

Fluorescent bicolour sensor for low-background neutrinoless double β decay experiments

Nature 583, 48-54 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2431-5>

Iván Rivilla, Borja Aparicio, Juan M. Bueno, David Casanova, Claire Tonnelé, Zoraida Freixa, Pablo Herrero, Celia Rogero, José I. Miranda, Rosa M. Martínez-Ojeda, Francesc Monrabal, Beñat Olave, Thomas Schäfer, Pablo Artal, David Nygren, Fernando P. Cossío y Juan J. Gómez-Cadenas

Fernando P. Cossío, Donostia International Physics Center (DIPC), San Sebastián/Donostia, Spain. Department of Organic Chemistry I, University of the Basque Country (UPV/EHU), Centro de Innovación en Química Avanzada (ORFEO-CINQA), San Sebastián/Donostia, Spain.

Juan J. Gómez-Cadenas, Donostia International Physics Center (DIPC), San Sebastián/Donostia, Spain. Ikerbasque, Basque Foundation for Science, Bilbao, Spain.

¿Por qué nuestro universo está hecho de materia? ¿Por qué existe todo tal y como lo conocemos? Estas preguntas están relacionadas con uno de los problemas más importantes sin resolver en física de partículas. Dicho problema es el de la naturaleza del neutrino, que podría ser su propia antipartícula, tal como aventuró el malogrado genio italiano Ettore Majorana hace casi un siglo. Si ello fuera así, podría explicarse la misteriosa asimetría cósmica entre materia y antimateria.

En efecto, sabemos que el Universo está hecho casi exclusivamente de materia. Sin embargo, la teoría del Big Bang predice que el Universo primigenio contenía la misma cantidad de partículas de materia y antimateria. Esta predicción es consistente con los “pequeños Big Bang” que se forman en las colisiones de protones en el gigantesco acelerador LHC del CERN, donde siempre se observa una producción simétrica de partículas y antipartículas. ¿Dónde fue, entonces, a parar la antimateria del Universo temprano? Un posible mecanismo apunta a la existencia de neutrinos pesados que fueran su propia antipartícula y por lo tanto pudieran desintegrarse tanto a materia como a antimateria. Si se da un segundo fenómeno, denominado violación de carga y paridad (esto es, si el neutrino favorece ligeramente en sus desintegraciones la producción de materia sobre la de antimateria), entonces habría podido inyectar un exceso de la primera

sobre la segunda. Después de que toda la materia y la antimateria del universo se aniquilaran (con la excepción de este pequeño exceso), el resultado sería un cosmos hecho sólo de materia, de las sobras del Big Bang. Podríamos decir que nuestro universo son los restos de un naufragio.

Es posible demostrar que el neutrino es su propia antipartícula observando un raro tipo de proceso nuclear llamado desintegración doble beta sin neutrinos ($bb0\nu$), en el que simultáneamente dos neutrones (n) del núcleo se convierten en protones (p) y se emiten además dos electrones (e) que se escapan fuera del átomo. Este proceso puede darse en algunos isótopos raros, como el Xenón-136, que tiene en su núcleo 54 p y 82 n , además de 54 e en su forma neutra. El experimento NEXT (dirigido por J. J. Gómez-Cadenas, del DIPC e Ikerbasque y D. Nygren, de la Universidad de Texas en Arlington), sito en el laboratorio subterráneo de Canfranc (LSC), busca estas desintegraciones utilizando cámaras de gas a alta presión.

Cuando un átomo de Xe-136 sufre una desintegración espontánea de tipo $bb0\nu$, el resultado del proceso es la producción de un catión de Bario-136, con 54 e y un núcleo formado por 56 p y 80 n , y dos electrones ($Xe \rightarrow Ba^{2+} + 2e$). La desintegración buscada es extremadamente rara y la señal esperada del orden de

Los artículos reseñados en esta sección deben dirigirse directamente al editor: sierraor@ucm.es
El Comité Editorial de *Anales de Química* seleccionará las reseñas para su publicación

una desintegración $bb0\nu$ por tonelada de gas y año de exposición. Esta señal tan débil puede quedar completamente enmascarada por el ruido de fondo debido a la omnipresente radioactividad natural. Sin embargo, si además de observarse los dos electrones se detecta el átomo ionizado de bario, el ruido de fondo puede reducirse a cero, ya que la radioactividad natural no produce este ion. Observar un catión de Ba^{2+} en un gran detector de $bb0\nu$ es tan extremadamente difícil que hasta hace poco se consideraba impracticable. Pero una serie de trabajos recientes, entre los que destaca uno recientemente publicado (*Nature* **2020**, *583*, 48-54) demuestra que la hazaña podría conseguirse en un plazo de tiempo razonable.

El trabajo, concebido y dirigido por los investigadores Fernando P. Cossío, Catedrático de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) y director científico de Ikerbasque, y Juan J. Gómez-Cadenas, Profesor Ikerbasque del Donostia International Physics Center (DIPC), cuenta con un equipo que incluye científicos del DIPC, la UPV/EHU, Ikerbasque, el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Murcia (LOUM), el Centro de Física de Materiales (CFM, centro mixto CSIC-UPV/EHU), POLYMAT, y la Universidad de Texas en Arlington (UTA). Gómez-Cadenas destaca:

El resultado de esta colaboración interdisciplinar que combina entre otras disciplinas, física de partículas, química orgánica, física de superficies y óptica, es un claro ejemplo de la apuesta que recientemente ha hecho el DIPC por abrir nuevas líneas de investigación. El objetivo no es solo generar conocimiento en otros campos, distintos a los habituales del centro, sino también de buscar terrenos híbridos y crear proyectos interdisciplinares que, en muchas ocasiones, como esta, pueden ser los más originales.

El estudio parte de la idea, propuesta por uno de los autores del artículo, el prestigioso científico D. Nygren (UTA), inventor de tecnología de cámaras de proyección temporal (TPCs) en las que se basan numerosos experimentos de física de partículas (entre ellos NEXT). En 2016 Nygren propuso la posibilidad de capturar el Ba^{2+} con una molécula capaz de formar un complejo supramolecular con este y de proporcionar una señal característica cuando esto ocurre, a modo de indicador molecular. En trabajos posteriores, Nygren y su grupo han diseñado un tipo de indicadores llamados “interruptores” capaces de brillar más intensamente cuando capturan un ion Ba^{2+} .

El grupo de Cossío y Gómez-Cadenas ha seguido una estrategia diferente, diseñando un indicador capaz de capturar selectivamente el Ba^{2+} y que no sólo brilla más intensamente al atrapar el ion, sino que cambia de color (Figura 1), contribuyendo así a una clarísima observación de la señal sobre el ruido de fondo. El diseño se basa en un macrociclo de aza-éter corona y dos sistemas aromáticos (un sistema tetracíclico de benzo[*a*]imidazo[5,1,2-*cd*]indolizina y un fenilo para-sustituido) que, en presencia

del catión complejado con el éter corona, se desacoplan mediante una rotación del grupo *para*-fenileno debida a la coordinación entre el catión y el sistema pi. La síntesis de este indicador molecular bicolor, denominado FBI (las siglas en inglés de Fluorescent Bicolor Indicator), se ha realizado bajo el liderazgo del investigador Iván Rivila del DIPC y conlleva reacciones de doble adición, acoplamiento $C(sp^2)-N(sp^3)$ y cicloadiciones (8+2). Si se ilumina con luz ultravioleta una molécula FBI sin bario, esta emite fluorescencia en el rango de la luz verde, con un espectro de emisión estrecho de alrededor de 550 nm. En cambio, cuando esta molécula captura Ba^{2+} , su espectro de emisión se desplaza hacia el azul (420 nm). Esto hace posible identificar, prácticamente sin ruido de fondo, la presencia de Ba^{2+} a partir de la observación de una molécula FBI azul.

Es de destacar que los sistemas experimentales de microscopía multifotónica utilizados en el LOUM por el grupo de Pablo Artal para la detección espectral verde/azul se basan en los desarrollados previamente para obtener imágenes de la córnea del ojo humano en vivo. Es un ejemplo de entrelazado de uso de una tecnología única en el mundo para aplicaciones biomédicas en un problema fundamental de física de partículas.

Tal y como ha explicado Cossío:

Lo más complicado de la parte química del trabajo fue diseñar una nueva molécula que cumpliera los estrictos (casi imposibles) requisitos impuestos por el experimento NEXT. Esta molécula debía brillar mucho, capturar bario con extrema eficacia (el $bb0\nu$ es un evento rarísimo y ningún catión podía desperdiciarse) y emitir una señal específica que permitiera detectar la captura sin ruido de fondo. Además, la síntesis química del nuevo sensor FBI debía ser eficiente para poder tener muestras ultrapuras en cantidad suficiente para su instalación en el detector. La parte más gratificante fue comprobar que, tras muchos esfuerzos por parte de este equipo multidisciplinar, efectivamente, nuestro sensor FBI específico y ultrasensible funcionaba tal y como estaba previsto.

Además del diseño y caracterización de FBI, el artículo ofrece la primera demostración de la formación de complejos supramoleculares en medio seco. Este hito se ha conseguido preparando una capa de moléculas FBI sobre una pastilla comprimida de sílice y evaporando sobre esta capa una sal de perclorato de Bario. Zoraida Freixa, profesora Ikerbasque asegura: “la preparación de FBI sobre sílice ha sido una solución rápida para esta prueba de concepto. Un poco de alquimia casera nunca viene mal”. La evaporación en vacío ha sido realizada por la investigadora Celia Rogero del CFM y su estudiante de doctorado Pablo Herrero-Gómez. Rogero, una experta en física de superficies, asegura: “fue uno de esos momentos Eureka, cuando nos dimos cuenta de que disponíamos del *know-how* para demostrar por primera vez que una molécula es capaz de atrapar un dicatión en medio seco. Pusimos manos a la obra y salió bien casi al primer intento”.

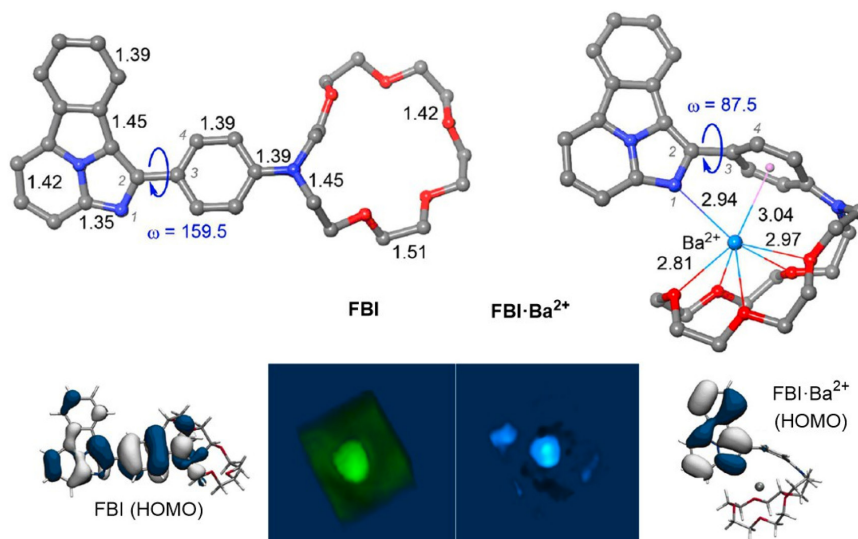


Figura 1. Estructuras del sensor fluorescente bicolor en estado libre (FBI) y coordinado con un catión bario (FBI·Ba²⁺). Se muestran también los HOMOs de ambos estados y la emisión fluorescente en una bifase silicagel-gas tras excitación a 250 nm

El siguiente paso de este proyecto será construir un detector basado en FBI, para lo que Gómez-Cadenas y Francesc Monrabal del DIPC junto a David Nygren y sus colaboradores de UTA ya están desarrollando la propuesta conceptual. Este futuro experimento, que podría estar en marcha en unos pocos años sería capaz de buscar sucesos $\bar{\nu}_\mu$ libres de ruido de fondo gracias a la identificación de los dos electrones y

el átomo de bario producidos en la reacción y tendría un gran potencial para descubrir si el neutrino es su propia antipartícula, lo que permitiría responder a preguntas fundamentales sobre el origen del Universo, incluyendo la de por qué estamos aquí.

Remitido por FERNANDO P. COSSÍO
(9 de diciembre de 2020)