



spinor

Dos facetas, información y divulgación
un solo objetivo, comunicar

La física de
partículas



Índice

Presentación	1
La audaz e inquietante vida del físico experimental de altas energías A. Fernández Téllez, M. I. Martínez Hernández, M. Rodríguez Cahuantzi y G. Tejeda Muñoz	2
Una década con el bosón de Higgs J. Lorenzo Díaz Cruz	8
El modelo estándar de las partículas elementales G. Tavares Velasco	14
Historia y temas actuales de física de neutrinos A. Bolaños y O. G. Miranda	19
Explorando el pasado, descubriendo al plasma de quarks y gluones D. Maya Sánchez y M. Rodríguez Cahuantzi	23
¡No es un problema de familia... sino de sabor! O. Félix-Beltrán, E. Barradas-Guevara, F. González-Canales y M. Zeleny-Mora	28
Neutrinos más allá del modelo estándar H. Novales Sánchez y M. Salinas Ibáñez	31
El Mecanismo de Higgs: materia oscura y evolución del universo J. Hernández-Sánchez	34



spinor

Dos facetas, información y divulgación
un solo objetivo, comunicar

Revista de la Vicerrectoría de Investigación
y Estudios de Posgrado

Dra. Ma. Lilia Cedillo Ramírez

Rectora

Mtro. José Manuel Alonso Orozco

Secretaría General

D. C. Ygnacio Martínez Laguna

Vicerrector de Investigación y Estudios de Posgrado

Dra. Yadira Navarro Rangel

Directora General de Estudios de Posgrado

Dra. Ma. Verónica del Rosario Hernández Huesca

Director General de Investigación

Dr. Arturo Fernández Téllez

Director General de Divulgación Científica

Investigación y revisión:

Dra. Karen Salomé Caballero Mora

Dr. Raúl Mújica García

Dirección de la revista:

Dr. Arturo Fernández Téllez

Consejo Editorial:

Dra. María Eugenia Mendoza Álvarez, Dr. Martín Rodolfo Palomino Merino, Dr. Gilberto Tavares Velasco, Dra. Olga Félix Beltrán

Diseño:

Israel Hernández / El Errante Editor

SPINOR, año 12, núm. 45, noviembre-diciembre de 2022, es una publicación bimestral editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 sur 104, Col. Centro, C.P. 72000, Puebla Pue., y distribuida a través de la Dirección de Divulgación Científica de la VIEP, con domicilio en Torre de Gestión Académica y Servicios Administrativos, 6° Nivel, Avenida Central, Ciudad Universitaria, C. P. 72570, Puebla Pue., Tel. (52) (222) 2295500 ext. 5729, www.viep.buap.mx, revistaspinor@gmail.com, Editor responsable: Dr. Arturo Fernández Téllez, arturo.fernandez@correo.buap.mx. Reserva de Derechos al uso exclusivo 04-2017-062916010700-102. ISSN: (en trámite), ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Con Número de Certificado de Licitud de Título y Contenido: (16523), otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa en EL ERRANTE EDITOR S.A. DE C.V., Privada Emiliano Zapata No. 5947, Col. San Baltasar Campeche, Puebla, Pue, C.P. 72590, Tel. (222) 4047360, este número se terminó de imprimir en julio de 2019 con un tiraje de 3000 ejemplares. Ejemplar gratuito

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Presentación

La física de partículas o altas energías es una de las ramas de la física más fascinante, tanto en el área teórica como experimental. El deseo que el ser humano ha tenido por desentrañar los misterios del universo que nos rodea le ha acompañado desde que tuvo uso de razón. Podemos decir que la física de partículas se desarrolló a partir de las siguientes interrogantes: ¿Cuáles son los bloques fundamentales o partículas elementales que componen la materia? ¿Por cuál mecanismo operan las fuerzas sobre las partículas elementales para dar lugar a los fenómenos que ocurren en nuestro entorno?

Quienes nos hemos adentrado en el estudio de esta área quedamos seducidos por los retos que se plantean ante nuestro intelecto, a partir del marco teórico que durante décadas han desarrollado las mentes más brillantes de la humanidad. Y qué decir de la fascinación que sentimos por los hallazgos experimentales y los avances tecnológicos que se han alcanzado para responder a las interrogantes que presenta la física de partículas.

En el campo teórico, tomó décadas de estudio construir una teoría que lograra concatenar los hallazgos experimentales difundidos hasta ahora. Esta teoría se conoce como modelo estándar de las partículas elementales, y es una de las más extraordinarias que se han desplegado. Sin embargo, no es del todo satisfactoria, por lo cual aún quedan retos por enfrentar para tener una teoría final de las partículas elementales.

En el campo experimental, la física de partículas ha sido un campo fértil para el talento de los físicos experimentales e ingenieros dedicados a elaborar complicadas investigaciones. Ello abarca desde el estudio de los rayos cósmicos en globos aerostáticos a los experimentos multimillonarios con colisiones de protones y iones pesados realizados en el literalmente gran colisionador de hadrones (LHC) del CERN.

Esta edición especial de la revista Spinor está dedicada a presentar contribuciones selectas a la historia, el desarrollo y la actualidad de la física de altas energías. Aunque hubiéramos deseado cubrir un amplio espectro de esta área de la física, el espacio es limitado y aún hay temas que podrían presentarse en una edición venidera. Sin embargo, esperamos despertar el interés y la pasión del lector por conocer más sobre esta rama de la ciencia.

Esta edición contiene ocho contribuciones de distinguidos profesores de nuestra Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y de reconocidos egresados de las aulas de esta universidad.

Dr. Gilberto Tavares Velasco
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

La audaz e inquietante vida del físico experimental de altas energías

A. Fernández Téllez
M. I. Martínez Hernández
M. Rodríguez Cahuantzi
G. Tejeda Muñoz

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas,
BUAP

Motivos, propuestas, metas

El físico experimental diseña y lleva a cabo experimentos que permiten corroborar hipótesis científicas o indagar en ámbitos completamente desconocidos. En muchas ocasiones, los planteamientos conducen a la frontera del conocimiento básico de la naturaleza y, frecuentemente, generan innovaciones tecnológicas que, después de varios años, se convierten en instrumentos de uso diario. En el caso particular de los físicos que dedican sus esfuerzos a desarrollar la física experimental de altas energías, la audacia de sus proyectos los lleva a convocar a grupos multidisciplinarios nacionales o internacionales para conseguir metas ambiciosas que, a menudo, rompen las barreras de lo establecido.

Además, suele suceder que estos físicos se atreven a proponer aplicaciones tecnológicas que pueden tener impacto en el ámbito social. Hoy en día, sus planteamientos

suponen sumas importantes de recursos que deben ser obtenidos en tiempos relativamente cortos, por lo cual la vida de los líderes de estos proyectos científicos resulta altamente inquietante y complicada.

Para ejemplificar el fascinante quehacer de los físicos de altas energías, describimos a continuación las propuestas científicas y la puesta en marcha de dos experimentos de altas energías, así como una iniciativa de innovación tecnológica.

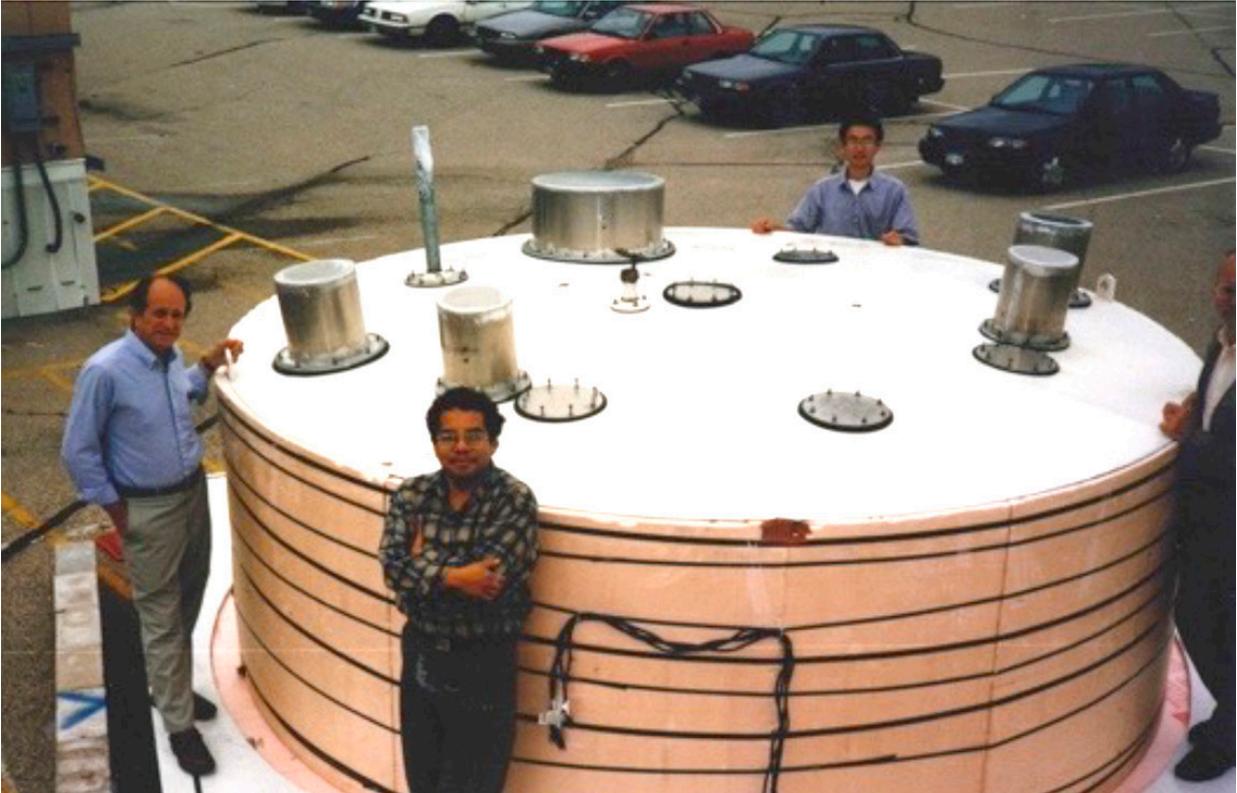
Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger

A mediados de la década de los noventa del siglo xx, el norteamericano James Cronin (Premio Nobel de Física 1980) y el británico Alan Watson propusieron la construcción de un observatorio terrestre que permitiera detectar rayos cósmicos con la mayor energía posible. Así, buscaban determinar, entre otras hipótesis, las regiones en el espacio, intra o extragaláctico, donde se producen este tipo de fenómenos extraordinarios.

Tomando en cuenta observaciones previas, se debían construir sistemas de detección de partículas secundarias. Cabe señalar que estas se producirían por el impacto del rayo cósmico primario altamente energético en la atmósfera terrestre, y se dispersarían ampliamente antes de tocar la superficie de la Tierra. El área que estas partículas subatómicas podrían cubrir antes de chocar con el suelo debería ser de 4 a 5 km².

Los estudiosos de la física de rayos cósmicos indicaban que aquellos rayos cósmicos serían producidos por algún objeto celeste distanciado de nosotros por varias decenas de años luz, pero eventualmente impactarían algún punto de la atmósfera terrestre, aunque muy raramente, a razón de uno por kilómetro cuadrado, ipor año!

Dado que se requiere una buena cantidad de eventos físicos para hacer tratamientos estadísticos confiables, sería necesario dedicar un área muy grande en el suelo terrestre para detectar la “cascada” de partículas secundarias y, además, se requerirían “cielos limpios”, libres de la contaminación luminosa de



Arturo Fernández y miembros del grupo Fermilab-Auger, junto a un prototipo de detector de superficie del Observatorio Pierre Auger. Fecha: julio, 1997.

ciudades grandes, para poder observar el camino de esos rayos cósmicos ultra energéticos en nuestra atmósfera.

Estas exigencias experimentales requerían de sitios de detección de varias decenas de kilómetros cuadrados, alejados de las grandes ciudades, pero con "fácil" acceso. El grupo de científicos, provenientes de América Latina, Estados Unidos, Europa y Asia que acompañaron a Cronin y Watson en este ambicioso proyecto, se dio a la tarea de buscar en todo el globo terráqueo el mejor sitio de observación que, posteriormente, se llamaría el Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger, en honor al científico francés que detectó por primera vez los rayos cósmicos ultra energéticos. Este sitio se encontró en un terreno de la Pampa Amarilla, en el pueblo rural de Malargüe, aproximadamente a 325 kilómetros de la ciudad de Mendoza, Argentina.

Los científicos de instituciones mexicanas que se incorporaron a esta empresa

participaron en la búsqueda del sitio de observación. Asimismo, trabajaron en la construcción tanto de los detectores colocados sobre la superficie (*water Cherenkov detector*) como de los detectores de luz fluorescente que producen los rayos cósmicos ultra energéticos al cruzar nuestra atmósfera. Aunque se enfrentaron a todo tipo de contratiempos, principalmente al conseguir los recursos económicos para contribuir a la construcción de este laboratorio, la recompensa fue altamente satisfactoria. Mostraron que eran capaces de aportar tanto a nivel técnico, con propuestas originales en la construcción de los dos tipos de detectores del observatorio, como a nivel científico, con planteamientos que condujeron a algunas de las principales aportaciones del Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger. Cabe mencionar que este observatorio sigue tomando datos y lidera la física de rayos cósmicos de alta energía.

.....
 >> Este sitio se encontró en un terreno de la Pampa Amarilla, en el pueblo rural de Malargüe, aproximadamente a 325 kilómetros de la ciudad de Mendoza, Argentina.


Así, entre los bastos resultados científicos que se han reportado en artículos sobre ALICE, se encuentra la contribución mexicana a la física de astropartículas.

El experimento ALICE-LHC del CERN

Hablar del Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) es hablar de una de las propuestas científicas más ambiciosas de la humanidad, cuya finalidad es conocer la estructura de la materia en su nivel más básico. A inicios de los años noventa del siglo pasado, se propuso construir un acelerador de partículas que permitiera observar colisiones entre protones a la energía de 14 TeV, la mayor energía en el centro de masa alcanzada en laboratorios terrestres, con la finalidad de producir y observar partículas exóticas. Estas partículas habían sido propuestas por un sinnúmero de modelos, basados en el llamado Modelo Estándar de interacciones electrodébiles de G. Glashow, S. Weinberg y A. Salam, quienes fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1994.

Unos pocos años después, se propuso que este acelerador de partículas también se usara como colisionador de iones pesados —por ejemplo, iones de plomo—, con el fin de estudiar las propiedades de un estado extremo de la materia, llamado el plasma de quarks y gluones. Así, a principios del año 2000 se inició la construcción del LHC, un conducto circular colocado aproximadamente a cien metros de profundidad, con un perímetro de casi 27 kilómetros. Este prodigio de la tecnología actual concluyó su construcción a finales de 2008, incluyendo la instalación de cuatro sitios de observación de este tipo de colisiones, con diferentes tipos de sistemas de detección,

correspondientes a los detectores de los experimentos ALICE, ATLAS, CMS Y LHCb, respectivamente.

Un grupo de científicos de instituciones mexicanas se propuso contribuir al experimento ALICE, participando en la construcción de dos detectores de partículas. Uno es el llamado V0, cuya finalidad fue detectar el número de partículas secundarias que se producían en las colisiones entre protón-protón o entre iones de plomo y que van en “dirección hacia adelante”. El otro es el detector acorde (*A Cosmic Ray Detector for ALICE-LHC*), el cual se propuso con la idea de encontrar rayos cósmicos secundarios que logran llegar al sitio de detección en la caverna del experimento ALICE.

La propuesta consistió en la construcción de un sistema de detectores capaces de registrar partículas que tuvieran carga eléctrica y fueran producidas por rayos cósmicos primarios de muy alta energía —logran atravesar más de cincuenta metros de roca sólida—. El detector fue llamado ACORDE y la propuesta científica incluía estudiar eventos de rayos cósmicos con un número grande de muones (*cosmic muon bundles*) que llegaran al sitio de ALICE. Así, se buscaba detectar las cascadas de partículas cósmicas que pudieran ser confundidas con partículas producidas por las colisiones de núcleos atómicos en el experimento ALICE.

Esta propuesta fue presentada ante la Colaboración Internacional ALICE en la primavera de 2002, e incluyó la participación de los grupos del Cinvestav, el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM y la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM) de la BUAP, con cinco investigadores de estas instituciones y cuatro estudiantes de posgrado de la BUAP.

Después de dos años de intenso trabajo y alto estrés, el equipo mexicano elaboró prototipos del detector ACORDE y diversos estudios sobre la pertinencia de este detector y fenómenos de astropartículas en ALICE. Finalmente, la colaboración ALICE, a mediados de 2004, incorporó esta propuesta al programa científico del experimento.

La primera prueba real de funcionamiento del detector ACORDE en una actividad del experimento ALICE se dio en abril de 2006. Para ello, se emplearon 16 piezas del arreglo de detectores de ACORDE para calibrar el detector TPC (*Time Projection Chamber*) usando rayos cósmicos. Al cabo de tres meses continuos de operación, el sistema ACORDE-TPC mostró sensibilidad y alta eficiencia de detección, lo que dio lugar a una serie de artículos que reportaban el buen desempeño del detector TPC, el más sofisticado y costoso del experimento ALICE.

Por supuesto, también se comprobó la utilidad y versatilidad de ACORDE en ALICE. Este sistema de detectores de centelleo, junto con los 17 sistemas de detección de ALICE, se instalaron en el sitio de detección LHC-P2 a sesenta metros bajo tierra y se realizaron las primeras pruebas de detección a finales de 2007. En el otoño de 2008, iniciaron las primeras pruebas de funcionamiento del LHC

y, en noviembre de 2009, inició la toma de datos a 13 TeV. Desde ese momento, ACORDE y el resto de los sistemas de detección de ALICE registraron eventos de colisión protón-protón y iones de plomo para estudiar las características físicas de un estado de la materia extremo, llamado el plasma de quarks y gluones. En paralelo, se registraron y analizaron eventos de rayos cósmicos (que nunca dejan de llegar al sitio de detección de ALICE), para detectar eventos de *muon bundles*.

Así, entre los bastos resultados científicos que se han reportado en artículos sobre ALICE, se encuentra la contribución mexicana a la física de astropartículas.



Instalación de centelladores ACORDE sobre el magneto de Alice. En la foto: Mario Rodríguez (BUAP) e Ivonne Maldonado (UNAM).

El HEV Ventilator

Durante la pandemia por el virus SARS-CoV-2 de los años 2020 y 2021, el grupo ALICE-FCFM estudió la posibilidad de diseñar y construir un ventilador mecánico invasivo de bajo costo y con todas las funciones necesarias para tratar problemas respiratorios. A finales de 2020, junto con investigadores del experimento LHCb del CERN, se construyeron tres prototipos de ventilador mecánico, llamado HEV-Ventilator. Este desarrollo tecnológico se construyó con base en una arquitectura que permitiera una producción masiva a bajo costo, sin prescindir de todas las funciones requeridas en estos equipos para las áreas de terapia intensiva.

Durante el desarrollo de este proyecto han participado estudiantes de licenciatura y posgrado de la FCFM, caracterizando, calibrando y operando el ventilador. Actualmente, el prototipo está terminado y en proceso de obtención de las certificaciones necesarias para su producción a gran volumen. Con esto, se espera hacer llegar este tipo de aparatos a países de ingresos medio-bajos en

donde no se cuenta con los equipos suficientes para tratar enfermedades respiratorias.



Ventilador HEV, conectado a un maniquí. El monitor del ventilador HEV muestra valores de presión, volumen y flujo de aire. Lugar: Laboratorio de Partículas, EcoCampus-BUAP.

En física de altas energías se construyen detectores de muchos tipos y formas. Estos requieren sistemas electrónicos, materiales especializados, una combinación de gases específicos en su construcción y operación, así como estructuras de muy alta precisión para su instalación. Todo esto ha

» El prototipo está terminado y en proceso de obtención de las certificaciones necesarias para su producción a gran volumen. Con esto, se espera hacer llegar este tipo de aparatos a países de ingresos medio-bajos en donde no se cuenta con los equipos suficientes para tratar enfermedades respiratorias.

puede aportar a la medicina, como ha sucedido desde hace mucho tiempo.

Colofón

El trabajo de un físico experimental de altas energías es intrínsecamente multidisciplinario y requiere de disponibilidad absoluta para trabajar en el campo abierto, cavernas o laboratorios alejados de casa. Además, debe tener una actitud abierta para enfrentar problemas conceptuales, de alta tecnología e inclusive culturales. Su trabajo es arduo, pero, al final del día, altamente satisfactorio.

Para saber más:

- Observatorio de Rayos Cósmicos Pierre Auger: <https://www.auger.org/>
- ALICE-LHC Experiment: <https://home.cern/science/experiments/alice>
- HEV Ventilator: <https://kt.cern/kt-fund/projects/hev-ventilator-project>



generado mucha experiencia en diferentes áreas, y se ha acumulado durante los años en que el equipo de la FCFM ha trabajado en los experimentos de física de altas energías. Así fue como se pudo desarrollar el ventilador con un diseño tradicional, pero con todas las ventajas que tiene el utilizar componentes de alto rendimiento, eficientes y confiables para poder desarrollar los códigos de programación y control, siguiendo las estrictas especificaciones que se requieren en equipos de uso médico.

El ventilador mecánico funciona por medio de válvulas electromecánicas, sensores de presión y un *buffer* con capacidad de diez litros. Se controla por medio de un monitor táctil y es posible operar y monitorear el ventilador de forma remota, pues cuenta con una conexión de red inalámbrica. Los resultados de las diferentes pruebas muestran un buen desempeño, estabilidad y confiabilidad en los componentes seleccionados para su construcción. Por ello, este desarrollo es otro ejemplo de lo que la física experimental de altas energías



Una década con el Bosón de Higgs

J. Lorenzo Díaz Cruz

Centro Interdisciplinario de Investigación y Enseñanza de la Ciencia,
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, BUAP

Hace casi diez años se anunció el descubrimiento del bosón de Higgs, lo cual generó en el público una notable curiosidad por comprender el significado y trascendencia de esa noticia. Durante varios días, los programas de radio y televisión abrieron sus espacios para entrevistar a los científicos, como pocas veces había sucedido en la historia de la comunicación y la ciencia.

Así, las colaboraciones ATLAS y CMS del CERN anunciaron la evidencia de una nueva partícula elemental, cuyas características correspondían a las del llamado bosón de Higgs: un ente efímero que surge como remanente del mecanismo que permite a los bloques diminutos del mundo subatómico adquirir su masa. Este descubrimiento de enorme relevancia se puede ver como la culminación de miles de años de pensamiento alrededor de la hipótesis atómica, desde los griegos hasta nuestros días.

Parte de esa avidez por entender la noticia tuvo que ver con el nombre que se asignó a dicha partícula: en un libro de divulgación del físico Leon Lederman, por sugerencia de sus editores, se usó el término “partícula de Dios”. ¡Vaya manera de captar la atención del público! Parecía que la ciencia le estaba diciendo a la gente: “he aquí el mecanismo de la mente de Dios; por medio de esta partícula sabemos la clave para conocer el universo, la materia, incluida la vida”. Bueno, pero entonces ¿qué es el bosón de Higgs, cómo se descubrió y por qué es tan importante? Vamos por partes.

Primero, mencionemos que, en la teoría cuántica, las interacciones o fuerzas entre electrones y protones se describen como el intercambio de partículas. Es similar a cuando vemos a dos



» Además, existen las llamadas interacciones nucleares débiles, las cuales, por ejemplo, se manifiestan en el decaimiento del neutrón, que vive por unos ocho minutos y luego se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino.

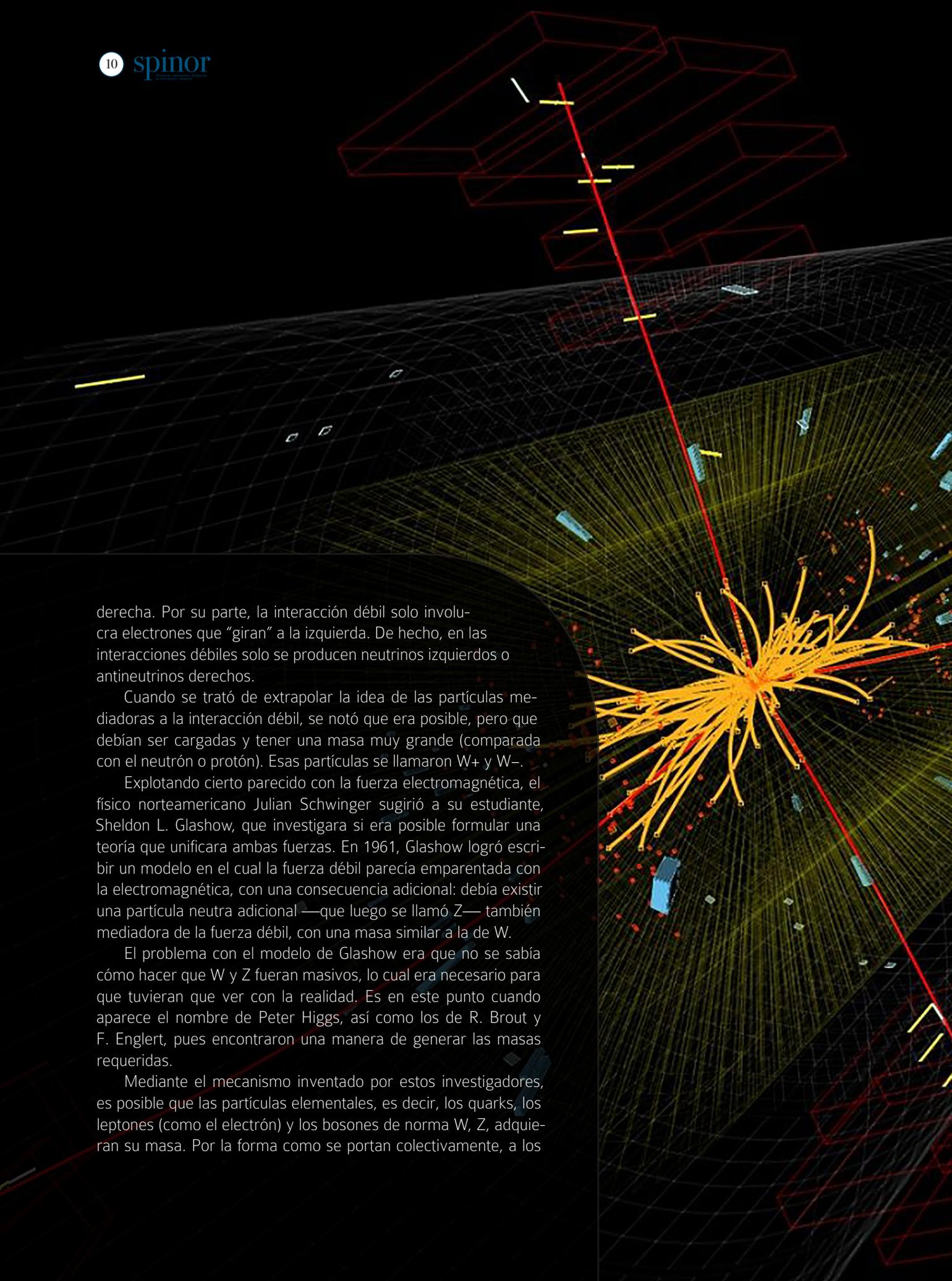
jugadores de baloncesto: de lejos, parecen juntos, y ya más de cerca notamos que están peleando por la pelota. El tratar de quedarse con la pelota explica por qué parecen estar juntos.

La primera teoría exitosa de este tipo fue la llamada electrodinámica cuántica (QED, por sus siglas en inglés), en la cual la interacción electromagnética entre electrones y protones es mediada por una pelota llamada "fotón", una partícula de masa cero que se mueve a la velocidad de la luz; de hecho, es la luz misma. La QED ha sido una teoría muy exitosa, probada con gran precisión, que predijo, entre otras cosas, la existencia de la antimateria. Esto se refiere

a que a cada partícula de la naturaleza le corresponde su antipartícula, con la misma masa, pero de carga eléctrica opuesta. Así, el electrón tiene su antipartícula: el antielectrón o también llamado positrón.

Además, existen las llamadas interacciones nucleares débiles, las cuales, por ejemplo, se manifiestan en el decaimiento del neutrón, que vive por unos ocho minutos y luego se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino. Las interacciones débiles muestran diferencias notables respecto a las electromagnéticas; por ejemplo, en QED, un electrón que "gira" a la izquierda interactúa con los fotones del mismo modo que uno que "gira" a la

» El problema con el modelo de Glashow era que no se sabía cómo hacer que W y Z fueran masivos, lo cual era necesario para que tuvieran que ver con la realidad.



derecha. Por su parte, la interacción débil solo involucra electrones que “giran” a la izquierda. De hecho, en las interacciones débiles solo se producen neutrinos izquierdos o antineutrinos derechos.

Cuando se trató de extrapolar la idea de las partículas mediadoras a la interacción débil, se notó que era posible, pero que debían ser cargadas y tener una masa muy grande (comparada con el neutrón o protón). Esas partículas se llamaron W^+ y W^- .

Explotando cierto parecido con la fuerza electromagnética, el físico norteamericano Julian Schwinger sugirió a su estudiante, Sheldon L. Glashow, que investigara si era posible formular una teoría que unificara ambas fuerzas. En 1961, Glashow logró escribir un modelo en el cual la fuerza débil parecía emparentada con la electromagnética, con una consecuencia adicional: debía existir una partícula neutra adicional —que luego se llamó Z — también mediadora de la fuerza débil, con una masa similar a la de W .

El problema con el modelo de Glashow era que no se sabía cómo hacer que W y Z fueran masivos, lo cual era necesario para que tuvieran que ver con la realidad. Es en este punto cuando aparece el nombre de Peter Higgs, así como los de R. Brout y F. Englert, pues encontraron una manera de generar las masas requeridas.

Mediante el mecanismo inventado por estos investigadores, es posible que las partículas elementales, es decir, los quarks, los leptones (como el electrón) y los bosones de norma W , Z , adquieran su masa. Por la forma como se portan colectivamente, a los

electrones (y los quarks) se les llama fermiones, mientras que al fotón y W, Z se les conoce como bosones.

En este mecanismo, la masa resulta de la interacción de las partículas con el vacío —que en realidad no está tan “vacío”—. Esto es algo parecido a cuando movemos una pelota en el aire o en el agua: sabemos que nos cuesta más moverla en el agua porque el medio cambia la inercia de la pelota. De no existir ese mecanismo de Higgs, todas las partículas se moverían a la velocidad de la luz, y no tendrían la opción de formar núcleos, átomos ni moléculas. En consecuencia, no habría manera de que se formaran estructuras macroscópicas en el universo. ¡Vamos, en último término, hasta la existencia de la vida se la debemos al bosón de Higgs!

Para describir en forma matemática el mecanismo de Higgs, es necesario analizar el llamado potencial de Higgs. Para ello, podemos usar una función matemática que incluye un término cuadrático y un término cuártico, que tiene la siguiente forma:

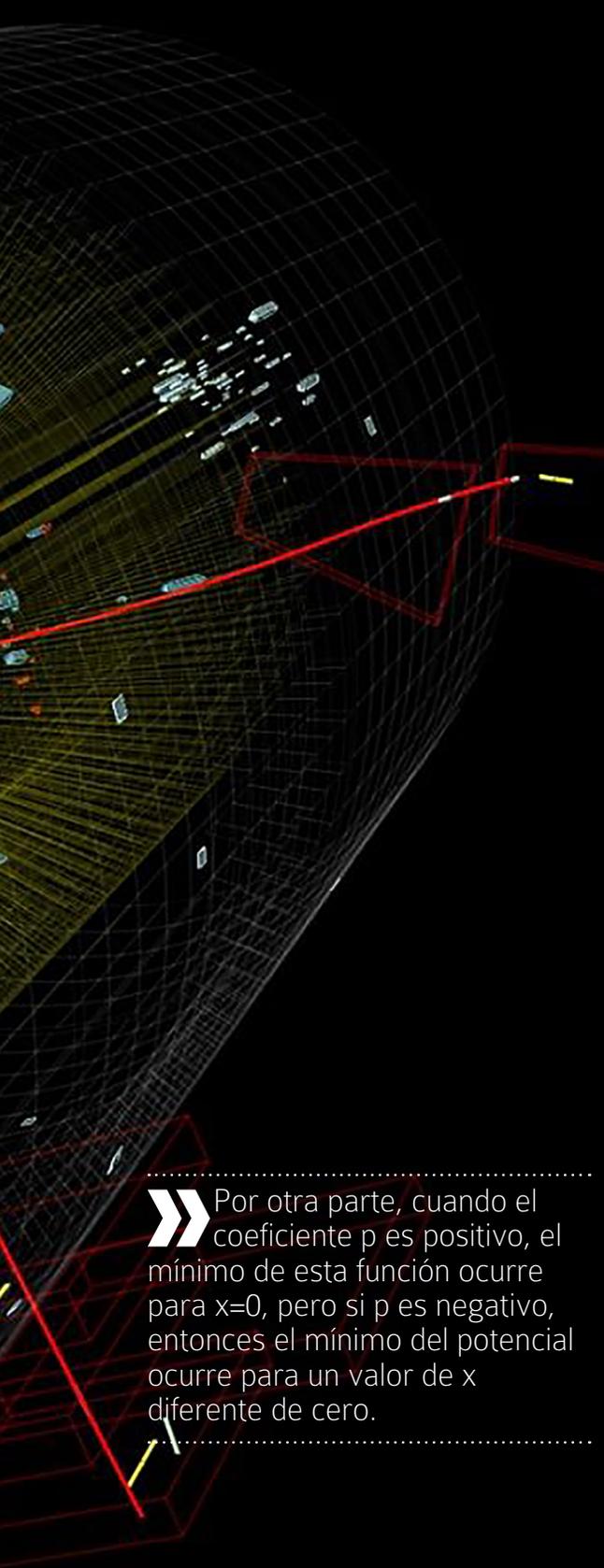
$$V = px^2 + qx^4$$

Donde x representa el campo de Higgs y el coeficiente q debe ser positivo para que la teoría no sea inestable. Por otra parte, cuando el coeficiente p es positivo, el mínimo de esta función ocurre para $x=0$, pero si p es negativo, entonces el mínimo del potencial ocurre para un valor de x diferente de cero. Ese número se conoce como el “valor de expectación del campo de Higgs en el vacío” y se abrevia como v_{ev} . Es una constante tan importante que todas las masas de las partículas son proporcionales a este v_{ev} , cuyo valor es de 246 GeV. Ese número nos da una idea de cuánta energía debemos alcanzar en un acelerador para producir el bosón de Higgs.

Y ¿cómo se detectó dicha partícula de Higgs en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares, el famoso CERN? Esa especie de meca de la ciencia alberga un acelerador de protones llamado LHC (por sus siglas en inglés: Large Hadron Collider), que alcanzó una máxima energía de 7-8 TeV. Un TeV (Tera-electrón-Volt) es una unidad de energía igual a mil GeV, donde 1 GeV es aproximadamente la energía que se obtiene al convertir la masa de un protón en energía, usando la fórmula de Einstein, $E=mc^2$. En física de partículas, es común utilizar unidades donde $c=1$, luego la masa y la energía tienen las mismas unidades.

Los protones acelerados chocan en un punto, produciendo reacciones nucleares que hacen posible convertir esa energía para materializar partículas más pesadas, como los bosones W, Z o el quark top, o el mismo Higgs. En esos choques se desencadena una multitud de procesos y, entre esos miles de millones de reacciones (ruido), hay unas cuantas que corresponden a la producción de un bosón de Higgs (señal). Todo el chorro de partículas pasa por los detectores, que son pilas enormes de equipo instrumental,

» Por otra parte, cuando el coeficiente p es positivo, el mínimo de esta función ocurre para $x=0$, pero si p es negativo, entonces el mínimo del potencial ocurre para un valor de x diferente de cero.



miles de cables y otros tantos subcomponentes, cuyo peso es de miles de toneladas.

Entre los detectores del LHC, los que se dedicaron a buscar el Higgs se llaman ATLAS y CMS. Cabe mencionar que en este último hay una participación de los científicos de la BUAP, así como en otro de los detectores, llamado ALICE, el cual está dedicado a estudiar el plasma de quarks y gluones. Se requiere un formidable equipo instrumental y de cómputo para grabar los eventos interesantes, y luego estudiarlos para buscar aquellos eventos que correspondan efectivamente a un Higgs. De hecho, los análisis de cómputo y estadístico son tan sofisticados que debieron ser realizados por diferentes grupos, dentro de cada colaboración.

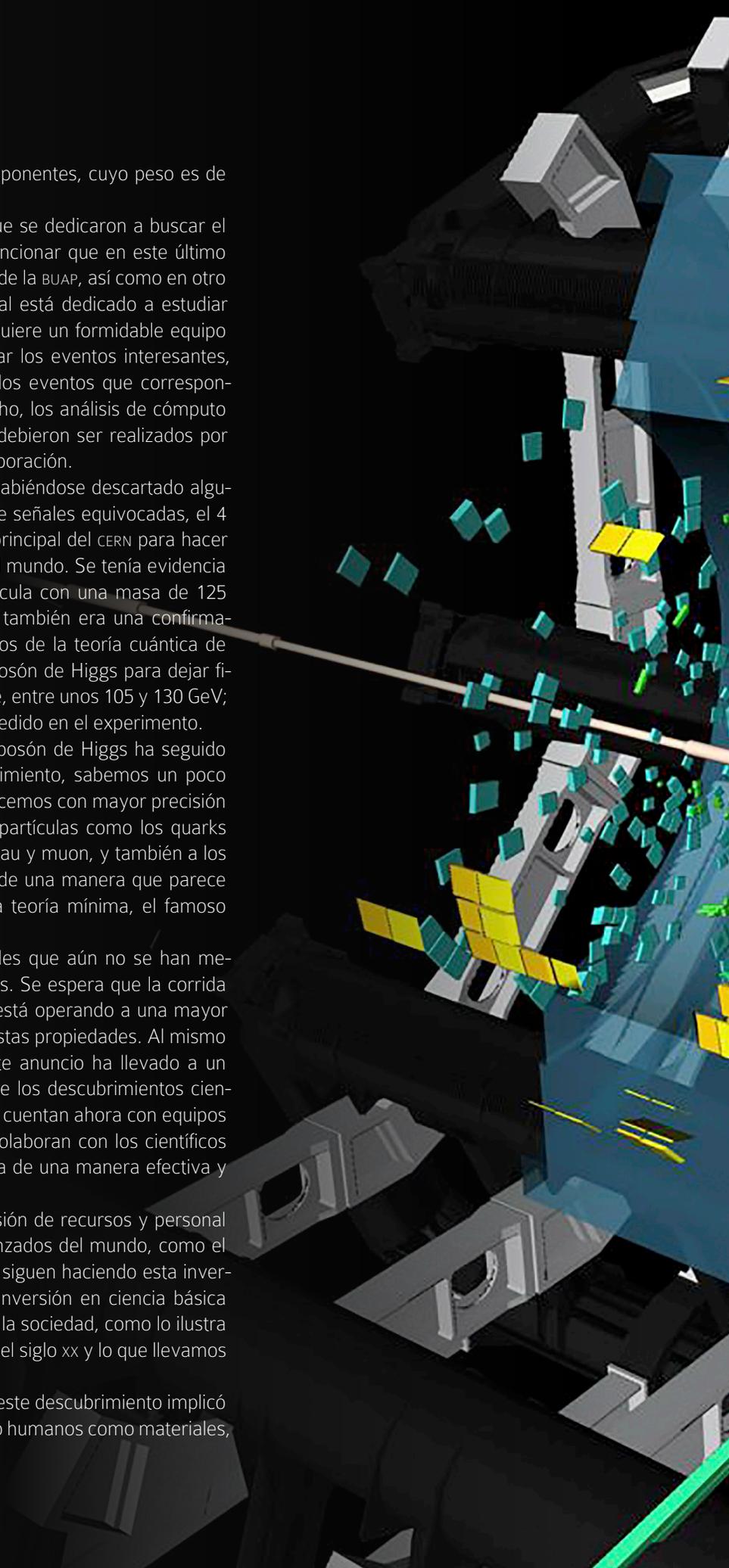
Con todo el cuidadoso análisis, y habiéndose descartado algunas fugas de información previas sobre señales equivocadas, el 4 de julio de 2012, se abrió el auditorio principal del CERN para hacer el anuncio del descubrimiento a todo el mundo. Se tenía evidencia concreta de la existencia de una partícula con una masa de 125 GeV, de modo que el descubrimiento también era una confirmación de la teoría. Al aplicar los métodos de la teoría cuántica de campos, se pudo acotar la masa del bosón de Higgs para dejar finalmente un intervalo de masas posible, entre unos 105 y 130 GeV; valor que felizmente coincidió con el medido en el experimento.

Podemos decir que la ciencia del bosón de Higgs ha seguido su camino y, a diez años del descubrimiento, sabemos un poco más sobre él. Por ejemplo, ahora conocemos con mayor precisión cómo se acopla el bosón de Higgs a partículas como los quarks top y bottom, así como a los leptones tau y muon, y también a los bosones W y Z. Todo ello se observa de una manera que parece consistente con las predicciones de la teoría mínima, el famoso modelo estándar.

Sin embargo, hay otras propiedades que aún no se han medido, como la autointeracción del Higgs. Se espera que la corrida actual del LHC (inició en 2022), la cual está operando a una mayor energía, pueda arrojar más luz sobre estas propiedades. Al mismo tiempo, la manera en que se hizo este anuncio ha llevado a un replanteamiento de la comunicación de los descubrimientos científicos. Los laboratorios internacionales cuentan ahora con equipos especializados en comunicación que colaboran con los científicos para transmitir el mensaje de la ciencia de una manera efectiva y profesional.

Todo eso implica una mayor inversión de recursos y personal por parte de los laboratorios más avanzados del mundo, como el CERN y la NASA. Pero ¿por qué será que siguen haciendo esta inversión? Por la sencilla razón de que la inversión en ciencia básica produce toda una serie de beneficios a la sociedad, como lo ilustra la historia de la ciencia y la tecnología del siglo xx y lo que llevamos del xxi.

Para cerrar, podemos afirmar que este descubrimiento implicó una enorme cantidad de recursos, tanto humanos como materiales,





de varios países. No obstante, fue posible concentrarlos en un lugar como el CERN, un laboratorio ubicado en la frontera entre Francia y Suiza. En este lugar laboran miles de científicos de casi todo el mundo, y es una verdadera babel que logra entenderse con un lenguaje común: el de la ciencia. Y esa nueva forma de hacer ciencia permite vislumbrar otros grandes descubrimientos que cambiarán nuestra concepción del universo; por ejemplo, sobre el enigma de la materia oscura, los hoyos negros y las ondas gravitacionales.

Además de su lado científico, otra lección que nos deja este descubrimiento es el valor de la colaboración internacional: una empresa en la que todos ayudan a todos, donde cada parte pone sus habilidades al servicio de una causa universal. Sin duda, hay muchos retos que enfrenta la sociedad en nuestro tiempo, pero el camino de la colaboración hace surgir lo mejor de la humanidad, como una comunidad responsable, generosa y soñadora.

Para leer material adicional sobre el bosón de Higgs, se recomienda consultar las siguientes referencias:

- J. Lorenzo Díaz Cruz, *El Muchacho que soñaba con el bosón de Higgs*, Cordero Editores, 2021.

- J. Lorenzo Díaz-Cruz, "The Higgs profile in the standard model and beyond", *Revista Mexicana de Física*, vol. 65, núm. 5, pp. 419-439, 2019 [arXiv:1904.06878 [hep-ph]].

El modelo estándar de las partículas elementales

Dr. Gilberto Tavares Velasco

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, BUAP

Desde que el ser humano tuvo uso de razón siempre ha tenido la curiosidad de comprender lo que ocurre a su alrededor. Cientos de miles de años después, aún seguimos observando con fascinación nuestro entorno y no nos ha abandonado esa curiosidad por develar las leyes que rigen el funcionamiento de nuestro universo. Así, en la física de partículas, el modelo estándar de las partículas elementales, el tema que ahora nos ocupa, se remonta a tiempos inmemoriales, cuando nuestros antepasados empezaron a preguntarse ¿cuáles son los bloques fundamentales que constituyen la materia que observamos a nuestro alrededor?, y ¿qué leyes dan lugar a los fenómenos que ocurren en nuestro entorno? Lo que hoy conocemos como el modelo estándar de las partículas elementales es la culminación del esfuerzo de una gran cantidad de científicos, ingenieros, técnicos, entre otros, por encontrar una respuesta a esas preguntas.

Hace mucho tiempo se pensaba que el universo se componía de cuatro elementos fundamentales: el agua, la tierra, el viento y el fuego. Tiempo después, en la antigua Grecia, Demócrito desarrolló el concepto de átomo como un ente indivisible que compone el universo. Siglos después, a principios del XIX, Dalton realizó una serie de postulados que establecían que 1) los elementos químicos están compuestos por átomos, partículas diminutas indivisibles e indestructibles; 2) los átomos de cada elemento son idénticos, pero difieren de los de otros elementos; 3) los átomos de distintos elementos se combinan entre sí para formar compuestos químicos y de otros tipos.

Años más tarde, Mendeléyev inventó la tabla periódica para clasificar la gran cantidad de elementos químicos descubiertos



» La historia moderna de la física de partículas comenzó cuando Thompson, estudiando los rayos catódicos, descubrió una partícula diminuta con carga eléctrica negativa, la cual fue bautizada como electrón.



Rutherford, Geiger y Marsden

hasta ese entonces. Surgió entonces la siguiente cuestión: si los átomos son los bloques fundamentales de la materia, ¿por qué hay una variedad tan amplia de estos cuando cabría esperar que fueran solo unos cuantos? La respuesta es que los átomos son indivisibles en realidad.

La historia moderna de la física de partículas comenzó cuando Thompson, estudiando los rayos catódicos, descubrió una partícula diminuta con carga eléctrica negativa, la cual fue bautizada como electrón. A todo esto, las partículas tienen diversas propiedades como masa y carga eléctrica, además de otras propiedades intrínsecas. Además, las partículas pueden ser elementales (indivisibles) o compuestas (con estructura interna). Por tanto, Thompson sugirió que los átomos en realidad son partículas compuestas en forma de esferas: con carga eléctrica de signo positivo distribuida uniformemente a través del átomo, y con electrones distribuidos de manera aleatoria, como un "pequeño budín de pasas".

Para comprobar esta teoría, bajo la dirección de Rutherford, Geiger y Marsden, se bombardeó una película de oro con unas partículas llamadas alfa, para estudiar cómo estas se desviaban de su trayectoria. Imaginemos un experimento en donde disparamos proyectiles sobre una placa de madera y observamos la dirección en que emergen después del impacto: dependiendo de la estructura de la placa, los proyectiles atravesarán en línea recta o serán desviados de su trayectoria original.

Los resultados del experimento llevaron a Rutherford a establecer que los átomos son partículas compuestas por un núcleo con carga eléctrica positiva, rodeado por electrones que orbitan en torno a él, a manera de un pequeño sistema solar. Además, se asentó que el número de electrones que rodean el núcleo atómico difiere entre los diversos átomos que existen en la naturaleza. Posteriormente, quedó claro que el núcleo se compone de protones y neutrones, los cuales se denominaron hadrones, y se llegó a la

conjetura de que estos eran, junto con el electrón, los bloques fundamentales de la materia.

Mientras los protones tienen una carga eléctrica de la misma magnitud que la del electrón, pero de signo positivo, los neutrones son eléctricamente neutros, como su nombre lo indica. Dado que la dimensión o escala de longitud de las partículas menores que un átomo (partículas subatómicas) es inconmensurablemente pequeña, a principios del siglo xx se encontró que es imposible estudiar este tipo de fenómenos con los métodos usuales, por lo cual se requieren nuevos métodos, tanto a nivel teórico como experimental. El desarrollo de estos requirió la contribución de muchas mentes brillantes y talentosas, de modo que físicos teóricos de gran renombre contribuyeron a desarrollar el marco teórico necesario para el estudio de la física de partículas subatómicas. Esta teoría fue desarrollada durante las primeras décadas del siglo xx y combina la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad: la llamamos teoría cuántica de campos.

» En este caso, se "bombardea" a la partícula bajo estudios con partículas más pequeñas y se determina la dirección en que estas se desvían o dispersan. como electrón.

En cuanto a los métodos experimentales, la dispersión de Rutherford es el parangón con que contamos para determinar si una partícula es elemental o compuesta. En este caso, se “bombardea” a la partícula bajo estudios con partículas más pequeñas y se determina la dirección en que estas se desvían o dispersan. Sin embargo, los experimentos para estudiar la estructura de la materia se fueron tomando altamente sofisticados y costosos con el paso del tiempo. Primero, se llevaban a cabo en globos aerostáticos o en laboratorios relativamente pequeños, pero actualmente son necesarios laboratorios enormes que pueden ocupar gran parte de una ciudad, y su costo sobrepasa los miles de millones de dólares anuales, por lo cual se requiere del financiamiento internacional. Este es el caso del laboratorio conocido como LHC (Large Hadron Collider o Gran Colisionador de Hadrones), que se ubica en el CERN en Suiza y recibe financiamiento de más de cien países. Los experimentos de partículas actuales consisten en acelerar partículas a muy altas energías para hacerlas colisionar y observar los productos finales de la colisión.

Pero, volviendo un siglo atrás, después del descubrimiento del electrón, sucedieron descubrimientos fascinantes tanto a nivel teórico como experimental, los cuales sirvieron como andamiaje para la construcción del modelo estándar. Mencionaremos brevemente algunos de estos descubrimientos sin seguir un orden estrictamente cronológico y asumiendo el riesgo de pasar por alto algún hecho relevante:

- Millikan determina experimentalmente la carga eléctrica del *electrón e*: todas las partículas descubiertas hasta ahora tienen una carga eléctrica que es un múltiplo racional de la carga e .
- Se postula la existencia de las fuerzas nuclear fuerte y nuclear débil, las cuales, junto con las fuerzas electromagnética y de gravedad, son las cuatro fuerzas fundamentales que conocemos hoy en día. Todos hemos observado o sufrido los efectos de las fuerzas electromagnética y de gravedad; las fuerzas débil y fuerte tienen incidencia en los fenómenos que ocurren a nivel subatómico. La fuerza fuerte es responsable de que los núcleos atómicos no se destruyan, debido a la fuerza repulsiva entre los protones cargados eléctricamente; mientras que la fuerza débil es responsable del decaimiento beta, que es una forma de radiación que emiten espontáneamente algunos elementos.
- Einstein da solución al efecto fotoeléctrico (la expulsión de electrones de los átomos por rayos de luz), postulando que la luz está compuesta por partículas llamadas fotones.
- Fermi propone una teoría para la fuerza débil.
- Hess descubre los rayos cósmicos, partículas que provienen del espacio exterior, producidas en alguna galaxia lejana y que arriban a la atmósfera terrestre dotadas de una energía que sería imposible alcanzar en experimentos realizados en nuestros laboratorios. Estos rayos cósmicos fueron fundamentales para realizar una gran cantidad de descubrimientos.
- Dirac postula la existencia de la antipartícula del electrón: una partícula con la misma masa que el electrón, pero con carga eléctrica de signo opuesto. Esta se detectó tiempo después; sin embargo, ahora sabemos que todas las partículas elementales tienen su antipartícula.
- Para preservar el principio de conservación de energía en el decaimiento beta, Pauli postula la existencia de una nueva partícula que posteriormente fue llamada neutrino y que es una de las partículas más enigmáticas descubiertas hasta ahora. Esta tiene una masa despreciable y es eléctricamente neutra.
- Feynman (quien es muy conocido en la física de partículas por inventar los diagramas de Feynman), Schwinger y Tomonaga desarrollan el marco de la electrodinámica cuántica como una teoría de norma (gauge) renormalizable.
- Se descubre una numerosa cantidad de nuevas partículas mediante experimentos realizados con rayos

cósmicos y en laboratorios desarrollados por el hombre: el muon (un electrón más pesado), los piones, el positrón (la antipartícula del electrón), el neutrino, los kaones y una enorme multitud de hadrones.

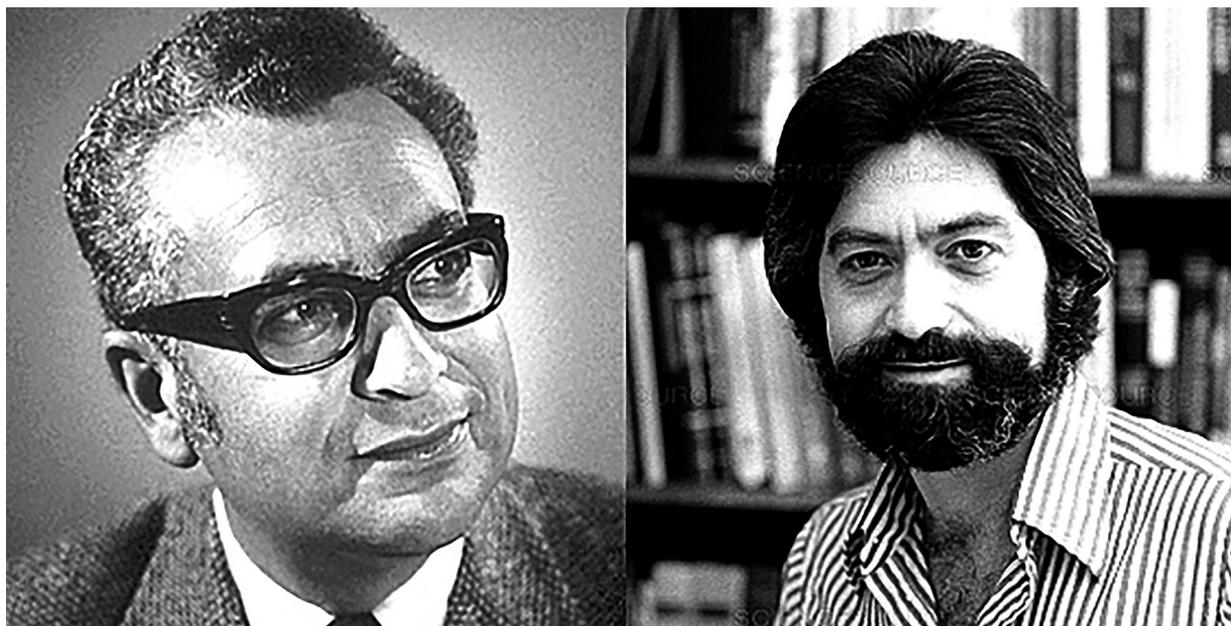
- Lederman y sus colaboradores descubren que hay más de un tipo de neutrino.
- Yang y Mills postulan una teoría de norma no abeliana bajo el grupo de norma SU(2).
- A sugerencia de Lee y Yang, la física china Wu realiza un experimento que demuestra que la paridad (simetría de las leyes de la física ante la reflexión en el espejo) se viola en procesos mediados por la fuerza débil.
- Gell-Mann y Zweig postulan que los hadrones están compuestos por partículas de carga eléctrica fraccionaria a las que Gell-Mann denomina quarks.
- Higgs y otros autores proponen un mecanismo para dotar de masa a los bosones de norma, mediadores de las fuerzas, sin violar el principio de invarianza de norma.
- Weinberg propone una teoría invariante de norma para la fuerza débil y, unos años después, 't Hooft demuestra que esta teoría es renormalizable.
- Se encuentran evidencias indirectas de los quarks durante la llamada revolución de noviembre y se postula una teoría de norma para la fuerza fuerte.
- Se detectan evidencias de los bosones de norma mediadores de la fuerza débil y de los bosones de norma mediadores de la fuerza fuerte. Asimismo, se detectan los quarks bottom y top, y se descubren el leptón tau y su neutrino.
- En julio de 2012, se anuncia el descubrimiento del bosón de Higgs en el LHC del CERN, predicho en la teoría de Weinberg, después de una búsqueda de décadas, tanto en Estados Unidos como en Europa.

Así, arribamos al marco del modelo estándar, una teoría que postula que la materia está compuesta por fermiones (partículas denominadas así porque siguen la estadística de Fermi-Dirac). Hasta ahora, se han descubierto tres familias de fermiones y las evidencias experimentales sugieren que no hay una cuarta familia o que, si la hay, esta tiene características distintas a las de las tres primeras familias. Cada familia de fermiones cuenta con dos leptones y dos quarks. En cuanto a los leptones, uno de ellos tiene carga eléctrica negativa, mientras el otro es eléctricamente neutro (neutrino). En el caso de los quarks, uno de ellos tiene carga eléctrica de $2/3e$ (quark tipo up), y otro, carga eléctrica de $-1/3e$ (quark tipo down). Mientras los quarks están sujetos a las fuerzas fuerte, débil y electromagnética, los leptones están sujetos solo a las fuerzas débil y electromagnética.



Debido a que la fuerza electromagnética solo opera sobre partículas con carga eléctrica, los neutrinos solo sienten la fuerza débil, de ahí se deriva la peculiaridad y dificultad para detectar a los neutrinos experimentalmente. Las partículas con carga eléctrica pueden detectarse porque dejan una huella en los detectores, y las partículas pesadas tienden a desintegrarse en otras partículas más ligeras, lo cual ayuda a su detección.

Las tres familias de fermiones se diferencian entre sí porque la masa de sus componentes aumenta para cada familia, además de otras propiedades intrínsecas de cada tipo de quark. Las partículas de materia están sujetas a cuatro fuerzas, y de ello se derivan las propiedades de la materia y, en general, los fenómenos que ocurren en nuestro universo. No obstante, el modelo estándar solo explica la acción de tres de estas cuatro fuerzas fundamentales: la débil, la fuerte y la electromagnética. Respecto a la fuerza de gravedad, sus efectos son despreciables a la escala de los experimentos de partículas y existen dificultades aún no resueltas para construir una teoría cuántica para esta fuerza.



Murray Gell-Mann y George Zweig

En el modelo estándar, las fuerzas actúan por medio de partículas mediadoras, conocidas como bosones de norma. La fuerza electromagnética es de largo alcance y gran intensidad y su mediador es el fotón. Por su parte, la fuerza débil es de alcance muy corto y baja intensidad, y sus mediadores son los bosones de norma W y Z. Por último, la fuerza fuerte es de alcance muy corto, pero intensidad fuerte, y sus mediadores se conocen como gluones (del inglés *glue* o pegamento).

La fuerza fuerte tiene una peculiaridad muy interesante, conocida como libertad asintótica, la cual es responsable de que los quarks no puedan aparecer libres: solo pueden estar dentro de los hadrones como el protón, el neutrón o los piones. El alcance de una fuerza se relaciona con la distancia a la que una partícula siente el efecto de la fuerza, y la intensidad se relaciona con la magnitud de la fuerza. Además de las partículas de materia y las mediadoras de las fuerzas, el modelo estándar predice la existencia del llamado bosón de Higgs, que es el remanente del llamado rompimiento espontáneo de la simetría de norma, mecanismo por el cual las partículas adquieren su masa.

El modelo estándar es una teoría simple y con alta consistencia teórica, cuyas predicciones han sido validadas por una enorme cantidad de datos recopilados en los experimentos de partículas realizados durante décadas. Sin embargo, esta teoría se considera incompleta, pues no tiene solución a algunos problemas fundamentales, como el enigma de la masa de los neutrinos, la materia oscura, el problema de la bariogénesis (por qué hay más materia que antimateria en el universo), la inclusión de la fuerza de la gravedad, el gran número de parámetros libres que deben determinarse experimentalmente, el problema de la jerarquía, entre otros.

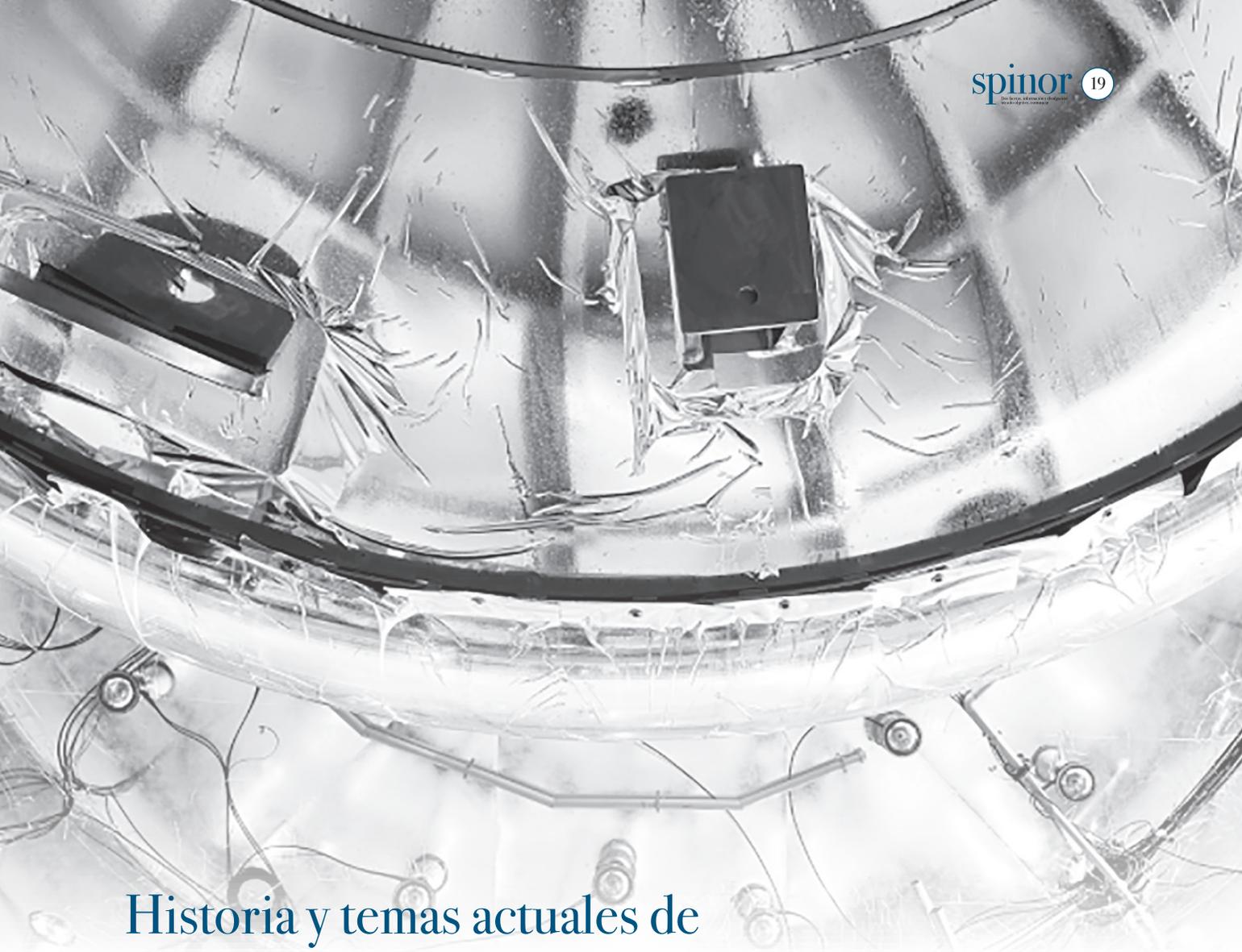
Aunque se han propuesto algunas teorías de extensión del modelo estándar con el fin de resolver este tipo de problemáticas, aún no hay evidencia experimental que indique cuál es el camino que debe seguirse para construir una teoría final de las partículas elementales. De lo contrario, esta permitiría explicar todos los fenómenos que ocurren en el universo y tendría la suficiente consistencia teórica. Quizá el tiempo dirá si la teoría que se realiza en la naturaleza es supersimetría, una teoría de gran unificación, un modelo con multipletes de Higgs, un modelo de leptoquarks, un modelo con simetría izquierda-derecha, un modelo de *little higgs* o algún otro.

Bibliografía

Close, Frank, *The Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*, Heinemann Educational, 1983.

Close, Frank, Michael Marten y Christine Sutton, *The Particle Odyssey: A Journey to the Heart of the Matter*; Oxford University Press, 2002.

't Hooft, Gerard, *Partículas elementales*, Editorial Crítica, 2017.



Historia y temas actuales de física de neutrinos

Azucena Bolaños

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores
de Monterrey

Omar G. Miranda

Departamento de Física, Centro de
Investigación y de Estudios Avanzados del IPN

Los neutrinos fueron propuestos por Pauli en el año 1930, en una de las más famosas cartas de la física. En esta carta, Pauli manifiesta la necesidad de la existencia de los neutrinos para explicar algunos decaimientos de los núcleos atómicos y el decaimiento del neutrón. En aquellos años en que la mecánica cuántica iba madurando y el conocimiento del interior del átomo y su núcleo iban en aumento, existían inconsistencias al observar la dinámica de las partículas que surgían de dichos decaimientos. Para solucionar estos problemas, la idea de Pauli fue proponer la existencia de una partícula adicional que no fuera detectada por los aparatos de medición de aquel tiempo, pero que interviniera sigilosamente en la dinámica de los decaimientos para hacer todo consistente. Pocos años después, la comunidad científica se dio a la tarea de estudiar esta propuesta y, además de reconocer su utilidad, notó que esta partícula era indetectable con la tecnología de la época.



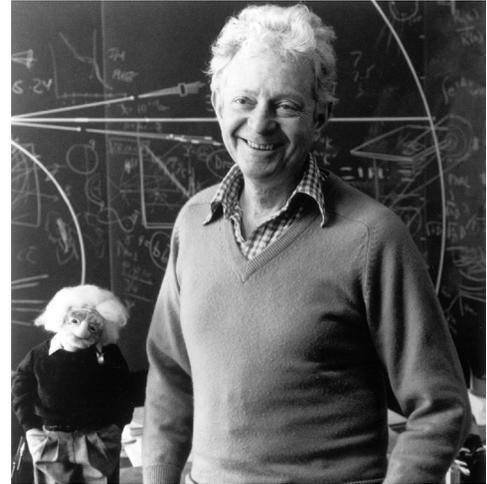
Reines y Cowan

Pasaron más de veinte años para que los neutrinos finalmente pudieran ser detectados por Reines y Cowan, en 1956. Por esta detección, Frederick Reines recibió el Premio Nobel de Física en 1995. Para este experimento, se utilizó un detector con agua y plásticos centelladores cerca de un reactor nuclear —esta es una técnica que se sigue usando hasta la fecha, aunque con tecnología más moderna—.

El que haya pasado más de un cuarto de siglo desde su postulación hasta que finalmente fueran detectados, da una idea al lector de lo débil que es la interacción del neutrino con la materia. Por otro lado, dado que participan de una gran cantidad de decaimientos radioactivos, son producidos en grandes cantidades en las estrellas, incluido el Sol. Cada segundo, diez mil millones de neutrinos atraviesan cada centímetro cuadrado de nuestra piel sin que produzcan ningún efecto en nuestro cuerpo.

En 1962 se descubrió el neutrino, y seis años después se confirmó la existencia de un segundo tipo de neutrino, en un experimento liderado por Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger. Actualmente, sabemos que existen tres tipos de neutrinos: el neutrino del electrón; el neutrino del muon (que es una partícula con propiedades idénticas al electrón, salvo que su masa es mayor y su tiempo de vida es finito), y el neutrino del tau (el tau también es una partícula con propiedades idénticas al electrón, pero con una masa aún mayor y con un tiempo de vida finito).

Posteriormente, el neutrino se describió dentro del formalismo de la mecánica cuántica, prediciendo que sus estados de interacción podrían cambiar con la distancia desde su punto de producción. Esta idea tuvo mayor relevancia a partir de que se estudiara el mecanismo por el cual el Sol produce energía, que está relacionado con interacciones nucleares que producen enormes cantidades de neutrinos. Los neutrinos solares se observaron con éxito desde 1968, con experimentos pioneros como el desarrollado por Raymond Davis Jr., quien utilizaba cloro como detector. Sin



Leon Lederman

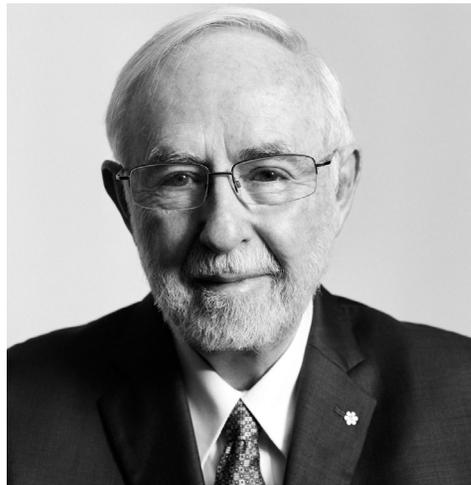
embargo, desde las primeras mediciones, se encontraron menos neutrinos que los predichos por el modelo solar, lo cual llevó a la comunidad científica a proponer distintas soluciones a estas mediciones; a esto se le conoció como el problema de los neutrinos solares.

A lo largo de los años se han realizado distintos experimentos para medir el flujo de neutrinos provenientes del Sol. Algunos de ellos siguen activos y detectando neutrinos solares. Otros, como el experimento SNO en Canadá, liderado por Arthur McDonald, jugaron un papel fundamental en el entendimiento de los neutrinos. Algunos de estos experimentos han medido los neutrinos solares por décadas, como el experimento de cloro antes mencionado y también el experimento Kamiokande, dirigido por Masatoshi Koshiba en Japón. Este último experimento continuó en una versión actualizada, llamada Super-Kamiokande, dirigida por el ahora premio Nobel de Física Takaaki Kajita, quien fue capaz de medir con

» En la época actual, los neutrinos juegan un papel primordial en la investigación de física de partículas, por lo cual numerosos experimentos están estudiando su naturaleza.



Masatoshi Koshiba



Arthur McDonald

» A lo largo de los años se han realizado distintos experimentos para medir el flujo de neutrinos provenientes del Sol. Algunos de ellos siguen activos y detectando neutrinos solares.

precisión los neutrinos generados por la interacción de los rayos cósmicos (partículas que llegan de objetos astrofísicos lejanos) con la atmósfera.

Tanto el problema de los neutrinos solares como la medición de los neutrinos atmosféricos permitieron demostrar que, con la distancia, los neutrinos cambian de identidad de manera periódica. Así, una parte de los neutrinos que se produjeron en el Sol como neutrinos del electrón se detectaron en la Tierra como neutrinos del muon o del tau. Esta característica de los neutrinos tiene importantes implicaciones en la física de las partículas elementales, empezando, por ejemplo, por la necesidad de que los neutrinos tengan masa.

En la época actual, los neutrinos juegan un papel primordial en la investigación de física de partículas, por lo cual numerosos experimentos están estudiando su naturaleza. Además, hay experimentos en construcción que arrojarán todavía más luz sobre las propiedades de esta enigmática partícula. Por ejemplo, el experimento *DUNE* (por sus siglas en inglés *Deep Underground Neutrino Experiment*) espera medir con exactitud uno de los parámetros que todavía es desconocido en el cuadro estándar de oscilaciones de neutrinos. Dicho parámetro se conoce como fase de violación de carga-paridad, y da cuenta de la posible

diferencia para interactuar entre los neutrinos y los antineutrinos con el resto de la materia.

Otro campo al que se dedican experimentos aún en construcción es la búsqueda de más estados de neutrinos, lo cual significa una extensión obligada al modelo estándar de partículas y a la descripción actual de la materia. En este caso, experimentos como *MicroBooNE*, *SBND* (Short-Baseline Near Detector) e *ICARUS* buscan probar de manera conjunta este tipo de hipótesis, mientras desarrollan nueva tecnología para medir la interacción de neutrinos.

Además de que se han observado neutrinos que provienen de fuentes artificiales (de manufactura humana), se estudian los neutrinos provenientes de fuentes extraterrestres lejanas. Tal es el caso de neutrinos producidos por explosiones de supernovas, explosiones de rayos gamma u otras fuentes como el centro galáctico; incluso, se estudian los neutrinos extragalácticos. Así, las indagaciones sobre el papel que jugaron los neutrinos cosmogénicos al inicio del Big Bang han tendido un puente entre la física de partículas y la cosmología, lo cual podría dar más luz respecto al funcionamiento del universo mismo.

Además de lo anterior, resultan relevantes las posibles aplicaciones que se han encontrado para estas interesantes partículas, por ejemplo, el estudio del interior terrestre usando las emisiones de neutrinos. Diferentes colaboraciones experimentales han hecho un gran esfuerzo por medir precisamente estos neutrinos, y está dando sus frutos.

Recientemente, se ha logrado realizar una tomografía de la Tierra usando como fuente a los neutrinos atmosféricos detectados en la Antártida, a través del experimento *IceCube*. Este experimento utiliza un kilómetro cúbico de hielo y, al llegar los neutrinos al detector, se observa que, en diferentes capas de la Tierra como el núcleo, estos son absorbidos por la materia ahí presente. De este modo, se logró realizar un perfil de densidad terrestre y, por

consiguiente, el mapeo de la Tierra. Este mapeo es el primero en su tipo y es complementario a los estudios geológicos que buscan entender cómo es el núcleo de la Tierra desde un punto de vista científico, igual de misterioso que el universo mismo. Por lo tanto, su estudio arrojará nuevo conocimiento que, en sí mismo, será fundamental en el progreso de la humanidad.

Otra aplicación que se ha discutido recientemente —aunque todavía es una propuesta— es la instalación de detectores de antineutrinos cerca de reactores nucleares, pues con ello se tendría un método exacto para cuidar del buen funcionamiento de los reactores alrededor del mundo. Pareciera muy lejano llegar a ver las aplicaciones de la física de neutrinos en la vida cotidiana; sin embargo, no olvidemos que esta nueva física nació relativamente hace poco tiempo y que, a la fecha, el montaje de los experimentos alrededor del mundo ha demostrado la genialidad de los científicos e ingenieros que trabajan en ellos.

Viendo el desarrollo de la física de neutrinos desde que fueron propuestos, hace más de noventa años, podemos percatarnos de que ha dado lugar a grandes descubrimientos y que, aun así, esta área de la física sigue

creciendo en interés con un amplio margen de desarrollo en la investigación de frontera.

En México, y en particular en la BUAP, se han graduado estudiantes que han incurrido en esta importante área de la física. Por lo tanto, se puede esperar que dicha dinámica continúe en futuras generaciones de estudiantes que podrán hacer aportaciones relevantes en este interesante tema.

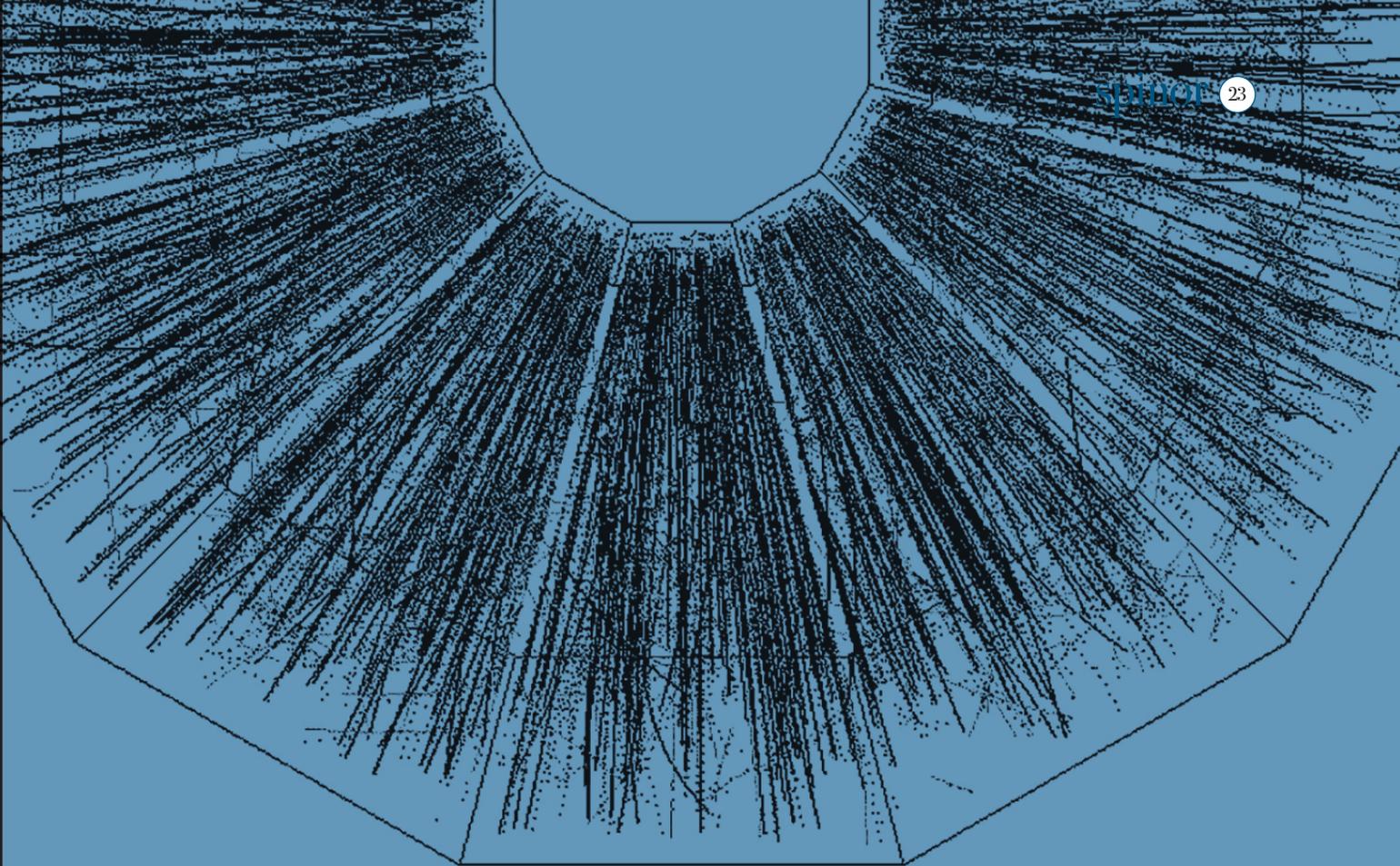
Referencias

- Nonini, A., Neutrino tomography of Heart, *Nature*, vol. 15, pp. 37-40, 2019.
 Pauli, W., Open Letter to Radioactive Persons, *Physics Today*, vol. 31, p. 27, 1978.
 Reines, F. y C. L. Cowan Jr., Detection of the Free Neutrino, *Physical Review Letters*, vol. 92, p. 330, 1953.
 The Nobel Prize, 23 de diciembre de 2022. Disponible en <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1988/press-release/>

Más información:

- Sobre DUNE: <https://bnf-dune.fnal.gov>
- Sobre MicroBoone, SBND e ICARUS: <https://icarus.fnal.gov/>
- Sobre Ice Cube: <https://icecube.wisc.edu/>





Explorando el pasado, descubriendo al

Diana Maya Sánchez

Facultad de Lenguas, BUAP

Mario Rodríguez Cahuantzi

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, BUAP

plasma de quarks y gluones

Y el universo está hecho de...

» Para crear plasma de quarks y gluones, es necesario que nuestro laboratorio sea capaz de reproducir condiciones similares a las del universo temprano, es decir, condiciones extremas de densidad de energía y temperatura.

De qué se compone el universo es una pregunta que posiblemente se remonta a los tiempos en que el ser humano comenzó a tener conciencia de sí mismo. Históricamente, encontramos que Empédocles de Agrigento, en la antigua Grecia hacia el siglo v a. C., propuso clasificar la materia o el mundo que nos rodea con cuatro elementos fundamentales: agua, aire, tierra y fuego. No es de extrañarse que esta clasificación se basara en los sentidos y en la experiencia diaria de las personas con su entorno. Sin embargo, entre los años 460 y 370 a. C., Demócrito de Abdera desarrolló un primer bosquejo de la teoría atómica del universo. En ella, propuso que los átomos son objetos invisibles, homogéneos, eternos, indivisibles, de diferentes tamaños, que se agrupan para formar la materia visible.

En la actualidad, un acelerador de 27 kilómetros de longitud, que está cien metros bajo tierra, colisiona iones de plomo y protones a estas velocidades.

Cabe resaltar que las ideas avanzadas de Demócrito son bastante similares a las desarrolladas durante el siglo xx, pero para estudiar el átomo que él propuso es necesario crear un experimento que nos permita reproducir las condiciones que dieron origen al universo. Además, nuestro arreglo experimental debe permitirnos visualizar la materia en escalas entre 10^{-10} m y 10^{-18} m. En términos de ciencia ficción, requeriríamos una máquina del tiempo que nos permitiera acercarnos a la Gran Explosión que dio origen al universo y que visibilizara la materia invisible.

Uno de los grandes logros del intelecto humano durante el siglo xx fue la construcción de un modelo matemático conocido como modelo estándar de la física de partículas, el cual describe la materia desde un punto de vista fundamental, estudiando las propiedades de las partículas y sus interacciones: nuclear fuerte, débil y electromagnética. Estas partículas son perceptibles solo a pequeñas escalas donde los sentidos del ser humano no son suficientes para estudiarlas.

En la actualidad, sabemos que, microsegundos posteriores a la Gran Explosión, el naciente universo estaba poblado por partículas fundamentales que formaron un estado de la materia conocido como plasma de quarks y gluones (QGP). Dicho estado es una predicción de la cromodinámica cuántica, teoría que describe la interacción nuclear fuerte que existe entre quarks y gluones. El QGP puede entenderse como una sopa "muy caliente" de partículas fundamentales que, al enfriarse, origina partículas con estructuras formadas por quarks y gluones. Un claro ejemplo son los protones y neutrones, que son partículas subatómicas que se encuentran en los núcleos atómicos. Estas, a su vez, están formadas por tres quarks que interactúan entre sí a través del intercambio de gluones.

Ahora, es importante resaltar la similitud entre las ideas generales del concepto de átomo que desarrolló Demócrito hace 2400 años y las desarrolladas en el marco del modelo estándar de la física de partículas. En ambos casos, las partículas (átomos

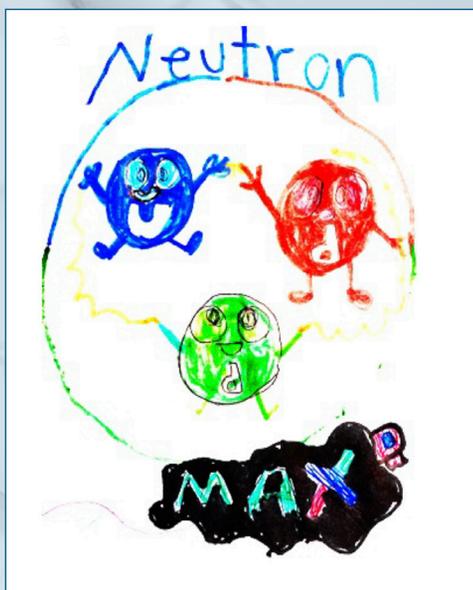


Figura 1. Caricatura del neutrón (izquierda) y protón (derecha), partículas del núcleo del átomo formadas por quarks, partículas fundamentales.

Ilustración de Diana Yaretzi y Ángel Maximiliano Rodríguez Maya.

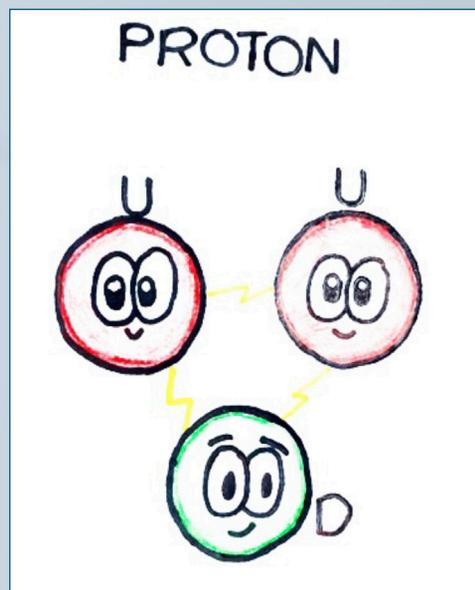


Figura 2. Representación del plasma de quarks y gluones.

Imagen tomada de <https://arstechnica.com/science/2018/12/quark-gluon-plasma-reveals-viscosity-free-properties/>

para Demócrito) se agrupan entre sí para construir materia visible más compleja con estructura. Es decir, las interacciones fundamentales entre partículas fundamentales dan estructura a la materia.

El universo temprano

Para crear plasma de quarks y gluones, es necesario que nuestro laboratorio sea capaz de reproducir condiciones similares a las del universo temprano, es decir, condiciones extremas de densidad de energía y temperatura. Esto significa alcanzar temperaturas de poco más de mil billones de grados centígrados (la temperatura del Sol es de quince millones de grados centígrados en el núcleo) y una densidad aproximada de doscientos millones de toneladas por centímetro cúbico, algo equivalente a compactar la masa de la pirámide del Sol en la cabeza de un alfiler. Estas condiciones existieron hace 13.7 mil millones de años, cuando se dio la Gran Explosión o Big Bang que originó al universo. Instantes después aparecieron partículas como protones, electrones, neutrones, fotones y neutrinos. Conforme el universo comenzó a enfriarse a una temperatura de 10^9 °C, los protones y electrones comenzaron a fusionarse para crear los primeros núcleos atómicos de elementos ligeros como el hidrógeno, helio, berilio y litio.

Se estima que, aproximadamente cien millones de años después de la Gran Explosión, cuando el universo tenía una temperatura aproximada de 10^4 °C, comenzaron a formarse elementos más pesados en los núcleos de las primeras estrellas, como el oxígeno, hierro y carbono, elementos también presentes en los seres vivos. Esto quiere decir que las partículas que forman los átomos de nuestro cuerpo en algún momento estuvieron en las estrellas.

Recreando la materia primordial

Para recrear condiciones similares a las del universo temprano es necesario colisionar iones pesados. Esto se logra dentro de un



Figura 3. Esquema del acelerador LHC en el CERN. Imagen tomada de <https://cds.cern.ch/record/2684277>

anillo donde los núcleos de plomo alcanzan 99.9999997 % de la velocidad de la luz. En la actualidad, un acelerador de 27 kilómetros de longitud, que está cien metros bajo tierra, colisiona iones de plomo y protones a estas velocidades. Esta máquina es conocida como el gran colisionador de hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) y se ubica en la frontera francosuiza en el laboratorio conocido como Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN, por sus siglas en francés).

A lo largo del LHC se construyeron cuatro detectores de partículas, cuyo objetivo es registrar las colisiones que ocurren en él y, además, reconstruir las propiedades de las partículas generadas en estos sistemas físicos. Básicamente, con el LHC y sus experimentos se recrean las condiciones del universo temprano —recordemos nuestra máquina del tiempo— y se registra la creación de partículas subatómicas —materia invisible—. En la actualidad, el LHC es el colisionador más poderoso del mundo y es considerado la máquina más compleja que hasta ahora haya construido el ser humano.

Lo que sabemos del plasma de quarks y gluones

El experimento en LHC, dedicado al estudio del plasma de quarks y gluones, es ALICE (A

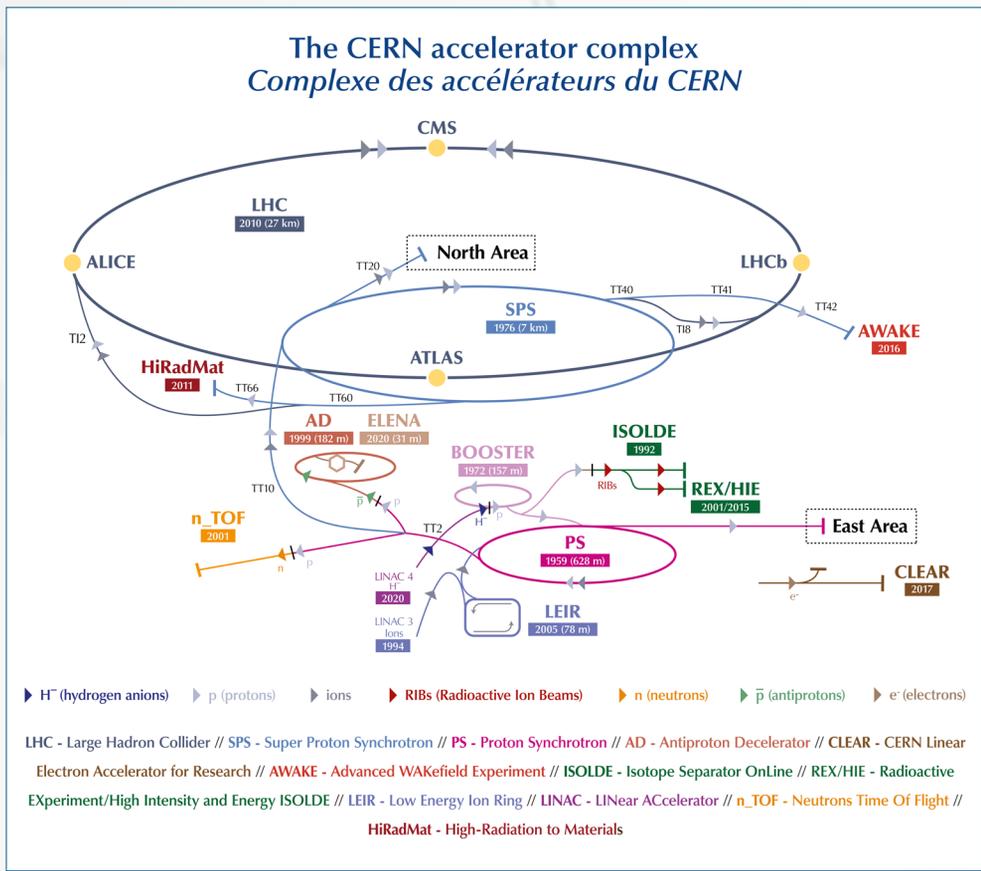


Figura 4. Detectores ACORDE, AD y VZERO en ALICE.
Vista al futuro para entender al pasado

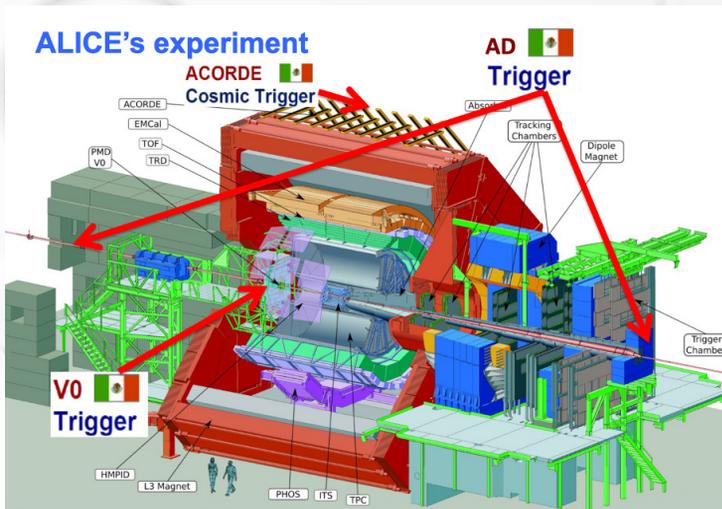
Resultados recientes también han mostrado evidencia de la formación de gotas del plasma de quarks y gluones en sistemas físicos pequeños creados en colisiones de protones.

Large Ion Collider Experiment). La primera colisión que registró este experimento tuvo lugar el 23 de noviembre de 2009. Uno de sus primeros objetivos fue confirmar la observación del plasma de quarks y gluones reportada en el año 2000 en los colisionadores Super Proton Synchrotron (SPS) del CERN y Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) del laboratorio Brookhaven de Estados Unidos. A partir de ese momento comenzó una intensa campaña de toma de datos para profundizar en el conocimiento de este plasma, lo cual es equivalente a estudiar las propiedades de la materia que existió instantes después de la Gran Explosión.

Es natural pensar que, al inicio, el universo era un gas; sin embargo, el experimento ALICE y el CERN reportaron que el plasma de quarks y gluones creado en las colisiones del LHC se comporta como un líquido instantes previos a su enfriamiento y posterior

formación de partículas subatómicas. Por otra parte, resultados del RHIC muestran que en este líquido se forman vórtices con grandes velocidades; es decir, la materia creada instantes posteriores a la Gran Explosión se comportaba como un líquido con remolinos más violentos que en cualquier otro fluido.

Resultados recientes también han mostrado evidencia de la formación de gotas del plasma de quarks y gluones en sistemas físicos pequeños creados en colisiones de protones. Esto ha sucedido incluso en colisiones fotonucleares, donde fotones colisionan con nucleones (protones) que forman a los iones de plomo. Este tipo de resultados son sorprendentes, pero, sobre todo, generan oportunidades para estudiar el QGP en otro tipo de sistemas a diferentes energías, desde sistemas formados en colisionadores hasta los creados por rayos cósmicos primarios que impactan la atmósfera de la Tierra.



Contribución de México en esta aventura

Este tipo de experimentos son de gran envergadura debido a que profundizan en la comprensión de la materia desde un punto de vista fundamental. En México existen varios grupos de investigación que han contribuido con la construcción del experimento ALICE-LHC del CERN. Grupos de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y la Universidad Autónoma de Sinaloa, así como grupos de los Institutos de Física y Ciencias Nucleares de la UNAM y el Departamento de Física del Cinvestav, han participado en ALICE desde el año 2000. Estos grupos desarrollaron tecnología para diseñar y construir detectores de partículas subatómicas (de nuevo Demócrito: hacer visible lo invisible).

De los dieciocho sistemas que conforman el experimento ALICE, tres fueron aportación del grupo mexicano ACORDE, sistema utilizado para la identificación de muones; VZERO, sistema utilizado para la identificación de colisiones, y AD, un detector para la identificación de procesos difractivos en colisiones entre protones. De este modo, México contribuyó con el diseño, la construcción y operación de 17 % del experimento ALICE.

Entender las propiedades fundamentales de la materia ha sido una tarea de al menos un par de miles de años. El avance logrado en este tiempo ha permitido que el ser humano caracterice la materia desde sus componentes fundamentales. Ahora sabemos que el universo temprano se comportaba como un líquido dentro del cual se formaban vórtices con grandes velocidades. Los últimos resultados indican que gotas de este medio, el plasma de quarks y gluones, se formarían en sistemas más pequeños que los creados en colisiones entre iones pesados.

Además, se ha aprendido bastante sobre cómo era el universo instantes posteriores a la Gran Explosión que lo creó, pues el ser humano ha desarrollado máquinas que permiten dar un vistazo al pasado. Para el futuro, se plantea crear una versión mejorada del experimento ALICE, con lo cual se buscará entender la naturaleza

Resultados recientes también han mostrado evidencia de la formación de gotas del plasma de quarks y gluones en sistemas físicos pequeños creados en colisiones de protones.

de las interacciones entre los bloques fundamentales de la materia con alta energía (quarks y gluones). También, se pretende entender la naturaleza de los procesos que ocurren cuando el plasma de quarks y gluones se enfría. Este experimento de nueva generación es conocido como ALICE3. En esta nueva aventura, un grupo de investigadores de México participará con la propuesta de un detector de partículas conocidas como muones. Se aspira a que ALICE3 comience a operar en el año 2032. Esperemos vernos en este espacio para ese entonces.

Bibliografía

- ALICE Collaboration, Elliptic flow of charged particles in Pb-Pb collisions, *Physical Review Letter*, vol. 105, 2010.
- ALICE Collaboration, Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions, *Nature Physics*, vol. 13, pp. 535-539, 2017.
- ALICE Collaboration, Letter of intent for ALICE 3: A next-generation heavy-ion experiment at the LHC, 2022. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/2211.02491>
- Busza, Wit, Krishna Rajagopal y Wilke van der Schee, Heavy Ion Collisions: The Big Picture and the Big Questions, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 68, pp. 339-376, 2018.
- Escalante, Sergio y Laura Gasque, El origen de los elementos y los diversos mecanismos de nucleosíntesis, *Educación Química*, vol. 23, núm., pp. 62-68, 2012.

¡No es un problema de familia... sino de sabor!

O. Félix-Beltrán, E. Barradas-Guevara
F. González-Canales, M. Zeleny-Mora

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

La materia ordinaria que compone las cosas con las cuales interactuamos diariamente, e inclusive a nosotros mismos, está formada por ladrillos fundamentales sin una estructura interna y se les conoce como partículas elementales. Estas partículas constituyen los átomos de los elementos químicos y, a su vez, las moléculas que forman toda la materia.

La relevancia de las partículas elementales o sin estructura, como el electrón, se debe a que el protón está constituido por tres quarks, o sea, precisamente partículas elementales de carga eléctrica fraccionaria y carga de color. Asimismo, los neutrones son partículas que están constituidas por tres quarks, solo que, a diferencia del protón, son eléctricamente neutros. De este modo, para explicar toda la materia conocida, únicamente necesitamos quarks y electrones.

Cuando se habla del *sabor* en física de partículas, se trata del modelo estándar de la física de partículas (Langacker, 2010), que es la teoría más exitosa actualmente. Las partículas en este modelo se clasifican en una "tabla periódica" (leptones y quarks), donde las partículas elementales se dividen en tres familias o generaciones. En el marco de este modelo, las partículas pueden interactuar solo con los integrantes de su misma familia y con los llamados *bosones de norma*, partículas intermediarias correspondientes a las diferentes interacciones de la naturaleza: electromagnética (fotón), débil (bosones) y fuerte (gluones).

Cada familia contiene un neutrino, cuya masa es nula. En estas condiciones y para evidenciar la simetría que el modelo estándar presenta entre las familias leptónicas, se define la *simetría*

de sabor leptónico. Esta es una simetría exacta que se da en el modelo estándar mientras los neutrinos se consideren como partículas sin masa.

El modelo estándar se enmarca en la teoría cuántica de campos. En dicha teoría, tienen lugar los espinores, elementos matemáticos de un espacio vectorial que representan campos asociados a partículas elementales. Estos se usan para describir los distintos fenómenos físicos y son caracterizados por medio de etiquetas que, formalmente, se conocen como números cuánticos.

El llamado sabor de una partícula elemental es una de estas etiquetas y nos permite distinguir a los fermiones entre sí. Antes de que las partículas adquieran masa a través del rompimiento espontáneo de la simetría de norma —en donde está involucrada la llamada partícula de Dios (el bosón de Higgs)— (Lederman, 2006), los fermiones de las distintas familias son indistinguibles. Es hasta que se rompe la simetría que las partículas se diferencian por el valor de su masa; por ello, se asigna una *etiqueta de sabor* a cada partícula, para distinguirlas entre sí.

En la siguiente tabla se resumen estas tres familias, constituidas por los quarks y leptones.

Familia	Quark	Masa	CE	Lepton	Masa	CE
Primera	u (up)	2.16 MeV	2/3	(neutrino e)	< 15 eV	0
	d (down)	4.67 MeV	-1/3	e (electrón)	0.511 MeV	-1
Segunda	c (charm)	1.27 GeV	2/3	(neutrino)	< 190 KeV	0
	s (strange)	93 MeV	-1/3	(muon)	105.159 MeV	-1
Tercera	t (top)	172.76 GeV	2/3	(neutrino)	< 18.2 MeV	0
	b (bottom)	4.18 GeV	-1/3	(tau)	1776.86 MeV	-1

*CE: carga eléctrica en unidades e.

En la tabla se muestran la carga eléctrica y la masa aproximada de cada partícula. La masa está dada en unidades de energía, usando la equivalencia entre la masa y la energía establecida por la teoría de la relatividad. Por su parte, las antipartículas asociadas tienen carga eléctrica opuesta; por ejemplo, el positrón antipartícula del electrón tiene carga eléctrica +1, y así con las demás.

Podemos destacar que las masas de las partículas de la primera familia son menores a las otras. Asimismo, las partículas más pesadas son los quarks, seguidos de los leptones cargados, mientras las partículas más diminutas son los neutrinos y sus masas están muchos órdenes de magnitud lejos de las demás.

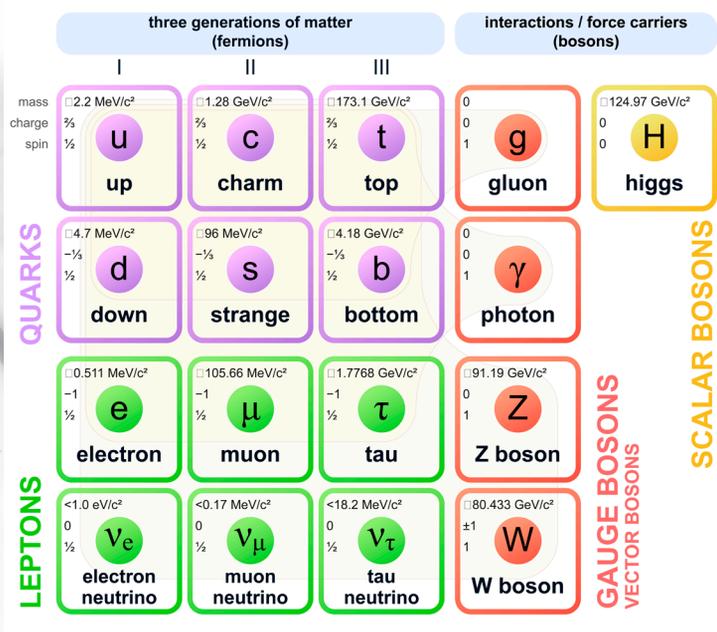
Los neutrinos tienen la cualidad de oscilar entre sí, por ejemplo, un neutrino emitido por alguna fuente (como el Sol), a lo largo de su viaje puede encontrarse en el estado ν_e con una cierta probabilidad almacenada en la matriz de mezcla de sabor leptónico. La explicación formal a este fenómeno es que los neutrinos de sabor (o de familia), ν_e, ν_μ, ν_τ son combinaciones lineales de los estados fundamentales, ν_1, ν_2, ν_3 . Así, la matriz de mezcla describe qué parte de ν_e, ν_μ, ν_τ contiene cada uno de los neutrinos de sabor, ν_1, ν_2, ν_3 . De esta manera, un neutrino de sabor puede ser detectado en una combinación o mezcla particular de los estados fundamentales.

En el sector de quarks sucede un fenómeno similar; sin embargo, estos son partículas confinadas: no son libres y solo forman parte de partículas compuestas como neutrones y protones. Por lo tanto, en este caso, la mezcla de sabor de los quarks almacenada en la matriz V_{CKM} se manifiesta a través de la oscilación de partículas compuestas, como los mesones K, D, B , que contienen un antiquark s y un quark b . No obstante, a partir de la medición experimental de la oscilación de los neutrinos, y con ello el descubrimiento de su masa no nula, la simetría del sabor leptónico se rompe. Esto implica que



El llamado sabor de una partícula elemental es una de estas etiquetas y nos permite distinguir a los fermiones entre sí.

Standard Model of Elementary Particles



Este proceso de desintegración está prohibido en el modelo estándar; sin embargo, se predice que se producirá en modelos de física más allá de este modelo.

las interacciones que antes estaban blindadas y podían darse solo entre partículas de la misma familia, ahora se pueden dar entre las partículas elementales de diferentes familias. Esto se conoce como la *violación del sabor leptónico* (Feruglio, 2015).

Debido a que en el modelo estándar la simetría de sabor leptónico es exacta y los neutrinos no tienen masa, los físicos teóricos se han dado a la tarea de construir modelos en los que sí se consideren los neutrinos masivos. Así, se busca medir la violación de sabor leptónico proveniente de diferentes interacciones entre partículas elementales de diferentes familias. De tal manera, la detección de una señal de violación de sabor leptónico constituiría una clara evidencia de física, más allá del modelo estándar.

Teóricamente, muchos modelos de la nueva física incluyen vértices que naturalmente rompen la simetría del sabor, por ejemplo, en extensiones del modelo estándar con neutrinos masivos y/o dos o más

campos de Higgs, donde encontramos nuevas partículas. Además, se tiene la colaboración de MEG (Muon to electron gamma), el cual es un proyecto experimental que busca observar el fenómeno de "desintegración de muon a electrón fotón ($\mu e \gamma$)" en donde un muon se descompone en un electrón mientras emite un rayo gamma (Baldini, 2016). Este proceso de desintegración está prohibido en el modelo estándar; sin embargo, se predice que se producirá en modelos de física más allá de este modelo. De esta forma, la búsqueda de procesos que violan el sabor leptónico en colisionadores, actuales y futuros, es inevitable, pues se cuenta con cotas experimentales, pero no con una detección directa.

En conclusión, el problema no es de familia... sino de sabor.

Bibliografía

- Baldini, A. et al. (2016). Search for the Lepton Flavour Violating Decay $\mu \rightarrow e \gamma$ with the Full Dataset of the MEG Experiment. *The European Physical Journal*, 76(434), 1-30.
- Feruglio, F. (2015). Pieces of the flavour puzzle. *The European Physical Journal*, 75(373), 1-18.
- Langacker, P. (2010). Introduction to the Standard Model and Electroweak Physics. En *Theoretical Advanced Study and Electroweak Physics, The dawn of the LHC era* (pp. 3-48). Boulder, Colorado: TASI.
- Lederman, L. A. (2006). *The God particle: If the Universe is the answer, what is the question?* Boston: A Mariner Book, Houghton Mifflin Company.

Neutrinos más allá del modelo estándar

Héctor Novales Sánchez

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas BUAP

Mónica Salinas Ibáñez

Departamento de Física, Centro de Investigación y Estudios Avanzados

Los estudios teóricos sobre los fenómenos físicos cuántico-relativistas se realizan en el marco de la teoría cuántica de campos (TCF). El modelo estándar de las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes, es una teoría de campos formulada bajo el principio de simetría y caracterizada por la notable belleza de su intrincada estructura matemática. La comunidad científica dedicada a la investigación de la física de las partículas elementales coincide en que el MODELO ESTÁNDAR encarna la mejor descripción de física fundamental con la que contamos, en virtud del respaldo de datos provenientes de algunos de los dispositivos experimentales más sensibles y complejos jamás construidos por la humanidad (Workman et al., 2022). Entre ellos, destaca el gran colisionador de hadrones, situado en las instalaciones de la Organización Europea para la Investigación Nuclear, mejor conocida por sus siglas en francés: CERN.

Desde la perspectiva de la TCF, las partículas elementales se identifican como los cuantos de los campos involucrados en una descripción dada, como es el caso del modelo estándar. Los campos de Dirac se asocian a partículas fermiónicas, de las cuales hay dos tipos: seis quarks, sensibles a todas las interacciones, y seis leptones, que responden solo a las interacciones electromagnética y débil, entre los cuales se encuentra el electrón.

Los campos de gauge, por otra parte, definen las interacciones fundamentales y se asocian a partículas elementales como el fotón, el cual corresponde a la interacción electromagnética y es mejor conocido por ser la partícula de luz. Los bosones de gauge W y Z caracterizan a la interacción débil, en tanto que los gluones se vinculan a la interacción

Los bosones de gauge W y Z caracterizan a la interacción débil, en tanto que los gluones se vinculan a la interacción fuerte.

» Las oscilaciones de neutrinos jugaron un papel crucial en la correcta medición de neutrinos que llegan a la Tierra a partir de los procesos de fusión nuclear que mantienen vivo al Sol.

fuerte. Además, el modelo estándar incluye el campo de Brout-Englert-Higgs, el cual participa en la generación de las masas de las partículas elementales.

Los neutrinos son leptones eléctricamente neutros, cuyas masas son las más pequeñas de entre todas las partículas medidas. La descripción de los neutrinos en el modelo estándar es, estrictamente, incorrecta, aunque funciona como una aproximación razonable. En 1930, con el fin de resolver una aparente violación de la conservación de la energía en el proceso físico conocido como doble decaimiento beta, Pauli propuso la existencia del neutrino. Carente de carga eléctrica, se creyó que este era imposible de medir y, sin embargo, en 1956 fue observado por primera vez en los experimentos de Hanford y Savannah River (Cowan et al., 1956). La neutralidad eléctrica de estas partículas planteó otros retos, entre los cuales destacó la determinación de si los neutrinos son o no masivos, lo que sería respondido casi setenta años después. Entre tanto, la definición del modelo estándar incluyó la suposición de que los neutrinos eran partículas sin masa, lo cual es consistente con los datos experimentales conocidos sobre las llamadas interacciones débiles quirales y la descripción de Weyl de los fermiones sin masa.

Hasta ahora se han detectado tres sabores o tipos diferentes de neutrinos. En los años cincuenta, Bruno Pontecorvo desarrolló investigaciones teóricas de un fenómeno cuántico conocido como las oscilaciones de neutrinos (Pontecorvo, 1957). De acuerdo con este, si un neutrino de algún tipo es emitido por una fuente como el Sol y los reactores nucleares, y dicha partícula viaja a través de una distancia considerable, es probable que se mida un neutrino de tipo diferente. Es decir, lo que se produce no necesariamente coincide con lo que se observa. Para que esto se cumpla, es necesario que los neutrinos tengan masa, con todas las masas diferentes entre sí.

Las oscilaciones de neutrinos jugaron un papel crucial en la correcta medición de neutrinos que llegan a la Tierra a partir de los procesos de fusión nuclear que mantienen vivo al Sol. Los experimentos realizados en Super-Kamiokande y Sudbury Neutrino Observatory midieron, respectivamente en 1998 (Fukuda et al., 1998) y en 2002 (Ahmad et al., 2002), flujos de neutrinos solares y confirmaron, por primera vez, dichas oscilaciones.

Si bien la formulación de los fermiones desarrollada por Paul Dirac (1928) fue la utilizada para definir al modelo estándar, Ettore Majorana (1937) exploró partículas fermiónicas que coinciden con sus antipartículas correspondientes, en contraposición a los fermiones de Dirac. Debido a que las partículas y sus antipartículas tienen cargas de la misma magnitud, aunque de signos opuestos, las únicas partículas conocidas que llenan este requisito son los neutrinos. Así, pues, una de las preguntas actuales más relevantes de la física de partículas es: ¿son los neutrinos partículas de Dirac o de Majorana? El proceso físico que podría dar la respuesta es el doble decaimiento beta sin neutrinos,



en el cual un núcleo atómico emite espontáneamente un electrón y un positrón, mas no neutrinos. Dicho proceso físico solo puede ocurrir si los neutrinos son partículas de Majorana.

Los dispositivos experimentales que buscan el doble decaimiento beta sin neutrinos se construyen reuniendo grandes cantidades de material, como germanio o molibdeno, cuyos núcleos inestables van decayendo con el tiempo y donde se espera observar dicho proceso. A pesar del gran número de colaboraciones experimentales involucradas en esta búsqueda, a lo largo de muchos años, este proceso nunca ha sido medido y, más bien, se sabe que, si realmente pudiera ocurrir en la naturaleza, sería extremadamente raro (Workman et al., 2022).

El tema de las masas de los neutrinos, cuyo origen y tamaño son desconocidos, ostenta gran relevancia. Independientemente de si los neutrinos son de Dirac o de Majorana, los datos experimentales actuales sitúan a dichas masas por debajo de los 0.8 electronvoltios (Aker et al., 2022). Para comparar, el electrón, que es una partícula sumamente ligera, tiene una masa de alrededor de 510 999 electronvoltios. Si los neutrinos son partículas de Majorana, quizá existan neutrinos extras, si bien con masas muy grandes, a los cuales nos referimos como neutrinos pesados. Las masas de estos neutrinos pesados podrían conectarse con las de los neutrinos conocidos, de tal forma que la ligereza de los segundos estuviese asociada a la gran masa de los primeros (Mohapatra y Senjanovic, 1980).

De acuerdo con la $\tau\tau\tau$, toda interacción ocurre mediante el intercambio de partículas en intervalos de tiempo brevísimos. Los neutrinos pesados podrían participar en este intercambio, produciendo pequeños efectos que cambiarían las mediciones experimentales de cantidades físicas, en comparación con las predicciones del modelo estándar. Los dispositivos experimentales de alta precisión podrían ser capaces de observar estas diferencias minúsculas.

Nunca se han observado interacciones entre los neutrinos y el campo electromagnético, por lo cual siempre se ha supuesto que estos son eléctricamente neutros. Empero, hemos aprendido que el comportamiento de los sistemas cuánticos a menudo reta la intuición heredada de nuestra experiencia cotidiana. Como ejemplo de esto, la $\tau\tau\tau$ permite dichas interacciones. Si suponemos que los neutrinos del modelo estándar tienen masa, las predicciones que resultan sugieren que la sensibilidad experimental actual se encuentra sumamente lejos de medir estas interacciones (Broggini, Giunti y Studenikin, 2012). Sin embargo, es plausible que existan efectos de física desconocida que incrementen la intensidad de la interacción electromagnética de los neutrinos, dejándola al alcance de experimentos en un futuro cercano.

Los autores agradecen el apoyo económico del SNI-CONACYT.



Bruno Pontecorvo

Referencias

- Workman, R. L. et al. (2022). Progress of theoretical and experimental physics. *Review of Particle Physics*, (8), 083C01.
- Cowan, C. L., Reines, F., Harrison, F.B., Cruse, H. W. y McGuire, A. D. (1956). Detection of the Free Neutrino: a Confirmation. *Science*, 124(3212), 103-104.
- Pontecorvo, B. (1957). Mesonium and anti-mesonium. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 6, 429.
- Fukuda, Y. et al. (1998). Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos. *Physical Review Letters*, 81, 1562.
- Ahmad, Q. R. et al. (2001). Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Physical Review Letters*, 89, 011301.
- Dirac, P.A.M. (1928). The quantum theory of the electron. *Proceedings of the Royal Society*, 117, 610-624.
- Majorana, E. (1937). Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone. *Nuovo Cimento*, 14, 171.
- Aker, M. et al. (2022). Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. *Nature Physics*, 18, 160-166.
- Mohapatra, R. N. y Senjanovic, G. (1980). Neutrino Mass and Spontaneous Parity Nonconservation. *Physical Review Letters*, 44, 912.
- Broggini, C., Giunti, C. y Studenikin, A. (2012). Electromagnetic Properties of Neutrinos. *Advances in High Energy Physics*, 459526.

El Mecanismo de Higgs:

materia OSCURA

y evolución del universo

Jaime Hernández-Sánchez

Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP

Actualmente, uno de los temas más apasionantes en la frontera de la física es el mecanismo de Higgs y, como remanente de este proceso, la partícula de Higgs, que, en conjunto, se manifiestan en la naturaleza a nivel de partículas elementales.

Empezaremos con una descripción sencilla de lo que entendemos como partícula elemental. Para esto, asumiremos que el lector sabe que todo lo percibido por nuestros cinco sentidos está hecho de átomos. Recordemos que los átomos están conformados por electrones con carga eléctrica negativa que, a su vez, se mueven alrededor de un núcleo con carga eléctrica positiva, y que los núcleos están formados por protones y neutrones (Sears *et al.*, 2005). Por otra parte, entre los años de 1967 y 1973, mediante experimentos que resultaron de la colisión de electrones sobre protones en el Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), se descubrió que los protones están formados de otras partículas llamadas quarks (up y down) (Lubkin, 1991).

Los quarks son partículas que tienen propiedades adicionales a los electrones; además de tener carga eléctrica, poseen la llamada carga de color. Esta genera una fuerza más intensa que la fuerza electromagnética y se acciona cuando un agente externo con suficiente energía trata de separar a los quarks. De hecho, hay una partícula elemental que realiza esta labor de "pegamento", llamada gluon (Kane, 1993). Esta interacción, llamada fuerza fuerte, explica por qué los protones están confinados en el núcleo. En particular, el protón está formado por dos quarks up y un quark down. Mientras, el neutrón está constituido por dos quarks down y un quark up (véase la figura 1).

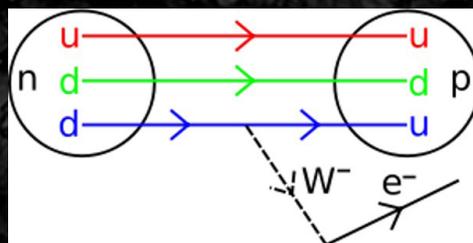


Figura 1. Constituyentes de los protones y neutrones, los resortes serían los gluones (imagen tomada de Wikipedia).

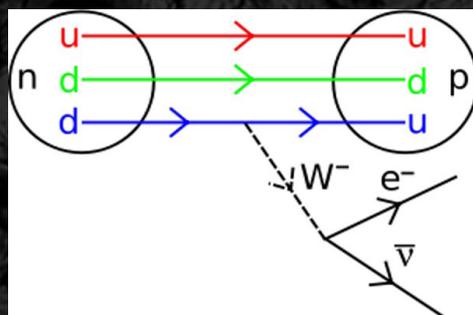


Figura 2. Desintegración del neutrón explicado con partículas elementales (imagen tomada de Wikipedia).

Hoy en día, sabemos que los electrones y los quarks son partículas elementales; es decir, que no están compuestas de otras partículas. Por otra parte, se establece que el neutrón puede desintegrarse a un protón, a un electrón y a un antineutrino del electrón (véase la figura 2). En este proceso, se requiere la existencia de una partícula con carga eléctrica -e llamada bosón W^- , la cual debe tener una masa pesada para explicar que la fuerza asociada es de corto alcance (Kane, 1993).

Justo aquí podemos empezar a hablar del rol que tiene el mecanismo de Higgs en este proceso y, en general, con las partículas elementales y la evolución del universo. Intuitivamente, para que una partícula con masa M se pueda desintegrar en otras partículas, M debe ser mayor a la suma de las masas de las partículas resultantes. Dicho de otra forma, un objeto de masa menor no puede partirse en objetos de masa mayor. Por tanto, para que se lleve a cabo la desintegración de la figura 2, la masa del neutrón debe ser mayor a la masa del protón. Por otra parte, de acuerdo con la figura 1, la masa del neutrón sería la suma de la masa del quark up, dos veces la masa del quark down y la energía asociada a la fuerza fuerte que une los quarks debido a los gluones.

La energía de los gluones es muy grande y, de hecho, representa más de 90 % de la masa del neutrón. En principio, una buena aproximación es considerar a las masas del quark up y down igual a cero. Lo mismo pasaría con la masa del protón: podríamos asumir que las masas de los quarks son nulas. Sin embargo, si no tomamos la contribución de las masas de los quarks, obtendríamos que la masa del protón sería mayor a la masa del neutrón, lo cual permitiría la desintegración del protón. Pero la desintegración del protón no ha sido observada en ningún experimento y se considera una partícula estable. Además, si el protón se desintegrara, no habría átomos, así que la contribución de la masa de los quarks es importante.

Ya tenemos dos argumentos importantes para que se construya un mecanismo para dar masa, tanto al bosón W^- como a los quarks. De hecho, en la naturaleza hay una propiedad subatómica asociada a estas partículas, la cual se llama carga débil (Kane, 1993). Aunque al describir las masas de las partículas tratadas fue fácil introducirlas matemáticamente, estas expresiones no eran compatibles con los experimentos. No obstante, esto se corrigió introduciendo un campo escalar homogéneo que se propaga en todo el espacio tiempo, campo asociado al vacío cuántico y que frenaría el movimiento de las partículas que interactúan con él. El lector entonces se preguntará ¿y qué es un campo?

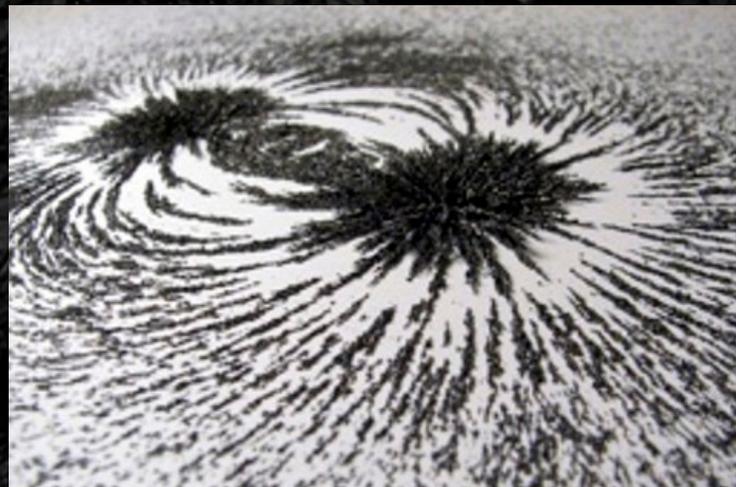


Figura 3. Líneas del campo magnético de un imán de barra.

Un campo se propaga en el espacio y es la manifestación de la materia debido a cierta propiedad que posee, midiéndose en todo instante. Por ejemplo, un imán genera un campo magnético, y podemos visualizar las líneas del campo magnético cuando ponemos al imán debajo de una hoja de papel y distribuimos limaduras de hierro sobre ella (véase la figura 3).

El campo de Higgs se propaga en todo el espacio-tiempo y es una especie de enrejado de puntos asociados al vacío cuántico, el cual inicialmente tenía un mínimo de energía nulo. Se considera que, en

» La energía de los gluones es muy grande y, de hecho, representa más de 90 % de la masa del neutrón.

» La energía oscura es complementaria a toda la materia, por lo cual se debe considerar que esta actúa contraria a la fuerza gravitacional; de este modo, ocasiona la aceleración de cúmulos de galaxias entre sí

alguna edad temprana del universo, este mínimo se excitó, adquiriendo un valor de energía distinto de cero; de hecho, muy grande (más de 240 veces la masa del protón). Cuando ocurrió esto, el campo de Higgs empezó a identificar propiedades de las partículas elementales y a proveer de masa a algunas de ellas; eso es justamente el mecanismo de Higgs (Peter Higgs, 1964). Se puede pensar que había una simetría homogénea: en cualquier dirección del espacio, todas las partículas detectadas en los experimentos y que interactúan con el campo escalar carecían de masa. Y, con el accionar del mecanismo de Higgs (que es un violento cambio en el mínimo de energía del vacío cuántico), se generan masas en los quarks, leptones cargados como el electrón, y en los bosones W, Z. Así, a los hijos del mecanismo de Higgs o remanentes de este proceso se les llamará partículas de Higgs.

Podemos decir que la simetría que había se rompió espontáneamente por la violenta excitación del vacío cuántico, pero este mecanismo es muy discriminatorio: a algunas partículas les proporciona masas muy pequeñas como al electrón y a los quarks up y down; en otros casos, provee masas muy pesadas, como a las partículas asociados al campo débil de los bosones W, Z y a un quark llamado top (con alrededor de 175 veces la masa del protón). ¿Por qué hace esto? No lo sabemos todavía, solo entendemos que a las partículas que no tienen carga débil el campo de Higgs no les

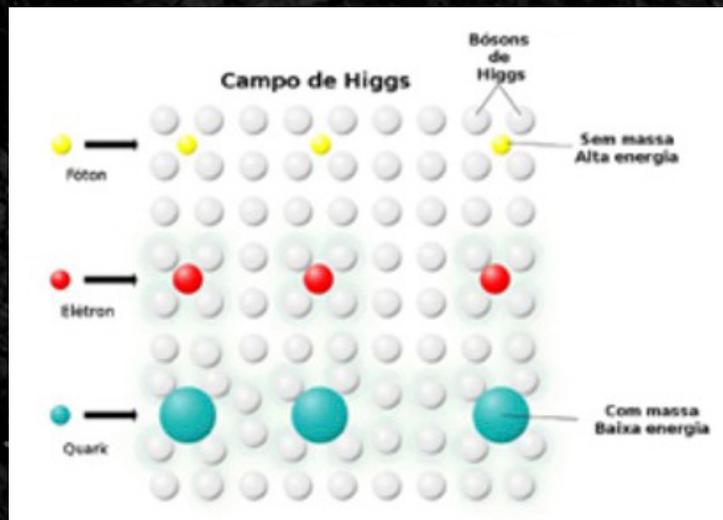


Figura 4. Campo de Higgs actuando con las partículas elementales.

hace caso y no adquieren masa, como ocurre con los fotones y gluones (véase la figura 4).

En la expresión matemática más simple del campo de Higgs, solo hay una partícula de Higgs desprendida como remanente del mecanismo de Higgs. Esta partícula, con una masa del orden de 125 veces la masa del protón, fue descubierta hace diez años y probó que el mecanismo de Higgs era correcto.

Posibles conexiones del mecanismo de Higgs con la materia oscura

La materia oscura se ha logrado detectar por sus efectos gravitacionales. De manera simple, podemos pensar que las estrellas más alejadas de una galaxia tendrían que desprenderse o separarse de la galaxia con cierta facilidad (de acuerdo con la ley gravitacional de Newton). Incluso, se podría estimar que las velocidades de las estrellas distantes del centro de la galaxia son muy bajas; sin embargo, se ha observado que las velocidades de las estrellas más alejadas no son consistentes con la descripción de la fuerza gravitacional. De acuerdo con la observación experimental, el esquema que la describiría tendría sentido si hubiera masa invisible en las galaxias, y esa masa debería ser mucho mayor a la masa del conjunto de las estrellas que están radiando. En cualquier dirección del universo se ha visto el mismo comportamiento; a esa materia invisible se le llama materia oscura. En principio, esta materia no tendría que decaer a otras partículas, pues emitiría radiación, así que no puede interactuar con quarks y leptones.

La energía oscura es complementaria a toda la materia, por lo cual se debe considerar que esta actúa contraria a la fuerza gravitacional; de este modo, ocasiona la aceleración de cúmulos de galaxias entre sí (véase la figura 5). En cuanto a la materia

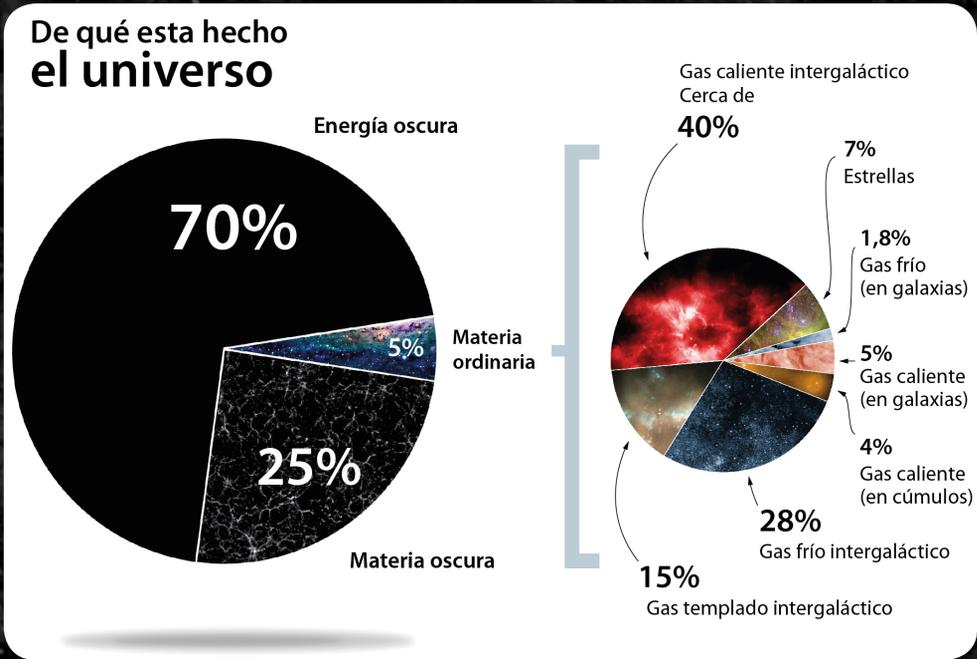


Figura 5. Distribución de materia en el universo.

oscura, en las últimas décadas se han hecho varias propuestas para explicar de qué está compuesta esa masa invisible. Algunos componentes de la materia oscura serían los neutrinos ordinarios y pesados, los planetas, las estrellas enanas, los gases no luminosos y, en general, las partículas masivas débilmente interactuantes. Sin embargo, los neutrinos ordinarios no podrían ser el componente mayor de materia oscura, debido a que viajan a velocidades "cercanas" a la velocidad de la luz, por lo tanto, se estarían moviendo todo el tiempo y no se concentrarían en un solo lugar. En cambio, los neutrinos pesados serían mejores candidatos: si sus masas son grandes, les costaría trabajo moverse y podrían concentrarse en determinados lugares.

De acuerdo con lo observado a través de telescopios sofisticados, los planetas, las estrellas enanas, las galaxias y los gases no luminosos no podrían cubrir la materia oscura detectada en su totalidad. No obstante, se plantea la posibilidad de que haya otros tipos de partículas con masas pesadas y que estas interactúen débilmente. De ser así, interactuarían únicamente con el W y Z o partículas similares a estas o con el campo que da masas a las partículas mencionadas, pero no interactuarían con quarks o leptones. Esta propuesta sobre partículas masivas débilmente interactuantes es la que podría explicar de mejor forma la cantidad de materia oscura que se observa.

Debido a que el campo de Higgs juega un papel importante para la generación de masas, este también se podría asociar a la generación de masa de partículas pesadas que contribuyan de manera significativa a la materia oscura. Por tanto, se han propuesto varios modelos donde hay un sector de Higgs más complicado, y en el cual aparecerían nuevas partículas masivas asociadas al mecanismo de Higgs. Desde hace varias décadas se ha sugerido que el campo de Higgs es más complicado y que su estructura no solo tendría una partícula de Higgs, sino otras más con carga neutra y cargada.

Cuando se propone que el campo de Higgs es el portal para explicar la materia oscura, se parte de que derivaría la partícula de Higgs ya detectada y otras partículas de Higgs que tendrían que ser inertes o no interactuantes con los quarks y leptones. Las partículas

» La energía de los gluones es muy grande y, de hecho, representa más de 90 % de la masa del neutrón.

desprendidas de la excitación del vacío serían las partículas masivas débilmente interactuantes, que contribuirían de manera importante a la materia oscura.

Incluso, bajo una simetría adicional, se congelan ciertos componentes para que, al menos, una partícula de ellas sea estable o incapaz de desintegrarse; digamos que la naturaleza del campo de Higgs se lo prohíbe. Este tema se encuentra en estudio y aún está por entenderse, pero busca contribuir a la explicación de las observaciones experimentales de las galaxias e incluso predecir señales que podrían aparecer en el actual acelerador de partículas LHC o en futuros aceleradores.

Cualquier indicio que surja de este tipo de modelos —y otros— sería de gran ayuda para la comunidad experimental, en su tarea de descubrir los constituyentes de la materia oscura, desde la detección directa, indirecta y por medio de posibles señales de materia oscura en los aceleradores de partículas elementales.

Como hemos visto, el mecanismo de Higgs es un tema apasionante, que tiene implicaciones tanto en la evolución como en los constituyentes del universo. En general, el universo no sería como lo vemos actualmente, pero lo más profundo es que el mecanismo de Higgs está relacionado con el pasado, presente y futuro del universo, desde el mundo subatómico hasta el cosmológico.

Referencias

- Sears, F. et al. (2005). *Física Universitaria*. Vol. 2. Addison-Wesley.
- Lubkin, G. (1991). *Physics Today*, 44(1), 17-20.
- Kane, G. (1993). *Modern Elementary Particle Physics: the fundamental particles and forces?* Addison-Wesley Publishing Company.
- Higgs, P. (1964). *Physics Review Letters*, 13(508).
- Atlas collaboration (2012). *Physics Review Letters*, 716, 1-29.
- CMS collaboration (2012). *Physics Review Letters*, 716, 30-61.

