

“Los neutrinos se han visto rodeados de misterio desde que su existencia fue propuesta por primera vez por Wolfgang Pauli en 1930”.

El neutrino y el origen de la materia

Clara Cuesta Soria



Cuando observamos el universo, vemos estrellas y galaxias de todas las formas y tamaños. Lo que no vemos, sin embargo, es que el universo está lleno de unas partículas llamadas neutrinos. Estas partículas, que no tienen carga y apenas tienen masa, se crearon menos de un segundo después del Big Bang, y un gran número de ellos permanecen intactos en el universo hoy en día porque interactúan muy débilmente con la materia; de hecho, cada centímetro cúbico de espacio contiene alrededor de trescientos de estos neutrinos creados tras el Big Bang.

Billones de neutrinos atraviesan nuestros cuerpos cada segundo, casi todos ellos se han producido en reacciones de fusión en el núcleo del Sol. Cuando las estrellas masivas mueren, la mayoría de su energía se libera en forma de neutrinos en violentas explosiones de super-

novas. Aunque las supernovas aparecen como objetos brillantes cuando se observan con telescopios ópticos, esta luz representa solo una pequeña fracción de la energía total de las supernovas.

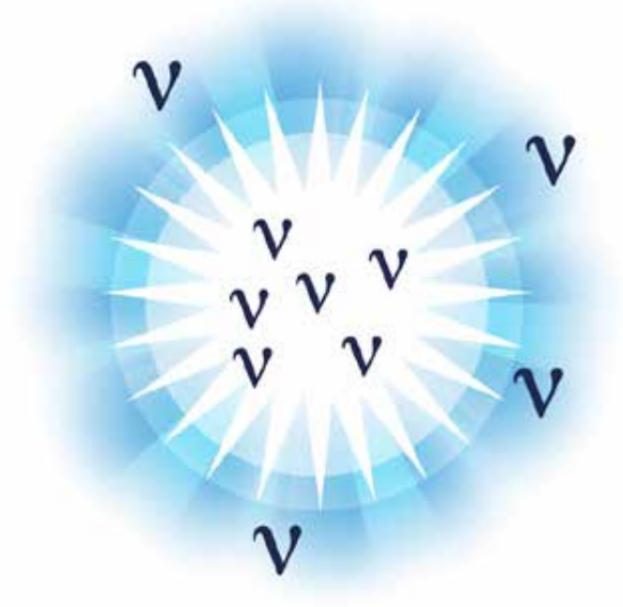
Los físicos detectaron los primeros neutrinos de una supernova en 1987 cuando una estrella colapsó a unos 150000 años luz de distancia en la Gran Nube de Magallanes, la galaxia más cercana a la Vía Láctea. Dos grandes experimentos subterráneos: el detector Kamiokande en Japón y el experimento Irvine-Michigan-Brookhaven en EE.UU. detectaron neutrinos de la supernova 1987A horas antes de que la luz de la explosión llegara a la Tierra. El evento marcó el nacimiento de la astronomía de neutrinos. Nuevos telescopios de neutrinos se construyeron después, como el experimento IceCube en la Antártida, para detectar neutrinos producidos a miles de millones de años luz de distancia.

Sin embargo, los neutrinos siguen siendo las partículas elementales menos comprendidas. Es necesario extender el modelo estándar para incorporar la masa de los neutrinos, algunas teorías argumentan que, para ello, la hasta ahora válida distinción entre materia y antimateria debe abandonarse. La masa del neutrino puede, incluso, explicar nuestra existencia.

DESCUBRIMIENTO DE LOS NEUTRINOS

Los neutrinos se han visto rodeados de misterio desde que su existencia fue propuesta por primera vez por Wolfgang Pauli en 1930. En aquel momento, las personas expertas en Física estaban perplejas porque en la desintegración beta parecía romperse la ley de conservación de la energía. En la desintegración beta, un neutrón en un estado inestable se transforma en un protón y emite un electrón al mismo tiempo. Tras un periodo de confusión y debate, se encontró que la energía del electrón irradiado seguía un espectro continuo con energía inferior a la esperada. El hallazgo incluso condujo a Niels Bohr a especular que la energía podría no conservarse en el misterioso mundo de los núcleos.

Pauli también se esforzó en resolver este misterio. Incapaz de asistir a una reunión de física en diciembre de 1930, envió una carta a las "damas y caballeros radiactivos" en la que propuso un "remedio desesperado" para mantener la validez de la ley de conservación de la energía. El remedio de Pauli fue introducir una nueva partícula neutra. Apodado el "neutrón" de Pauli; la nueva partícula se emitiría junto con el electrón en la desintegra-



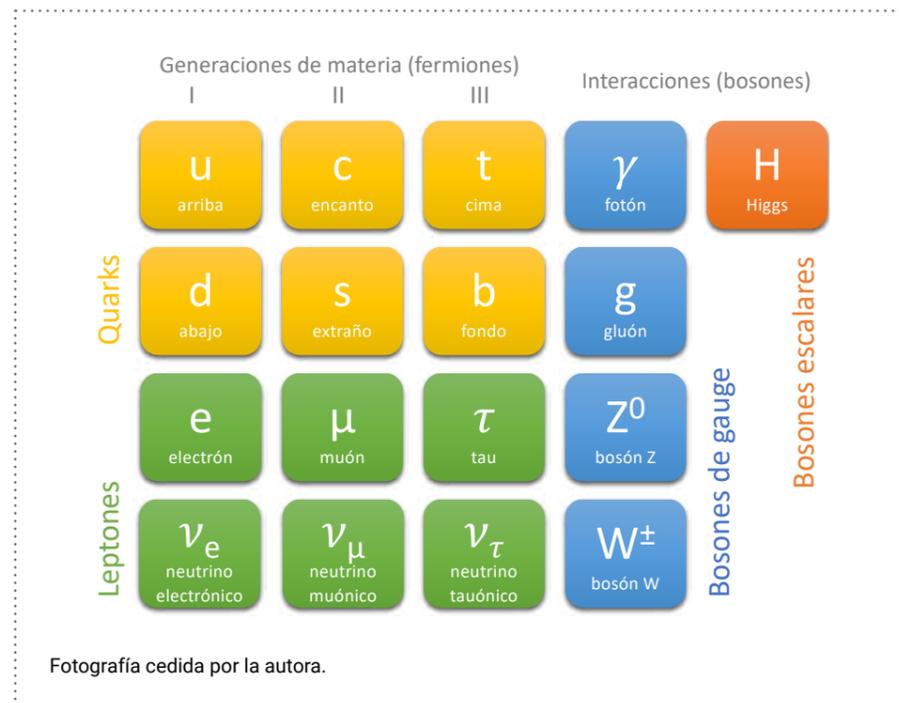
▲
Neutrinos y el origen de la materia.

DUNE

ción beta para que la energía total se conservara, y que sería invisible para las técnicas de detección de la época.

Dos años después, James Chadwick descubrió la partícula que ahora se conoce como el neutrón, pero estaba claro que esta partícula era demasiado pesada para ser el "neutrón" que Pauli había propuesto. Sin embargo, la partícula de Pauli jugó un papel crucial en la primera teoría de desintegración beta formulada por Enrico Fermi en 1933 y que luego se conoció como teoría de la interacción débil. Puesto que Chadwick había tomado el nombre de "neutrón" para su partícula neutra, Fermi tuvo que inventar un nuevo nombre; siendo italiano, "neutrino" era la opción obvia: un pequeño neutrón.

Como los neutrinos interactúan tan débilmente con la materia, Pauli apostó una caja de champán a que



◀ **Modelo estándar de la física de partículas.**

interpretación más probable de este resultado es que los neutrinos muónicos se convirtieron u “oscilaron” en neutrinos tauónicos al pasar por la Tierra, invisibles para Super-Kamiokande pues era incapaz de identificar neutrinos tauónicos.

Super-Kamiokande también observó el déficit de neutrinos solares. Las reacciones de fusión que tienen lugar en el Sol solo producen neutrinos electrónicos, pero estos pueden oscilar posteriormente en los neutrinos muónicos y tauónicos. Fue el equipo del Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO), en Canadá, el que pudo identificar cuántos neutrinos muónicos o neutrinos tauónicos interactúan en el detector, confirmando que el número total de los neutrinos del Sol estaba de acuerdo con los cálculos teóricos. Los resultados de SNO combinados con los de Super-Kamiokande proporcionaron evidencia clara de neutrinos masivos y ambos experimentos ganaron el Premio Nobel de Física en 2015.

“En 1998, la colaboración Super-Kamiokande anunció la primera evidencia de neutrinos masivos.”

nadie detectaría uno. De hecho, este fue el caso hasta 1956, cuando Clyde Cowan y Fred Reines detectaron los antineutrinos emitidos por un reactor nuclear en el río Savannah en Carolina del Sur, EE.UU. Cuando su resultado se anunció, Pauli satisfizo su apuesta.

EL MODELO ESTÁNDAR

Ahora sabemos que todas las partículas elementales, seis quarks y seis leptones, se agrupan en tres familias o generaciones. La materia común está construida a partir de miembros de la generación más ligera: los quarks arriba (“up”) y abajo (“down”) que forman protones y neutrones; el electrón y el neutrino electrónico involucrado en la desintegración beta. La segunda y tercera generación comprenden versiones más pesadas de estas partículas con los mismos números cuánticos. Los análogos del electrón se llaman muon y tau, mientras que el neutrino muónico y el neutrino tauónico son los correspondientes al neutrino electrónico. A cada partícula le corresponde una antipartícula con carga eléctrica opuesta. El modelo estándar también incluye un conjunto de partículas que transportan las fuerzas entre estas partículas elementales. El fotón media en la fuerza electromagnética, las partículas masivas W^+ y W^- en la fuerza débil y ocho gluones en la fuerza fuerte.

Todas las partículas que componen la materia tienen masa, desde la más ligera, el electrón, a la más pesada, el quark cima (“top”). A pesar de que el modelo estándar no puede predecir sus masas, proporciona un mecanismo por el cual las partículas elementales adquieren masa al interactuar con el bosón de Higgs. Sin embargo, en el modelo estándar el neutrino no puede interactuar con el bosón de Higgs y por lo tanto no adquiere masa.

EVIDENCIA DE LA MASA DE NEUTRINOS

En 1998, la colaboración Super-Kamiokande anunció la primera evidencia de neutrinos masivos. Habiendo sobrevivido a todos los desafíos experimentales desde finales de los años setenta, el modelo estándar resultaba incompleto. Super-Kamiokande detectó en Japón neutrinos atmosféricos, producidos al interactuar los rayos cósmicos con núcleos de oxígeno o nitrógeno en la atmósfera. Como la Tierra es esencialmente transparente para los neutrinos, los producidos en la atmósfera en el lado opuesto del planeta pueden alcanzar el detector sin ningún problema y Super-Kamiokande era sensible a esta dirección. El equipo descubrió que aproximadamente la mitad de los neutrinos atmosféricos del otro lado de la Tierra se perdieron, mientras que no lo hicieron los producidos en el lado superior. La



OSCILACIONES DE NEUTRINOS

En algunos aspectos, estos experimentos son análogos a interferómetros, sensibles a pequeñas diferencias en frecuencia entre dos ondas interferentes. Dado que una partícula cuántica puede ser considerada como una onda con una frecuencia dada por su energía dividida por la constante de Planck, la interferometría puede detectar pequeñas diferencias de masa porque la energía y la frecuencia de las partículas dependen de su masa. La interferometría funciona en el caso de los neutrinos gracias al hecho de que los neutrinos creados en reacciones nucleares son el resultado de la mezcla de tres "estados propios masivos" diferentes. Esto significa, por ejemplo, que los neutrinos electrónicos se transforman lentamente en neutrinos tauónicos y de vuelta otra vez en electrónicos. La cantidad de esta "mezcla" es cuantificada por un ángulo de mezcla.

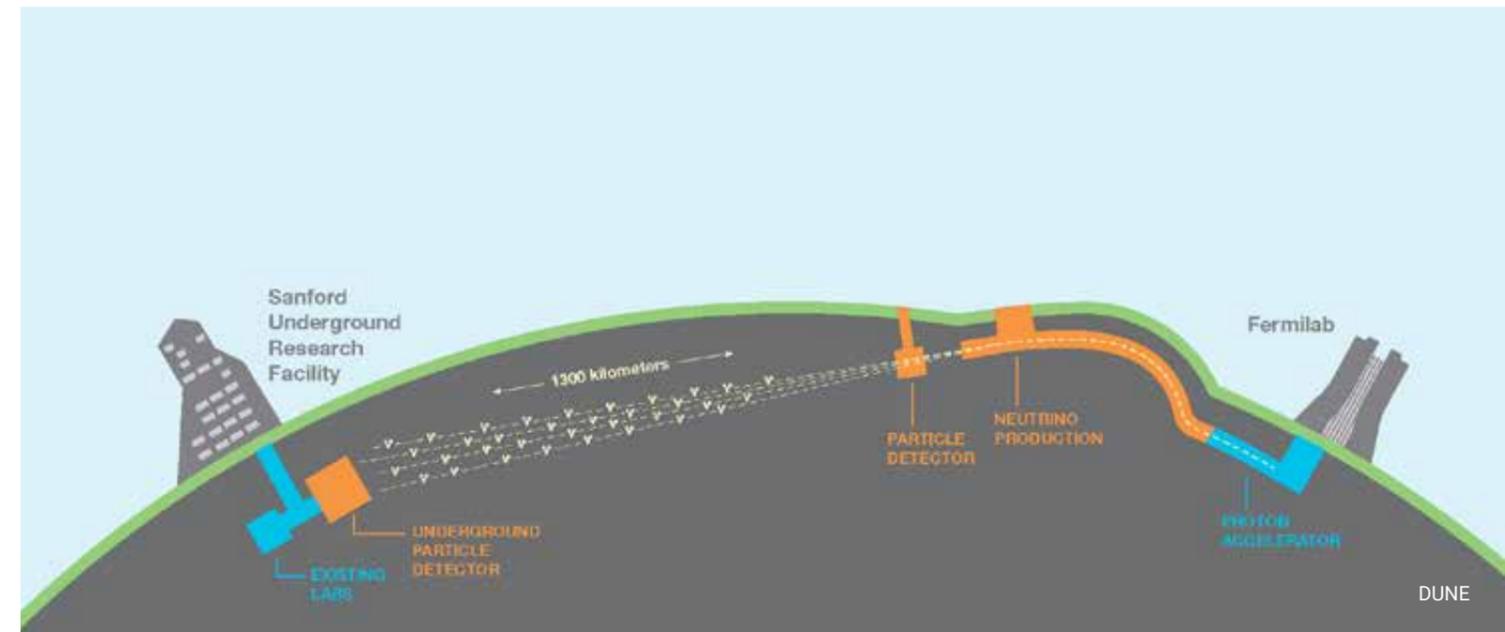
Una vez descubiertas las oscilaciones de neutrinos, el objetivo de los siguientes experimentos ha sido medir los parámetros de estas oscilaciones. Estos parámetros son los ángulos de mezcla, la diferencia de las masas de los diferentes estados al cuadrado y una fase relacionada con la posibilidad de que los neutrinos oscilen de manera diferente a su propia antimateria, los antineutrinos. Aunque sabemos las diferencias de masas no sabemos las masas absolutas de los neutrinos.

Estas propiedades han sido, en su mayoría, medidas con bastante precisión en diferentes tipos de experimentos, empleando tanto neutrinos solares o atmosféricos como neutrinos fabricados en la Tierra. Estos neutrinos se pueden crear en aceleradores de partículas como T2K en Japón o Minos en EE. UU. o en reactores nucleares como KamLAND en Japón, Double-Chooz en Francia o Daya-Bay en China. La dificultad es que los neutrinos solo parecen oscilar a largas distancias, motivando así que el detector de neutrinos se coloque a kilómetros de distancia de la fuente que los produce.

Sin embargo, hay un parámetro, la llamada fase de violación CP, que todavía no hemos podido determinar. Este parámetro trata de la posibilidad de que los neutrinos y antineutrinos oscilen de manera diferente. Aunque materia y antimateria se comportan de manera similar casi siempre, sabemos que hay algunos procesos físicos en los que presentan diferencias. La prueba más clara de ello es que vivimos en un Universo compuesto sobre todo por materia, en el que la antimateria prácticamente ha desaparecido.

¿POR QUÉ EXISTIMOS?

Después del Big Bang, el universo estaba lleno de cantidades iguales de materia y antimateria, que se aniquiló a medida que el universo se enfriaba. Sin embargo,



Esquema del experimento DUNE.

aproximadamente una de cada 10000 millones de partículas de materia sobrevivió y luego creó estrellas, galaxias y vida en la Tierra. ¿Qué ha hecho posible este pequeño exceso de la materia sobre la antimateria para que podamos existir?

Antes se creía que materia y antimateria se comportaban igual (simetría de carga, C), pero en los años cincuenta se descubrió que no era cierto. Sin embargo, quienes estudian la Física se dieron cuenta de que si, además de cambiar partículas por antipartículas, se cambiaba el signo de cada coordenada espacial (simetría de paridad, P), como si se viera en un espejo, entonces sí que se comportaban igual.

Hasta donde se veía, materia y antimateria se comportaban de forma simétrica. La cuestión no quedó ahí, pues en la década siguiente, fijándose en el comportamiento de cierta partícula formada por quarks (el kaón), se descubrió que haciendo los dos cambios a la vez (CP), aún quedaba una pequeña diferencia. Sorprendentemente, de nuevo, ni siquiera la simetría CP era respetada.

Gracias al kaón ya sabemos que en los quarks esa simetría no se cumple, pero la cantidad en la que no se cumple es muy pequeña; tan pequeña que no "salen las cuentas" para explicar el exceso de materia sobre antimateria que observamos en nuestro universo.

Los neutrinos tal vez puedan explicar qué causó el exceso de materia, pero para ello se debe descubrir esta rotura de la simetría CP en los leptones. Su descubrimiento podría implicar que los neutrinos y antineutrinos se hubieran comportado de forma diferente durante la formación de los leptones, esto habría creado el exceso de materia. Tras múltiples interacciones de la materia, se crearon los quarks pesados creándose así la materia tal y como la conocemos.

DUNE

La próxima generación de experimentos de oscilaciones de neutrinos intentará medir los parámetros que faltan: la fase que da idea de la rotura de la simetría CP y el orden de las masas de los neutrinos, pues se conoce su diferencia, pero no cuál es mayor.



Con ese objetivo, el Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) en EE. UU. no solo estudiará neutrinos, también investigará su contraparte de antimateria. Los científicos buscarán diferencias en el comportamiento entre neutrinos y antineutrinos, que podrían dar pistas de por qué el universo está dominado por la materia. DUNE buscará también neutrinos producidos en explosiones de supernovas, que podrían revelar la formación de estrellas de neutrones y agujeros negros, así como si los protones “viven” para siempre o se desintegran. Observar la desintegración del protón nos acercaría a realizar el sueño de Einstein de una Teoría de la Gran Unificación.

DUNE se prevé que esté en operación en 2026. Estudiará los neutrinos creados en un nuevo haz de neutrinos de alta intensidad generado por un acelerador de protones en Fermilab, Illinois, EE. UU. Los neutrinos se caracterizarán en un detector cercano colocado muy cerca del haz de neutrinos y se compararán con los que lleguen a un detector ubicado a una distancia de 1300 km en el laboratorio subterráneo de Sanford Underground Research Facility en Dakota del Sur, situado en una antigua mina de oro a 1500 m bajo tierra. Este detector lejano estará compuesto por cuatro grandes detectores de argón líquido de 10 000 toneladas cada uno, volumen que equivale a dieciséis piscinas olímpicas.

La colaboración científica de DUNE está compuesta por más de mil colaboradores de más de ciento ochenta instituciones en más de treinta países. DUNE cuenta con una notable participación española por parte del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de Madrid, el Institut de Física d'Altes Energies (IFAE) de Barcelona, el Instituto de Física Corpuscular (IFIC) de Valencia, la Universidad de Granada y el Instituto de Física Teórica (IFT) de Madrid.

ProtoDUNE

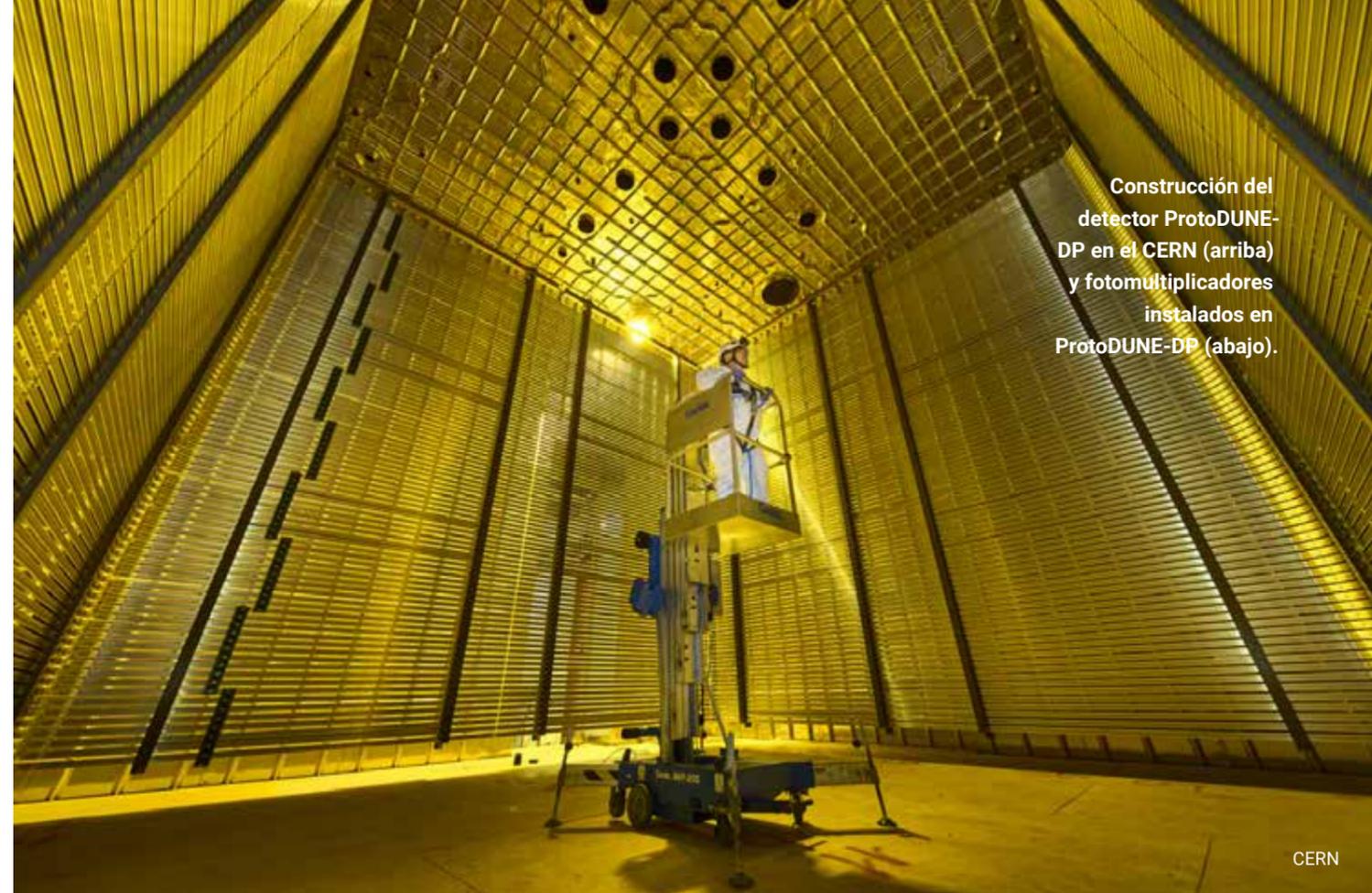
Construir los potentes detectores de DUNE supone un gran reto y para ello hay que probar que se cuenta con la tecnología necesaria, pues nunca se han construido detectores de argón líquido tan grandes.

Con este objetivo, en Ginebra, en la sede del CERN (Organización Europea para la Física de Partículas, una de las mayores entidades que participan en el proyecto), se han construido dos grandes prototipos de DUNE, desarrollando tecnología que se probará y ampliará cuando se fabriquen los grandes detectores de su versión definitiva.

Ha llevado dos años construir los dos primeros detectores de ProtoDUNE, y más de un mes llenarlos de argón líquido, que necesita mantenerse a temperaturas por debajo de -184 grados centígrados. Los detectores registran en ese argón trazas de partículas procedentes tanto de los rayos cósmicos como de los haces generados en el complejo de aceleradores del CERN. Una vez vistas las primeras trazas, los detectores se operan durante varios meses para probar la tecnología. Cuando los neutrinos atraviesan estos detectores chocarán con los núcleos del argón produciendo partículas cargadas, que ionizan los átomos de argón a lo largo de su trayectoria dejando trazas de iones en el líquido. Importantes campos eléctricos permiten la deriva de la carga eléctrica así producida y su lectura para la reconstrucción de la trayectoria de la partícula en tres dimensiones.

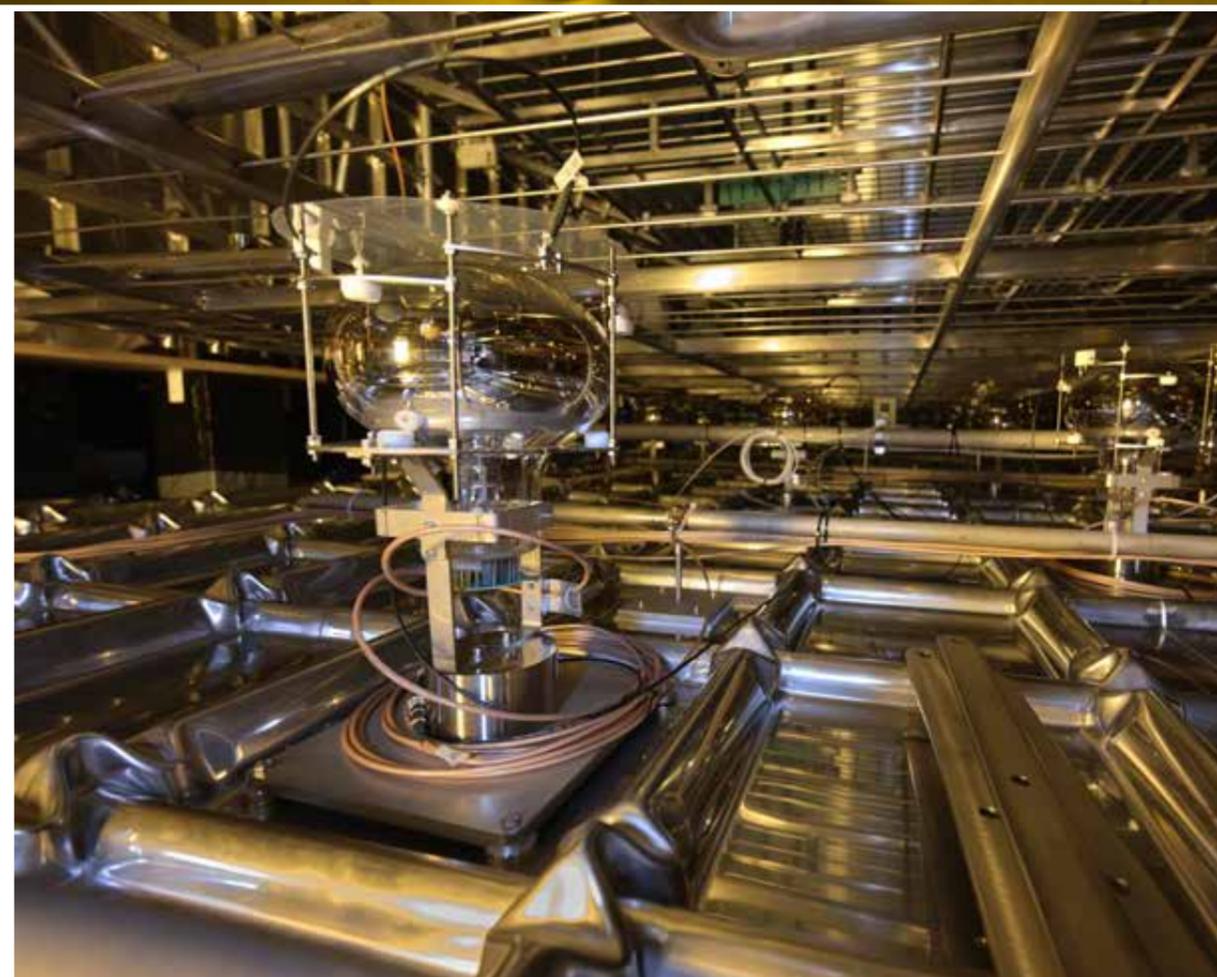
Un prototipo, ProtoDUNE Single-Phase (SP), utiliza argón líquido, y el otro usa argón tanto en estado gaseoso como líquido, de ahí el nombre en inglés de ProtoDUNE Dual-Phase (DP). Los enormes detectores de ProtoDUNE tienen el tamaño de un edificio de tres plantas con forma de gigantesco cubo. Por ejemplo, en

“DUNE estudiará los neutrinos creados en un nuevo haz de neutrinos de alta intensidad generado por un acelerador de protones en Fermilab, Illinois, EE. UU.”



Construcción del detector ProtoDUNE-DP en el CERN (arriba) y fotomultiplicadores instalados en ProtoDUNE-DP (abajo).

CERN



ProtoDUNE-DP la interacción de partículas tiene lugar en un volumen de $6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$ y una masa de trescientas toneladas de argón.

El primer prototipo en operar fue el de una única fase, ProtoDUNE-SP que comenzó a tomar datos en septiembre de 2018. Aquí tiene una importante participación el IFIC pues ha desarrollado el sistema para controlar la temperatura del argón líquido, el más grande y preciso desarrollado para experimentos de física de partículas.

En ProtoDUNE-DP, la carga se extrae, amplifica y detecta en argón gaseoso sobre la superficie del líquido, lo que permite mejor reconstrucción de las interacciones. Este prototipo está operativo desde el verano de 2019 cuando fue llenado de argón líquido. El CIEMAT y

el IFIC son responsables del sistema de detección de luz de ProtoDUNE-DP, formado por 36 fotomultiplicadores que detectan y amplifican la luz producida por las interacciones de partículas en el detector y la convierten en una señal eléctrica.

EN RESUMEN...

Estamos en un momento increíble en la historia de la Física de Partículas. El bosón de Higgs, el misterioso objeto que llena nuestro universo y proporciona masa a las partículas, fue descubierto y la evidencia de masa de neutrinos es clara. El modelo estándar que se estableció a fines de los setenta debe ser completado, como mínimo para incorporar la masa de neutrinos. Para ello podemos necesitar abandonar la distinción



unsplash.com



Fotografía cedida por la autora.

entre materia y antimateria. Si es así, la masa de los neutrinos podría revelar el origen de nuestra existencia. El experimento DUNE en EE.UU. se está diseñando para medir esta diferencia entre el comportamiento de los neutrinos y los antineutrinos. Una cosa es segura: vamos a aprender mucho más sobre neutrinos y el origen de la materia en los próximos años.

REFERENCIAS

- The origin of neutrino mass, Hitoshi Murayama, Physics World, Volume 15, 2002
- Web de DUNE: www.dunescience.org
- Vídeos sobre el proyecto DUNE: www.fnal.gov/publication/lbnf-dune/photos-videos.html

Clara Cuesta Soria
Unidad de Física de Partículas
Centro de Investigaciones Energéticas,
Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)