

El resurgimiento del éter

Diego Alejandro Restrepo Quintero¹
Universidad de Antioquia

Resumen

La superconductividad electromagnética puede usarse como una analogía bastante precisa para aclarar muchos aspectos del mecanismo de Higgs en las interacciones débiles y entender la relevancia del descubrimiento de la nueva partícula encontrada recientemente en el Gran Acelerador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés). Dentro de un superconductor electromagnético la luz se propaga a través de un éter del que se conoce la composición y las propiedades. Este artículo contiene los resultados de los esfuerzos de divulgación asociados con el proyecto de Mediana Cuantía (CODI, Universidad de Antioquia): «Fenomenología de modelos supersimétricos con ruptura de paridad R y violación de número leptónico», con el fin de acercar los resultados del LHC a públicos más amplios.

Palabras clave: Mecanismo de Higgs, superconductividad, éter, relatividad, campos, ruptura espontánea de simetría.

The resurgence of ether

Abstract

Electromagnetic superconductivity may be used as a fairly accurate analogy to clarify many aspects of the Higgs mechanism in weak interactions and to understand the significance of new particle recently discovered in the Large Hadron Collider (LHC). In an electromagnetic superconductor, light propagates through a type of ether whose composition and properties are known. This article con-

¹ Doctor en Física de la Universidad de Valencia. Coordinador Grupo de investigación Fenomenología de Interacciones Fundamentales. Profesor de tiempo completo en el Instituto de Física de la Universidad de Antioquia. Correo electrónico: restrepo@udea.edu.co

tains the results of popular science efforts associated with the project "Phenomenology of supersymmetric models with broken R parity and lepton number violation" (sponsored by CODI-UdeA) in order to present the results of the LHC to a greater number of people.

Keywords: *Higgs, superconductivity, ether, relativity, fields, spontaneous symmetry breaking.*

Introducción

El universo en su totalidad puede entenderse como un enorme superconductor débil del que estamos comenzando a dilucidar las propiedades. Existe una analogía muy precisa entre el mecanismo de Higgs y la superconductividad a bajas temperaturas. No en vano el propio mecanismo de Higgs surgió de explorar esa analogía (ver el artículo de Dilia Portillo y José David Ruiz en la separaa de este número de la revista. El descubrimiento reciente de una partícula con las propiedades esperadas para la partícula de Higgs apunta al resurgimiento del concepto de un éter que permea todo el universo. Entenderemos por éter el medio necesario para que se propague algún tipo de onda. El desarrolló de la relatividad especial mostró que, bajo condiciones normales, la luz no necesita ningún medio para propagarse. Sin embargo, nuestro entendimiento actual de las interacciones débiles, una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza [1], responsable del decaimiento de los núcleos radiactivos, requiere la existencia de un éter para la propagación de las ondas débiles.

En este trabajo se explica cómo incluso el escurridizo éter lumínico ha encontrado cabida en algunos rincones muy especiales de la naturaleza, donde se ha logrado obtener la superconductividad electromagnética.

El éter lumínico

El éter lumínico surgió de la necesidad mecanicista de dotar al universo de un medio a través del cual se pudiesen propagar las ondas electromagnéticas. Esta visión del mundo quedó poco a poco reemplazada por la visión más simple de la relatividad especial, basada en el postulado de que las leyes de la física deben ser las mismas para todos los observadores que se muevan a una velocidad constante. Aunque en la formulación inicial de la relatividad especial no quedó para nada explícito, nuestro entendimiento actual de la naturaleza del espacio y el tiempo está estrechamente ligado a la existencia de una velocidad límite que no puede

ser superada por ningún cuerpo material ni por ningún tipo de información [2]. Una partícula sin masa viaja a dicha velocidad límite, independiente de la velocidad que tenga su observador. Asimismo, si se puede determinar con suficiente precisión que la velocidad de un cuerpo es la misma con independencia de la velocidad del observador, entonces necesariamente ese cuerpo debe viajar a la velocidad límite. La identificación de la velocidad límite con la velocidad de la luz es un resultado experimental sujeto a una constante verificación. Cualquier desviación experimental que se encuentre al respecto (mostrando por supuesto una velocidad inferior) podría ser una evidencia de que las partículas que componen la luz tienen alguna masa.

Como la masa ha resultado ser un concepto emergente en la física moderna, la posibilidad de que las partículas que componen la luz tengan o no masa depende de la interacción de dichas partículas con el medio en que se propagan. Contrario a lo que se suele establecer usualmente, el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley [3] no implica que no existe un éter; implica que si existe un éter, la luz no interacciona con él. La presencia de otros tipos de luz, asociados con interacciones diferentes a la electromagnética, podría hacer manifiesta la presencia de ese éter. Aún más, la existencia misma de un éter lumínico podría manifestarse bajo otras condiciones diferentes a las usuales, como, por ejemplo, a temperaturas cercanas al cero absoluto y dentro de cierto tipo de materiales.

De hecho, el resurgimiento del éter sucedió casi de inmediato con el descubrimiento de la superconductividad electromagnética en 1911. La superconductividad electromagnética es la desaparición de la resistencia eléctrica que ocurre en algunos materiales cuando se disminuye su temperatura por debajo de algún valor crítico. La conducción de corriente eléctrica a través de un alambre superconductor es mucho más eficiente y permite generar campos magnéticos mucho más intensos que los que se obtendrían con materiales conductores convencionales a partir de la misma can-

tividad de energía. Además, un material superconductor tiene la propiedad de repeler los campos magnéticos externos a él. El piso de un vagón repleto de pasajeros hecho de un material superconductor puede levitar sobre rieles imantados, como ocurre con los trenes de levitación magnética del tipo JR-Maglev en Japón [4].

Entender la superconductividad no fue inmediato porque es un proceso mecánico cuántico en que convergen muchos conceptos teóricos desarrollados posteriormente. Un sistema cuántico como un núcleo, un átomo, una molécula, etc., tiene niveles de energía discretos que pueden ser ocupados secuencialmente dependiendo de si las partículas que interactúan con el sistema son bosones o fermiones. Los fermiones tienen una cantidad de movimiento angular intrínseco, llamado *espín*, en unidades semienteras de la constante de Planck reducida, denotada como \hbar (la cual caracteriza los fenómenos cuánticos). Los bosones, por otra parte, tienen espín en unidades enteras de \hbar . La contraparte clásica del espín corresponde a la cantidad de movimiento angular de una esfera en rotación sobre un eje, determinada por el producto entre su momento de inercia y su velocidad angular.²

La forma en que los fermiones pueden ocupar los niveles de energía está restringida por el principio de exclusión de Pauli, que establece que un mismo nivel de energía no puede ser ocupado por dos o más fermiones con los mismos números cuánticos. El fermión más simple es el electrón, que tiene como números cuánticos la carga eléctrica (de menos uno en unidades de la propia carga del electrón) y el espín, que puede ser $\hbar/2$ o $-\hbar/2$. El nivel de energía fundamental de un átomo de Helio puede ser ocupado a lo sumo por dos electrones de espines opuestos. Siguiendo toda la secuencia de átomos, el principio de exclusión de Pauli permite explicar la estructura de la tabla periódica de los elementos químicos.

Se ha logrado establecer que un metal está conformado por una estructura cristalina, la cual también exhibe niveles de energía cuánticos cerca de su superficie. Los electrones de valencia de cada átomo, es decir, los electrones del último nivel de energía atómico pueden ocupar los niveles de energía del cristal moviéndose a través de toda su superficie. El movimiento colectivo de los electrones de valencia se comporta como un fluido de cierta profundidad que se llama mar

de Fermi. Como en el mar, las profundidades son tranquilas y toda la actividad sucede en la superficie del mar de Fermi. Un rayo de luz puede viajar a través del mar de Fermi sin prácticamente interactuar con él, manteniendo una velocidad muy cercana a la velocidad límite de la relatividad especial.

Es bien conocido que dos cargas eléctricas de signos opuestos se atraen, mientras que cargas del mismo signo se repelen. Sin embargo, cuando un metal se enfría por debajo de una temperatura crítica, puede ocurrir el fenómeno sorprendente de que dos electrones se puedan atraer entre sí. A bajas temperaturas, las oscilaciones de la estructura cristalina se estabilizan y los átomos del metal empiezan a ocupar posiciones bastante fijas en el espacio. Cada átomo del metal es visto por un electrón de valencia como un ión de carga positiva. Como resultado, el electrón atrae a los átomos circundantes creando una acumulación de carga positiva alrededor de él, como se muestra en la Figura 1 (a), adaptada de [5]. En la Figura 1 (b) se muestra el efecto de polarización de la red cristalina, que corresponde a una acumulación de carga positiva alrededor del punto donde se encuentra el electrón de valencia. Cuando otro electrón de valencia se acerca a la zona polarizada por el primer electrón, siente una atracción neta hacia ese sitio. El efecto total es que dos electrones de espines opuestos se pueden atraer lo suficiente como para formar un estado ligado que se denomina par de Cooper. Al estar formado por pares de electrones de espines opuestos, el espín del par de Cooper es cero y corresponde a un bosón que ya no está restringido por el principio de exclusión de Pauli. El par de Cooper entonces se puede sumergir en las profundidades del mar de Fermi hasta ocupar el nivel de energía fundamental. Al final, después que todos los electrones de valencia se han apareado, todos ellos se condensan en el nivel de energía fundamental.

Este tipo de condensados de bosones, que ocurren por debajo de una cierta temperatura crítica, tiene todas las características de un éter lumínico: cuando la luz se propaga a través del condensado adquiere una masa emergente que hace que su velocidad sea menor que la velocidad límite de la relatividad especial. Esta nueva velocidad ya sí depende de la velocidad del observador que la mida. Si se pudiese repetir el experimento de Michelson y Morley dentro de un superconductor, ¿daría un resultado positivo!

2 El momento de inercia de una esfera uniforme de radio R y masa M, alrededor de un eje que pasa por su centro, es $2MR^2/5$. El espín de la tierra es del orden de $10^{67}\hbar$.



Figura 1. En (a) los círculos con líneas a trazos representan las posiciones originales de los iones positivos en el cristal. Debido a la presencia del electrón de valencia, el cristal se polariza y se genera un exceso de carga positiva alrededor del electrón que resulta entonces apantallado. En (b) se muestra cómo el exceso de carga positiva puede causar un efecto de atracción sobre otro electrón de valencia, lo que permite la formación de un par de Cooper.

Pero ¿cómo es posible que un fotón adquiriera inercia? En el tiempo en que Clerk Maxwell estableció las ecuaciones del electromagnetismo, ya se conocía la Ley de Faraday, que establece que los campos eléctricos en movimiento (las corrientes eléctricas) producen campos magnéticos. Usando principios de simetría, Maxwell completó las leyes electromagnéticas prediciendo que los campos magnéticos en movimiento producen también campos eléctricos. Como los campos eléctricos en movimiento producen campos magnéticos en movimiento, que a su vez producen de nuevo campos eléctricos en movimiento, entonces se genera un movimiento ondulatorio y las ecuaciones de Maxwell automáticamente predicen la existencia de ondas electromagnéticas. Una consecuencia inmediata es que la luz visible es simplemente un tipo especial de onda electromagnética en un rango de frecuencias determinado. Una onda electromagnética se puede representar entonces con un vector oscilante que representa el campo magnético, asociado con otro vector oscilante y perpendicular de campo eléctrico. La luz se propaga a la velocidad límite de la relatividad especial en una dirección perpendicular al plano definido por los dos vectores, como se ilustra en la Figura 2 (a). Cuando la onda electromagnética se propaga dentro de un condensado sobre la superficie de un superconductor, una componente del par de Cooper se puede acoplar a los vectores magnético y eléctrico en la dirección de propagación de la onda, causando un efecto de frenado.

En el lenguaje de la ruptura espontánea de simetría, que explica la formación del condensado por

debajo de una temperatura crítica, se dice que el fotón se come una componente del par de Cooper para así adquirir masa, como se muestra en la Figura 2 (b). Una vez que la luz adquiere masa, las interacciones electromagnéticas se convierten en interacciones de rango finito. Es decir, que a partir de cierta separación entre las cargas eléctricas dentro de un superconductor desaparecen las fuerzas eléctricas entre ellas. Aunque cuantitativamente estos efectos son pequeños, pues la masa del fotón dentro de un superconductor es del orden de una billonésima de electrón-voltio (similar a las masas de neutrinos, [5]), cualitativamente el comportamiento cambia drásticamente: se pasa de una interacción de rango infinito mediada por fotones de masa cero a una interacción de alcance restringido mediada por fotones masivos.

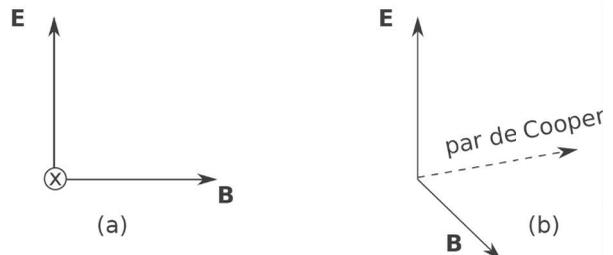


Figura 2. En (a) se representan los campos eléctricos y magnéticos de una onda electromagnética que se propaga a la velocidad de la luz en la dirección de entrada a la hoja. En (b) se muestra una onda electromagnética propagándose dentro de un condensado de pares de Cooper, en la dirección de la componente ilustrada del par de Cooper.

Cuando se calienta un superconductor metálico por encima de su temperatura crítica, correspondiente a unos pocos grados kelvin sobre el cero absoluto, todo vuelve a la normalidad. El estado no superconductor es más simétrico porque los electrones del mar de Fermi están orientados en todas direcciones. El estado superconductor representa un estado menos simétrico pues todos los pares de Cooper están orientados formando un estado coherente en una dirección específica del espacio. Al formarse el condensado se da un fenómeno de ruptura espontánea de la simetría: las simetrías iniciales que describen las interacciones del sistema se mantienen, pero el estado fundamental rompe la simetría.

El éter electrodébil

El electromagnetismo es la interacción mejor conocida de las cuatro interacciones fundamentales [1]. Las interacciones fundamentales entre partículas están mediadas por un cierto conjunto de bosones. Es así como la interacción electromagnética entre partículas cargadas está mediada por los fotones. La interacción fuerte, que mantiene unidos de forma estable los componentes de los núcleos atómicos, está mediada por los gluones, los cuales tampoco requieren un medio para propagarse. La fuerza fuerte es en muchos otros aspectos similar a la fuerza electromagnética.

Sin embargo, las interacciones débiles han resultado ser fuerzas de corto alcance, mediadas por unas partículas llamadas W y Z , similares a los fotones que constituyen las ondas electromagnéticas, pero bastante masivas: del orden de cien veces la masa del protón. La pregunta de si las masas del W y el Z son reales o emergentes se reduce a descubrir la existencia del éter, a través del cual se propagan esas nuevas ondas débiles. Dicho éter está formado por un condensado de varias componentes. Aunque no podemos acceder directamente a los componentes del condensado, comidos por el W y el Z para adquirir masa, existe al menos otro componente del condensado que se debe materializar como partícula independiente y nueva: la partícula de Higgs.

Si se confirmara que la partícula recientemente descubierta en el Gran Acelerador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés) corresponde a la partícula de Higgs, significaría nada más y nada menos que el uni-

verso se encuentra en un estado de superconductividad débil (*superconductividad electrodébil*, para ser más exactos). El universo en su totalidad es un superconductor en el sentido de que las partículas que solo tienen cargas débiles, como los neutrinos, viajan por la materia sin mayor resistencia. De hecho, nuestro cuerpo, incluso el planeta entero, está siendo atravesado constantemente por neutrinos.³ Para hallar las excitaciones del éter débil, correspondientes a la partícula de Higgs, debemos calentar al menos una porción del universo por encima de la temperatura crítica de la ruptura espontánea de simetría electrodébil, estimada en un cuadrillón de grados kelvin (10^{15} K). Eso es precisamente lo que se está haciendo el LHC en los puntos de colisión de los detectores ATLAS y CMS [6], de donde al parecer están emergiendo las primeras partículas de Higgs.

A modo de conclusión

Hemos visto que, a diferencia de las ondas electromagnéticas, las ondas débiles necesitan un medio para propagarse. ¿Pero cuál es la sustancia que constituye el éter débil? El éter débil es un condensado del *campo* del Higgs. El concepto de campo es central en toda la física moderna, pero es de difícil asimilación por parte del público general, sobre todo porque es difícil aceptar la realidad de algo que usualmente es intangible (para un artículo de revisión al respecto, cf. [7]). Ejemplos como un campo magnético llenando el espacio entre un imán y un superconductor muestran la realidad física de un campo. El descubrimiento de la nueva partícula en el LHC podría implicar la existencia de un campo de Higgs que permea todo el espacio y hace emerger las masas de las partículas elementales que conforman el universo, resucitando la idea de un éter, pero de una forma cuántica y relativista.

Referencias bibliográficas

[1] Un buen sitio divulgativo sobre partículas e interacciones fundamentales con versión en español es <http://particleadventure.org>. Fecha de consulta: 20 de agosto de 2012. Un buen libro al respecto en español: *La simetría y la belleza del Universo* (2008), de Leon Lederman y Christopher Hill y editado por Tusquets Editores. ISBN: 1591025753, New York.

3 Y por las supuestas partículas de materia oscura débilmente interactuantes, a pesar de que aún no hayan dejado trazas ni siquiera en los diversos experimentos de detección directa instalados en varios laboratorios subterráneos de la tierra.

[2] Un artículo reciente donde se revisa y explica la necesidad pedagógica de enseñar la relatividad especial sin hacer referencia a la velocidad de la luz es: Zurab K. Silagadze, «Relativity without tears»: Acta Phys. Polon. B39: 811-885 (2008) [ar-Xiv: 0708.0929 [physics.ed-ph]]. Ver también la parte de relatividad de mi curso en: <http://fisica.udea.edu.co/cursos> (Mecánica).

[3] Cf. por ejemplo http://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Michelson_y_Morley. Fecha de consulta: 20 de agosto de 2012. Cf. también el capítulo 11 de *An Introduction to Mechanics* (2010), de Daniel Kleppner y Robert J. Kolenkow, editado por Cambridge University Press, New York.

[4] Railway Technical Research Institute, Japan. Cf. http://www.rtri.or.jp/eng/rtri/rtri05_maglev_E.html. Fecha de consulta: 20 de agosto de 2012.

[5] DIXON, Lance (1996). «From Superconductors to Supercolliders». En: *Beam line*, Vol. 26, N° 1, pp. 23-30. Cf. <http://www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/26/1/26-1-dixon.pdf>. Los conceptos y explicaciones de este artículo divulgativo fueron de mucha ayuda en la elaboración de este trabajo.

[6] Quarknet es un proyecto divulgativo sobre la física del LHC dirigido a estudiantes de educación media. Cf. <http://quarknet.fnal.gov/>. Una explicación divulgativa de la física del LHC se puede encontrar en *Understanding the Universe* (2004), de Don Lincoln, editado por World Scientific en Singapur.

[7] LLANCAQUEO, Alfonso, CABALLERO, M. Concesa y MOREIRA, Marco Antonio (2003). «El concepto de campo en el aprendizaje de la Física y en la investigación en educación en ciencias». En: *Revista electrónica de enseñanza de las ciencias*, Vol. 2, N° 3, pp. 227-253. Vigo, España.



FACULTAD DE EDUCACIÓN

Artículo recibido 15-10-2012 Aprobado 15-11-2012