

Avanzan los experimentos de neutrinos con distancia de oscilación larga

Los experimentos de neutrinos con distancia de oscilación larga están allanando el camino para la solución de dos grandes misterios en la física de neutrinos: el ordenamiento de sus masas y la violación de la simetría carga-paridad.

Autora: Sara Bolognesi¹, Instituto de Investigación de las Leyes Fundamentales del Universo (IRFU), Comisión Francesa de Energía Atómica (CEA), Saclay, Francia.

En 1998, un grupo de investigadores descubrió que los neutrinos pueden cambiar su “sabor” a medida que viajan. Este comportamiento solo es posible si los neutrinos tienen masa, suposición que está por fuera del modelo estándar de física de partículas. El descubrimiento de este comportamiento más allá del modelo estándar, que fue reconocido con el Premio Nobel de Física de 2015, impulsó intensos esfuerzos para caracterizar las oscilaciones de neutrinos a través de experimentos cada vez más precisos. Uno de esos esfuerzos, el experimento NOvA en Fermilab, ahora informa el análisis de los datos de oscilación recopilados entre los años 2014 y 2020 [1], brindando algunas de las estimaciones de parámetros que describen las oscilaciones de neutrinos más precisas hasta la fecha y brindando importantes pistas sobre dos aspectos clave de la física de neutrinos: el orden de las masas de los neutrinos y el grado de violación de la simetría carga-paridad (CP). Los resultados son un buen augurio para la próxima generación de experimentos con distancia de oscilación larga, que aumentarán drásticamente nuestra capacidad para investigar aspectos esquivos de la física de neutrinos.

Cuando los neutrinos de un tipo o sabor determinado viajan una cierta distancia, pueden cambiar su sabor con una probabilidad que depende de la distancia y la energía del neutrino. Esta oscilación se puede explicar asumiendo que hay tres estados propios de masa de neutrino que se mezclan para formar tres estados propios de sabor (electrón, muón y tauón), entre los cuales ocurren las oscilaciones. Dicho comportamiento está parametrizado² por la matriz Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS). Como ocurre a menudo en la física, las mediciones de precisión de una parametrización fenomenológica pueden brindar pistas sobre nueva física, lo que podría significar el desarrollo de un modelo más simple, conectado a un conjunto más pequeño de parámetros, o incluso

¹ Traducción de Enrique Arrieta Díaz, profesor de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, miembro de las colaboraciones NOvA y DUNE. Versión original en Physics (Viewpoint), editada por la American Physics Society (APS). Publicación del 3 de agosto de 2022: <https://physics.aps.org/articles/v15/120>

² Matemáticamente descrito por un conjunto limitado de números medibles.

descubrir una teoría más fundamental, basada únicamente en simetrías que describa las observaciones.

Los experimentos de hoy tienen como objetivo abordar, en particular, dos preguntas abiertas que son cruciales. En primer lugar, ¿están las masas de los neutrinos ordenadas de manera similar (orden normal) a las de sus compañeros, los leptones cargados³? Una analogía ingenua sugeriría que este es el caso, pero encontrar un “orden invertido” sería un resultado emocionante que podría guiar los desarrollos teóricos. Segundo, ¿será que los neutrinos oscilan de la misma manera que sus antipartículas (antineutrinos), es decir, obedecen la simetría CP (Fig. 1)? De no ser así, se establecería, por primera vez, la violación de simetría CP por parte de los leptones (el sector de partículas que incluye neutrinos, electrones, muones y tauones). La violación de simetría CP está en el corazón de uno de los mayores rompecabezas de la física: el dominio de la materia sobre la antimateria en el Universo. Comprender la violación de simetría CP en diferentes sectores de partículas, incluidos los leptones, podría ayudar a resolver este rompecabezas.

El descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos fue posible gracias a dos fuentes naturales de neutrinos: los rayos cósmicos que golpean la atmósfera de la Tierra y las reacciones nucleares en el Sol. Hoy en día, las fuentes artificiales de neutrinos, como los aceleradores de partículas, permiten a los investigadores controlar mejor el sabor y la energía de los neutrinos producidos y la distancia, o la base de oscilación, sobre la que viajan estas partículas antes de ser detectadas. Los aceleradores de partículas pueden

funcionar en modos de haz de neutrinos o haz de antineutrinos, produciendo flujos separados de neutrinos y antineutrinos, lo cual es crucial para las búsquedas de violaciones de simetría CP. En la actualidad, dos experimentos con aceleradores tienen distancias de oscilación lo suficientemente largas para observar las oscilaciones de neutrinos PMNS: T2K en Japón y NOvA en EE. UU., con distancia de oscilación de 295 y 810 km, respectivamente.

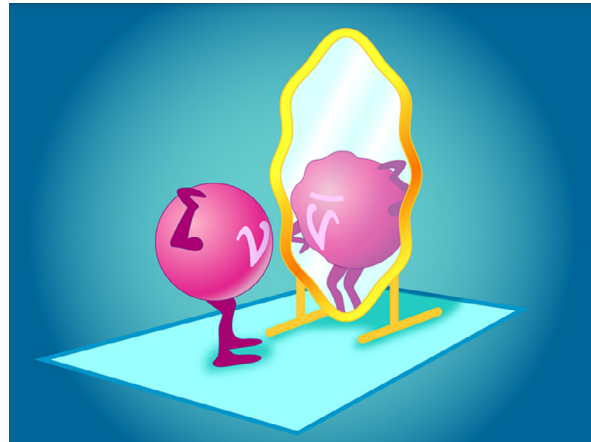


Figura 1. Los neutrinos pueden comportarse de manera diferente a sus contrapartes de antipartículas “espejo”. Experimentos como NOvA buscan detectar estas diferencias comparando cómo los neutrinos y los antineutrinos cambian su sabor u “oscilan” a largas distancias. Crédito: APS/Carin Cain

En 2020, las dos colaboraciones anunciaron resultados que indicaban una tensión intrigante, pero leve [2, 3]. Ambos experimentos favorecieron ligeramente el orden normal sobre el orden invertido de las masas de los neutrinos, aunque NOvA, en virtud de su distancia de oscilación más larga, tiene una sensibilidad mucho más pronunciada al orden de las masas. El experimento T2K sugirió que los neutrinos oscilan más rápido que los antineutrinos, lo que implica una gran violación de simetría CP. Sin embargo, el grado de violación de simetría CP extraído de los resultados

³ Los leptones cargados son: el electrón, el muón y el tauón.

de NOvA dependía del orden de las masas. Para el orden normal, NOvA favoreció una pequeña violación de simetría CP, mientras que, para el orden invertido, los resultados de NOvA serían compatibles con los de T2K. Las fluctuaciones estadísticas son la explicación más sencilla de estas diferencias, pero la tensión es una oportunidad para una investigación profunda de las incertidumbres sistemáticas que afectan estas mediciones. También se han propuesto explicaciones más exóticas para la tensión, incluidas las interacciones “no estándar” de los neutrinos.

La nueva publicación de NOvA [1] ofrece una descripción detallada de los resultados anunciados en 2020. Con respecto al análisis anterior publicado por NOvA en 2019 [4], el nuevo incluye alrededor de un 50 % más de datos en modo haz de neutrinos, y se volvieron a analizar todos los datos tomados desde 2014. El nuevo análisis se optimiza aún más para explotar el hecho de que los dos detectores⁴ de NOvA se basan en la misma tecnología, utilizando un procedimiento que cancela parcialmente las incertidumbres sistemáticas. NOvA produce principalmente neutrinos o antineutrinos muónicos y utiliza como observables principales el número y la energía de los neutrinos y los antineutrinos muónicos que sobreviven el viaje al detector lejano, y el número y la energía de los neutrinos electrónicos que aparecen en el detector lejano. A partir de estos observables medidos, el análisis extrae estimaciones de los parámetros de oscilación, del orden de las masas y del grado de violación de simetría CP.

Desde el anuncio de 2020, varios investigadores ya han realizado “ajustes con-

juntos” a los datos provenientes de NOvA, T2K y otros experimentos (incluidos aquellos que utilizan neutrinos producidos por reactores nucleares, por el Sol y por rayos cósmicos) [5-7]. Estos ajustes conjuntos favorecen el orden normal, con un grado de violación de simetría CP que se encuentra entre NOvA y T2K. La preferencia por el orden normal está muy influenciada por los datos de Super-Kamiokande, un observatorio en Japón que mide los neutrinos producidos por rayos cósmicos, que es sensible al ordenamiento de las masas. Cuando los resultados de T2K y NOvA se incluyen en los ajustes, dicha preferencia disminuye porque el orden invertido libera la tensión observada entre los experimentos para el orden normal. Claramente, hay más trabajo por hacer. Sin embargo, esos ajustes conjuntos no pueden explicar las correlaciones de las incertidumbres sistemáticas entre NOvA y T2K. Afortunadamente, los dos experimentos están cooperando para producir un nuevo ajuste conjunto que aclarará el posible impacto de tales correlaciones al combinar sus medidas.

Entonces, ¿qué nos depara el futuro? Una nueva generación de experimentos con distancia de oscilación larga está en construcción: Hyper-Kamiokande en Japón y el Experimento de Neutrinos Subterráneos Profundos (DUNE, por su sigla en inglés) en los EE. UU. aumentarán las estadísticas disponibles en un factor de 20 o más. En ese momento será necesario un control sin precedentes de las incertidumbres sistemáticas. Las más complejas de esas incertidumbres, asociadas con el modelado de la producción de neutrinos y de las interacciones neutrino-núcleo, tocan problemas profundos de física nuclear que requieren una estrecha colaboración con la comunidad de física nuclear. Es probable que el crecimiento de las estadísticas permita a los investigadores hacer algunos

⁴ NOvA tiene dos detectores alienados: uno, el detector cercano (300 ton), en el campus de Fermilab, bajo tierra, y el otro, el detector lejano (14 kton), sobre la superficie en la zona de Ash River, MN, EE. UU..

progresos fáciles: establecer el orden de las masas y el grado de violación de simetría CP. Pero con la ráfaga de datos disponibles a largo plazo es posible que debamos observar la oscilación de neutrinos con una mente más abierta, posiblemente relajando algunas de las suposiciones restrictivas del paradigma actual, como una matriz PMNS unitaria y un escenario mínimo que involucra solo tres sabores de neutrinos y solo interacciones estándar.

Para controlar las incertidumbres sistemáticas y permitir una interpretación de los datos con más independencia de los modelos teóricos será crucial la combinación de experimentos complementarios con diferentes distancias de oscilación y energías de neutrinos. T2K y NOvA están demostrando cuán poderosas pueden ser estas sinergias. Un ejemplo guía para la búsqueda de neutrinos puede provenir del éxito más célebre de la física de partículas: el descubrimiento del bosón de Higgs. Tal éxito se basó en múltiples generaciones de experimentos que mejoraron constantemente su rendimiento y refinaron la comprensión fundamental del sector electrodébil, así como en la combinación de los dos principales experimentos de búsqueda de Higgs: ATLAS y CMS.

REFERENCIAS

1. M. A. Acero et al., "Improved measurement of neutrino oscillation parameters by the NOvA experiment," *Phys. Rev. D* 106, 032004 (2022).
2. A. Himmel (NOvA Collaboration), "New oscillation results from the NOvA experiment," *Neutrino 2020* (2020), Zenodo.
3. P. Dunne (T2K Collaboration), "Latest neutrino oscillation results from T2K," *Neutrino 2020* (2020), Zenodo.
4. M. A. Acero et al. (NOvA Collaboration), "First measurement of neutrino oscillation parameters using neutrinos and antineutrinos by NOvA," *Phys. Rev. Lett.* 123, 151803 (2019).
5. P. F. de Salas et al., "2020 global reassessment of the neutrino oscillation picture," *J. High Energ. Phys.* 2021, 71 (2021).
6. F. Capozzi et al., "Unfinished fabric of the three neutrino paradigm," *Phys. Rev. D* 104, 083031 (2021).
7. I. Esteban et al., "The fate of hints: Updated global analysis of three-flavor neutrino oscillations," *J. High Energ. Phys.* 2020, 178 (2020).