entre electrones y fotones. Esto haría que los fotones tuvieran una energía mayor, lo que reduciría el ritmo de producción de berilio por fusión y, en consecuencia, la producción posterior de litio. (Phys. Rev. Lett. 114, 091101)

En 1995 se detectó 51 Pegasi b, el primer exoplaneta conocido, en la constelación de Pegaso, a unos 50 años-luz de la Tierra. Desde entonces se han detectado casi

5.000 exoplanetas. Los métodos habituales de detección eran por el movimiento oscilante de la estrella madre y por la reducción de su luminosidad durante los tránsitos del planeta. En 2015 se ha detectado directamente por primera vez, también en 51 Pegasi b, la luz reflejada en el planeta. Esto abre una nueva vía para la detección de planetas y la de sus posibles atmósferas. (Astronomy & Astrophysics 576, A134)

Hace ya casi un siglo que los astrónomos vienen detectando unas bandas interestelares difusas en la Vía Láctea y en otras galaxias. Hace veinte años se propuso que tales bandas eran debidas a la presencia de fullerenos C_{60} , lo que ha sido confirmado ahora gracias a estudios espectroscópicos detallados sobre estas moléculas. Parece así que los fullerenos son abundantes en el medio interestelar y que posiblemente se producen en estrellas moribundas que los expulsan al medio. (Nature 523, 322-323)

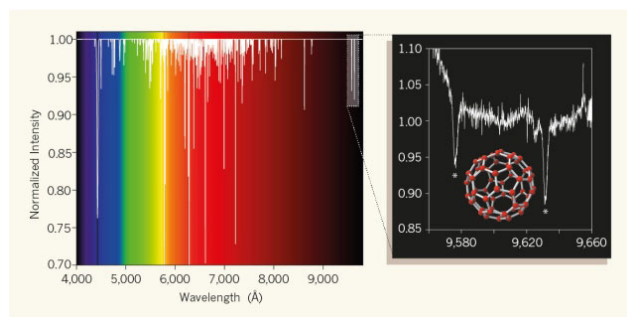


Figura 1. Espectros de absorción de fullerenos.

FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS

Un análisis de los datos combinados de los experimentos ATLAS y CMS en el LHC dan para el bosón de Higgs una masa de $125,09 + 0,32$ GeV. Aparte de por su contenido, el artículo que hacía público este resultado pasará a la historia de la ciencia por ser el artículo con más coautores de que hay noticia: 5.154 autores lo firman. (Phys. Rev. Lett. 114, 191803)

La mayoría de los hadrones son bariones, constituidos por tres quarks, o mesones, constituidos por un quark y un antiquark. No obstante, la cromodinámica cuántica permite otros tipos de partículas siempre que el número de quarks menos el de antiquarks sea múltiplo de tres. En particular, permite la existencia de partículas constituidas por cuatro quarks y un antiquark. Aunque las evidencias obtenidas hasta ahora eran ambiguas, recientes estudios en el LHC sobre la desintegración del barión $\Lambda(1405)$ han mostrado evidencia más concluyen-

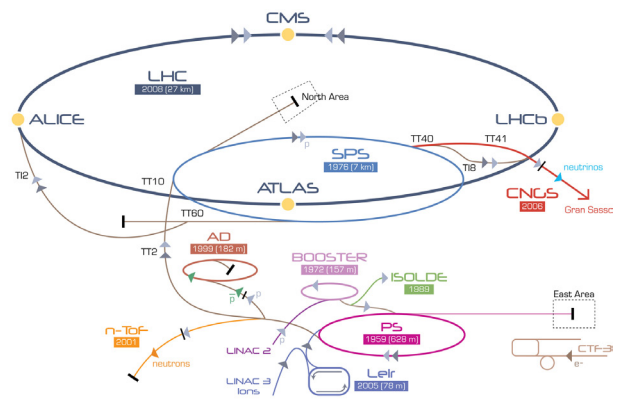


Figura 2. Esquema general de los aceleradores de partículas en el CERN.

te de la existencia de dos pentaquarks. (Phys. Rev. Lett. 115, 072001)

También algunos productos de la desintegración de la partícula $\Lambda(1710)$ han sido interpretados como glue-bolas, es decir, grupos de gluones que se mantienen unidos por pura interacción fuerte. (Phys. Rev. Lett. 115.131601)

Dos experimentos diferentes en el CERN han comprobado la coincidencia exacta de la relación carga-masa para deuterones y antideuterones y para núcleos de helio-3 y de antihelio-3. Esto es una prueba más a favor de la simetría CPT, que está en la base del Modelo Estándar. (Nature 524, 196-199)

Otra prueba más de la simetría CPT se ha obtenido en un experimento realizado en el Colisionador de Iones Pesados en Brookhaven, donde se ha medido por primera vez la interacción directa entre antiprotones, que es exactamente igual que la interacción entre protones. (Nature 527, 345-348)

No toda la investigación en el CERN se realiza en el LHC. En el Súper Protón Sincrotrón se ha medido la polarizabilidad de los piones con una precisión sin precedentes. Para ello se lanzan piones contra un blanco de níquel, lo que hace que se deformen. Los piones están constituidos por un quark y un antiquark ligados por interacción fuerte, por lo que su polarizabilidad da una medida fundamental de dicha interacción. (Phys. Rev. Lett. 114, 062002)

FÍSICA CUÁNTICA E INFORMACIÓN CUÁNTICA

Una teoría que admita las hipótesis de realismo y localidad debe satisfacer la desigualdad de Bell. Una forma particularmente simple de dicha desigualdad es la des-

igualdad de Clauser-Horne-Shimony-Holt para correlaciones entre pares de fotones, que en una teoría con realismo local debe ser menor que 2, pero que según la mecánica cuántica puede llegar hasta $2\sqrt{2} \approx 2,8284$, el llamado límite de Tsirelson. Un experimento reciente ha obtenido un valor de 2,82759, la mayor violación de las desigualdades encontrada hasta ahora y muy próxima a dicho límite. (Phys. Rev. Lett. 115,180408)

La violación de las desigualdades de Bell ha sido un resultado sistemático desde los primeros y ya clásicos experimentos de Aspect en los años 80 del siglo pasado. Sin embargo, siempre quedaban los llamados “loopholes” que podían dar lugar a una sobreestimación de las correlaciones reales. Dos de estos “loopholes” eran los de localidad y detección. Un experimento realizado en Holanda ha permitido cerrar estos dos “loopholes” simultáneamente. (Nature 526, 682-686)

En 1978 John Wheeler propuso hacer un experimento de interferencia en doble rendija con elección diferida; es decir, las rendijas se podían abrir o cerrar una vez que las partículas que podían atravesarlas ya habían salido de su fuente. De esta forma, si se aceptaba que las partículas tenían una trayectoria definida al salir de la fuente habría que aceptar también que las partículas ya tenían una “premonición” de qué rendijas iban a abrirse o cerrarse y con ello “ponerse de acuerdo” para dar o no figuras de interferencia. El experimento ya había sido realizado con fotones pero ahora se ha realizado por primera vez con partículas masivas; en concreto, átomos de helio. (Nature Physics 11, 539-542)

Menos conocida que la de Bell es la desigualdad de Leggett-Garg. Lo que esta desigualdad pretende poner a prueba es la hipótesis del macrorrealismo local, es decir, cuáles son los límites de masas y distancias entre objetos para los que es válido el principio de superposición. O, dicho de otra forma, cuándo puede determinarse unívocamente la posición de un objeto en un campo de fuerzas microscópico. Para ello se ha medido la correlación entre posiciones sucesivas de un átomo de cesio que realiza un camino aleatorio en un retículo óptico. Los resultados del experimento violan la desigualdad de Leggett-Garg y muestran que el átomo de cesio obedece las leyes de la mecánica cuántica basadas en el principio de superposición. Hay planes para repetir el experimento con partículas cada vez mayores. (Phys. Rev. X 5, 011003)

Dos consecuencias del principio de superposición en mecánica cuántica son la coherencia y el entrelazamiento. Ambos son conceptualmente diferentes: la coheren-

cia relaciona estados de un mismo sistema mientras que el entrelazamiento establece correlaciones entre dos sistemas diferentes. Pero ahora se ha encontrado que entre ambas hay una igualdad cuantitativa: cualquier cantidad de coherencia en un sistema puede convertirse en la misma cantidad de entrelazamiento entre dicho sistema y un segundo sistema inicialmente incoherente. (arXiv: 1502.05876)

En 1997 se teleportó experimentalmente por primera vez el espín de un fotón. Desde entonces se ha conseguido teleportar espines atómicos o campos coherentes pero siempre se trataba de propiedades individuales de un sistema. Para teleportar el estado cuántico completo de una partícula sería necesario teleportar varias propiedades simultáneamente. En 2015 se han teleportado por primera vez simultáneamente dos propiedades de una partícula: el espín de un fotón y su momento angular orbital. Ello obliga a entrelazar ocho fotones, lo que está en el límite de la tecnología actual. (Nature 518, 516-519)

Un modo habitual de transmitir información segura es utilizar la polarización de los fotones. Utilizando dos bases distintas, correspondientes a dos direcciones de polarización diferentes, compartidas por un emisor y un receptor, éstos pueden transmitirse información a salvo de posibles espías, pues cualquier intento de acceder a la información transmitida perturbaría el estado de los fotones y quedaría delatado. Pero esto sólo admite un bit de información por fotón. Una gran mejora se ha obtenido utilizando “luz retorcida” (*twisted light*) en la que

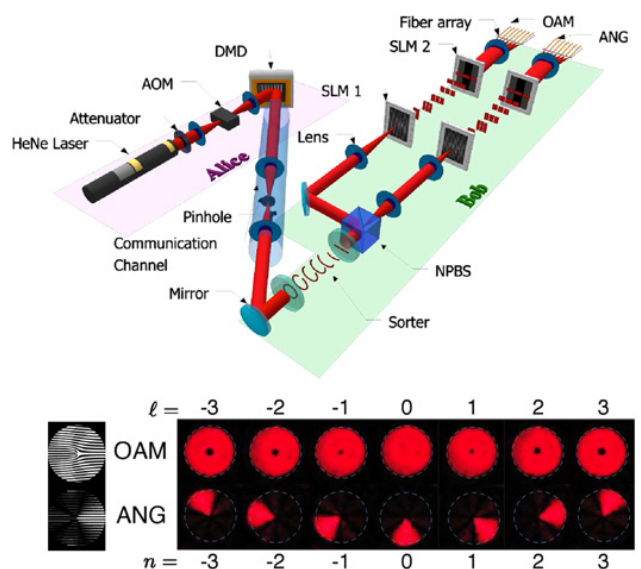


Figura 3. Transmisión cuántica de información mediante “luz retorcida”.

el momento angular orbital (OAM) y la posición azimutal de los fotones (ANG) son las dos bases utilizadas con la ventaja de que ahora se ha llegado a transmitir 2,05 bits por fotón, y se confía en poder llegar hasta 4,17 bits por fotón. Esto supone un importante ahorro tanto en el tiempo de transmisión como en el número de fotones necesarios para transmitir un mensaje. (New J. Phys. 17, 033033)

La computación cuántica requiere mantener durante el mayor tiempo posible la coherencia de los qubits que almacenan la información. Con este fin se pueden utilizar a veces como qubits los espines nucleares que están bastante aislados de su entorno. Pero ese mismo aislamiento hace difícil manipularlos para que actúen como componentes de puertas lógicas. En algunos casos esto se ha hecho mediante resonancia magnética nuclear, pero esto limita el número de qubits manejable. Ahora se ha abierto la posibilidad de interactuar con los núcleos a través de los electrones que los rodean, aprovechando la interacción hiperfina entre los espines electrónicos y nucleares. Un material particularmente interesante, con una gran interacción hiperfina, es el carbonato de manganeso. (Phys. Rev. Lett. 114, 226402)

Físicos británicos han diseñado un circuito óptico programable que puede realizar cualquier operación óptica lineal. El circuito está diseñado para ajustar en una pastilla de 15 centímetros y comprende 15 interferómetros y 30 desfases. Además, puede reprogramarse en milisegundos. Bautizado como procesador lineal universal o LPU (en analogía con CPU) puede ser la base de los futuros computadores ópticos. (DOI: 101126/scienceab.3642)

Por primera vez se ha construido una puerta lógica cuántica CNOT de silicio. Los qubits son puntos cuánticos de silicio creados mediante técnicas convencionales en semiconductores. Electrones atrapados en estos puntos cuánticos se acoplan mediante interacción de intercambio. Se confía en ampliar la tecnología para crear chips integrados. (Nature 526, 410-414)

CIENCIA DE MATERIALES

La superconductividad “ordinaria” se explica por la teoría BCS: los electrones se aparean a través de las vibraciones de la red cristalina; luego los pares forman un condensado que puede moverse por la red sin sufrir dispersiones. Hasta 2014 la mayor temperatura alcanzada en un superconductor de este tipo eran 39 K. Pero a fi-

nales de ese año investigadores alemanes encontraron que el sulfuro de hidrógeno (H_2S) sometido a presiones de unos 150 gigapascales era superconductor a 190 K, y poco más tarde se llegó a los 203 K. Al parecer esta superconductividad es también de tipo BCS y la alta temperatura está favorecida por la mayor frecuencia de los modos de vibración asociados a los átomos de hidrógeno. Los cálculos teóricos indican que se podría llegar a los 250 K, aunque efectos anarmónicos reducen la temperatura efectiva. También se predice que sustituyendo un 7,5% de los átomos de azufre por átomos de fósforo y aumentando la presión a 250 gigapascales podrían alcanzarse temperaturas críticas de 280 K. Cabe suponer que propiedades similares aparecerán en otros hidruros o compuestos de hidrógeno. (Phys. Rev. Lett. 114, 157004; Nature 524, 277)

En 1986 se descubrió que algunos óxidos de cobre dopados con tierras raras podían ser superconductores a 133 K a presión ambiente y a 164 K a alta presión, pero estos superconductores ya no obedecen a la teoría BCS y todavía no hay una explicación clara para ellos. Un descubrimiento reciente podría dar alguna pista. El titanato de estroncio es superconductor por debajo de 300 mK. Sin embargo, se ha observado que por encima de esa temperatura también hay apareamiento de electrones aunque, debido probablemente a la baja densidad electrónica, no se produce un condensado de pares que lleve a superconductividad. El mecanismo físico que produce el apareamiento es desconocido aunque podría estar ligado con la superconductividad a alta temperatura. (Nature 521, 196-199)

Una vía alternativa de búsqueda del mecanismo de apareamiento es la de simular los electrones que se mueven en un cristal por átomos que se mueven en un retículo óptico. Modificando los parámetros del retículo y las fuerzas que actúan sobre los átomos se han obtenido ya diferentes pautas de acoplamiento entre los espines de los átomos y se confía en llegar a ver un comportamiento colectivo análogo a la superconductividad. (DOI: 101126/scienceaa.7926)

Un modelo típico de fricción es el modelo de Frenkel-Kontorova. En este modelo la fricción entre dos superficies depende de la mayor o menor conmensurabilidad de los periodos espaciales de las dos superficies. Para poner a prueba este modelo y para estudiar en general la transición de fricción a superlubricidad se ha utilizado también un simulador basado en un retículo óptico. El dispositivo simula un objeto que se mueve sobre una

superficie por un cristal de Coulomb de iones, que simula el objeto móvil, y un campo luminoso periódico que actúa como sustrato. Cambiando la distribución espacial de la cadena de iones con respecto al periodo del retículo óptico se puede anular prácticamente la fuerza de fricción que actúa sobre la cadena. (Science 348, 1115-1118)

El grafeno, descubierto en 2004, ha sido desde entonces objeto de múltiples estudios y aplicaciones, aunque la ausencia de un gap en la banda electrónica y, en consecuencia, la imposibilidad de utilizarlo como semiconductor, limita sus aplicaciones en electrónica. Pero en la estela del grafeno, uno de los temas de investigación más atractivos en ciencia de materiales es la obtención de láminas 2D de diferentes materiales con importantes propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas. Así se han obtenido siliceno y germaneno, siempre crecidos sobre sustratos metálicos. También importantes son los dicalcogenuros de elementos de transición (TMDCs) que son láminas simples de metales de transición, como molibdeno o wolframio, entre capas delgadas de calcógenos, como azufre o selenio. Estas láminas 2D podrían apilarse en finas pastillas 3D que podrían combinar las propiedades de los diferentes materiales que las componen. (Nature 522, 274-276)

En 1984 se descubrió la existencia de los cuasicristales. A diferencia de los cristales normales en los que una celda unidad se repite invariablemente en todas las direcciones, los cuasicristales no presentan invariancia traslacional y su estructura no encaja en ninguno de los grupos cristalográficos permitidos. Por ello se pensaba que el crecimiento de los cuasicristales exige interacciones no locales entre los átomos, como si un átomo conociera por adelantado el potencial que va a afectar a átomos distantes, para las que no había explicación. Pero un registro del crecimiento de un cuasicristal mediante un microscopio electrónico de alta resolución ha mostrado que dicho crecimiento procede por error y reparación y no es necesario apelar a interacciones no locales. (Phys. Rev. Lett. 115, 075501)

Físicos australianos han construido una “metajaula óptica” que impide la entrada o salida de la luz pero deja pasar gases y líquidos. Los “barros” se simulan por hilos de 200 nanómetros de espesor hechos de arseniuro de galio y revestidos de plata y otra capa de arseniuro de galio. Según la separación entre los barros se pueden bloquear frecuencias definidas de la luz o todo un intervalo de frecuencias. Aunque las separaciones son pequeñas, similares al radio de los hilos, son suficientemente

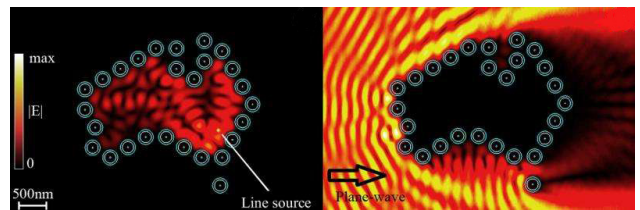


Figura 4. El mapa de Australia en una metajaula óptica.

grandes para dejar pasar moléculas de gases y líquidos, lo que hace estas metajaulas especialmente adecuadas para proteger microorganismos de la radiación aún permitiéndoles alimentarse de agua y nutrientes. (Phys. Rev. Lett. 115, 215501)

En 1929 Herman Weyl encontró una solución sin masa de la ecuación de Dirac. Un año más tarde, Pauli propuso la existencia del neutrino, que durante muchos años se consideró que podía ser la solución de Weyl. Pero esto quedó descartado al descubrir que el neutrino tiene masa. Ahora dos equipos diferentes han encontrado que los fermiones de Weyl existen como cuasipartículas en un cristal sintético de arseniuro de tántalo y también en un cristal fotónico hecho con tabletas de plástico con finos orificios adecuadamente dispuestos. Estas partículas se comportan como hipotéticos compuestos de monopolos y antimonopolos magnéticos. Debido a su masa nula y su alta movilidad, podrían tener importantes aplicaciones en electrónica. (DOI: 101126/science.aaa9297; 101126/science.aaa9273)

VARIOS

Se ha establecido un nuevo record de temperatura mínima al enfriar un conjunto de átomos de rubidio hasta 5×10^{-11} K, una temperatura diez veces menor que la más baja alcanzada hasta ahora. Partiendo de un conjunto de 100.000 átomos de rubidio, sus movimientos se frenan mediante luz láser que actúa con mayor intensidad sobre los átomos más rápidos. Se espera mejorar la técnica para llegar a milbillonésimas de kelvin. Estas técnicas de átomos ultrafríos son importantes para aumentar la sensibilidad de experimentos para medir efectos gravitatorios en escalas pequeñas o los límites de la teoría cuántica. (Phys. Rev. Lett. 114, 143004)

También se han conseguido temperaturas extremadamente bajas en moléculas. En este caso los procesos son más complicados pues hay que anular también los movimientos vibracionales y rotacionales de las moléculas. Lo que se ha hecho es enfriar primero gases de sodio y potasio y luego utilizar un campo magnético para que

átomos de sodio y potasio se combinen en moléculas débilmente ligadas (las llamadas resonancias de Feshbach) con momentos dipolares apreciables. Posteriormente se utilizan láseres para llevar estas moléculas al estado rotovibracional fundamental. La temperatura alcanzada esta vez es de 500 nanokelvin, pero se espera llegar a una temperatura diez veces menor, lo que permitiría producir y estudiar cristales dipolares cuánticos con propiedades exóticas. (Phys. Rev. Lett. 114, 205302)

Parece bien establecido que algunas especies de aves navegan por magneto-recepción, orientándose por el campo magnético terrestre. Que esto se base en un acoplamiento entre el campo magnético y espines electrónicos en algunos tejidos de las aves parece descartado ya que el ruido térmico lo anularía. Hace años ya se propuso un proceso cuántico por el que algunas aves podrían “medir” el campo magnético. Algunos pájaros como el petirrojo tienen moléculas magneto-receptoras en su sistema visual. Un fotón podría activar ciertas proteínas en la retina creando un estado singlete de dos electrones

que, posteriormente, se desintegra en un par en el que uno de los espines se transfiere a un aminoácido situado a cierta distancia a lo largo de la proteína. La teoría se ha completado ahora afirmando que los espines se mantienen aislados y coherentes durante más de 10 ns, y es esta coherencia la que posibilita la medida de la dirección del campo magnético, pues el decaimiento del par depende de la orientación de la proteína respecto al campo. (Phys. Rev. E 9, 022714)

Por otra parte, estudios más recientes han puesto de manifiesto que en la magneto-recepción interviene también la polarización de la luz: experimentos con aves en cautividad muestran que las aves se orientan bien cuando el eje de la luz polarizada es paralelo al campo magnético, mientras que se desorientan cuando el eje es perpendicular. (10 1073/pnas 1513391113)

J. Javier García Sanz
Dpto. de Física Fundamental