

ARTÍCULO - Tesis Premiadas Convocatoria de Premios RADE 2024

Neutrinos: Las enigmáticas partículas que han dado forma al universo

Neutrinos: the puzzling particles which shaped the universe

Pablo Martínez-Miravé*

Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, Dinamarca

pablo.mirave@nbi.ku.dk

RESUMEN

Los neutrinos son partículas elementales y piezas fundamentales del Modelo Estándar de la Física de partículas. El estudio de sus propiedades es el objetivo de la tesis “*Neutrino properties from the laboratory and the cosmos*” (traducida como “Propiedades de los neutrinos en el laboratorio y en el cosmos”). En ella, se aborda (i) la determinación de las masas de los neutrinos y sus parámetros de mezcla con datos actuales, (ii) el estudio de otras propiedades de los neutrinos no predichas por el Modelo Estándar y (iii) posibles conexiones entre los neutrinos y la materia oscura del universo.

PALABRAS CLAVE: Neutrinos, Física de partículas, Cosmología, Modelo Estándar.

ABSTRACT

Neutrinos are elementary particles and fundamental pieces of the Standard Model of particle physics. The goal of the PhD thesis “*Neutrino properties from the laboratory and the cosmos*” is the study of their properties based on current data and to forecast the expected improvements in our understanding from the next generation of neutrino experiments. In particular, it addresses (i) the determination of neutrino masses and the mixing parameters responsible for flavour conversions, (ii) the study of other neutrino properties beyond the predictions of the Standard Model, and (iii) potential connections between neutrinos and the dark matter of the Universe.

KEYWORDS: Neutrinos, Particle physics, Cosmology, Standard Model.

*El autor fue galardonado con el Premio Real Academia de Doctores de España-Ciencias Experimentales y Tecnológicas en la Convocatoria de Premios a la Investigación RADE 2024 a la mejor tesis doctoral por su tesis *Neutrino properties from the laboratory and the cosmos*.

1. LOS NEUTRINOS SON PARTÍCULAS ELEMENTALES

La materia que forma todo nuestro entorno está formada por átomos. Cada átomo se subdivide en un núcleo, formado por protones y neutrones, y electrones que orbitan a su alrededor. A su vez, los protones y los neutrones del núcleo están compuestos por partículas llamadas quarks. Estos quarks, así como los electrones, son partículas elementales, es decir, que no se subdividen en partes más pequeñas.

Los quarks y los electrones son las piezas fundamentales de las que se compone la materia, pero no son las únicas partículas elementales. Por ejemplo, existen dos réplicas del electrón (e), el muón (μ) y el tauón (τ), que tienen las mismas propiedades que el electrón pero una masa mayor. Estas dos partículas también son elementales pero no viven mucho tiempo, apenas unos nanosegundos, y por tanto, no forman parte de la materia que nos rodea. Otro ejemplo son los fotones, algo así como ‘paquetes de luz’, que también son partículas elementales. Asimismo, existen otras partículas elementales asociadas a la fuerza nuclear fuerte y débil, que explican por qué los núcleos se mantienen unidos y la desintegración de algunos átomos. Desde 2012, sabemos que existe una partícula elemental denominada bosón de Higgs, y que es la responsable de que todas las demás tengan masa.

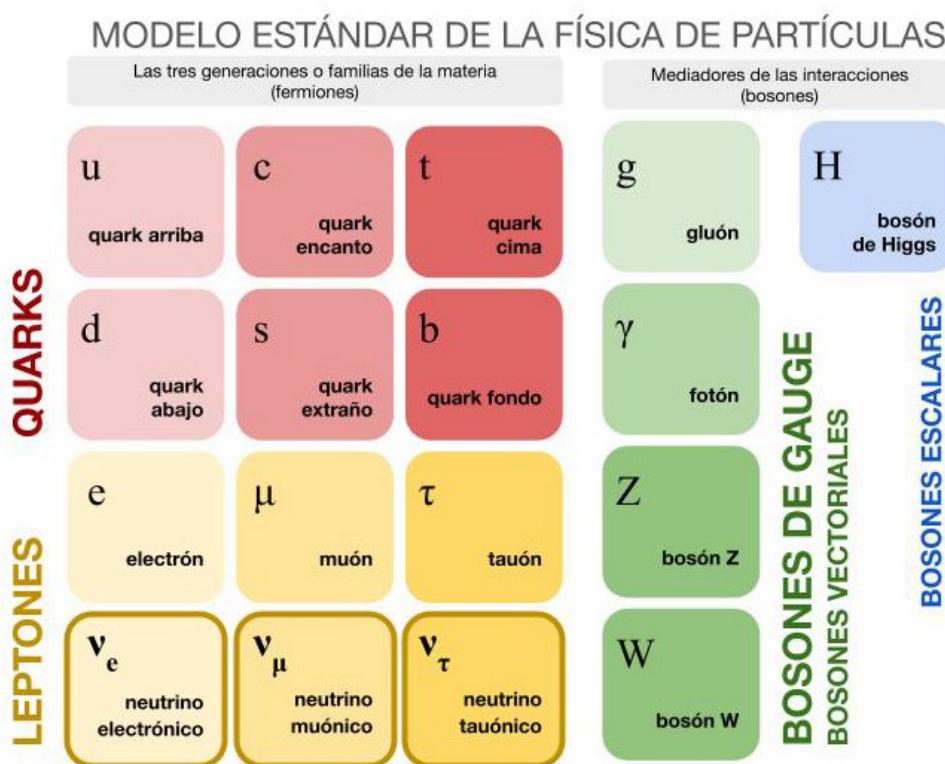


Figura 1: Representación gráfica de las partículas del Modelo Estándar.

Por último, para completar este ‘zoo’ de partículas elementales, nos falta mencionar los neutrinos. El estudio de sus propiedades es el objetivo de la tesis “*Neutrino properties from the laboratory and the cosmos*” (traducida como “Propiedades de los neutrinos en el laboratorio y en el cosmos”), escrita por Pablo Martínez-Miravé bajo la supervisión de María Amparo Tórtola Baixauli en el Instituto de Física Corpuscular (centro mixto de la Universidad de Valencia y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas).

2. LOS NEUTRINOS SON MUY ABUNDANTES

Los neutrinos son la segunda partícula más abundante del universo, sólo por detrás de los fotones, es decir de la luz. Como dato curioso, cabe destacar que cada persona es atravesada por cerca de 100 billones de neutrinos cada segundo.

Estos neutrinos se producen en los procesos nucleares que hacen brillar a las estrellas, como el Sol; en las explosiones que tienen lugar al final de la vida de los astros más pesados, y una gran cantidad de ellos se originó en los primeros instantes de vida del universo. Asimismo, los reactores nucleares y algunos procesos de radioactividad natural producen un gran número de neutrinos. A más altas energías encontramos los neutrinos atmosféricos, que se producen cuando los rayos cósmicos, después de atravesar enormes distancias, interactúan en las capas más altas de la atmósfera. En los aceleradores de partículas, como el gran colisionador de hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) en Suiza, se producen los neutrinos artificiales más energéticos. No obstante, los neutrinos con mayor energía jamás observados se producen en fenómenos extremadamente violentos, por ejemplo, en las proximidades de agujeros negros supermasivos en el centro de otras galaxias. Estos neutrinos pueden llegar a ser mil millones de veces más energéticos que los neutrinos provenientes del sol.

3. LOS NEUTRINOS INTERACTÚAN MUY POCO

La pregunta más natural que podemos hacernos es: si hay tantos neutrinos, ¿por qué no los vemos? El motivo es que los neutrinos apenas interactúan, es decir, que pueden atravesar enormes cantidades de materia como si no estuviese ahí. Por ejemplo, los neutrinos provenientes del sol atraviesan la Tierra sin desviarse ni interactuar, de modo que podemos medir el flujo de neutrinos solares incluso de noche. Por ese mismo motivo, no percibimos que los neutrinos nos están atravesando constantemente. Por ello, a los neutrinos se les conoce a menudo como “partículas fantasma”.

Aunque los neutrinos interactúan muy poco, sí que lo hacen en algunas ocasiones. Para poder observar un número suficiente de neutrinos y estudiar sus propiedades, la comunidad científica ha construido detectores enormes en entornos extremadamente aislados: por ejemplo, el experimento Super-Kamiokande consiste en un tanque cilíndrico de agua con una altura de 40 metros (similar a la de un edificio de 10 plantas) y un diámetro también de 40 metros, enterrado a un kilómetro bajo tierra.

4. HAY TRES TIPOS DE NEUTRINOS

En la naturaleza existen tres tipos diferentes de neutrinos (y su correspondiente antipartículas, los antineutrinos) que denominamos ‘sabores’. Cada uno de esos tipos está asociado con el electrón, el muón y el tauón, ya que la forma en la que se producen los neutrinos está a menudo relacionada con estas otras partículas elementales. Por este motivo, los sabores de neutrinos se denominan neutrino electrónico (ν_e), muónico (ν_μ) y tauónico (ν_τ).

Cada uno de estos neutrinos interactúa de manera diferente con la materia y, por ese motivo, los detectores de neutrinos se construyen con diferentes tecnologías para optimizar el sabor o los sabores de los neutrinos que pueden detectar. Mientras que los neutrinos y antineutrinos de tipo electrónico y muónico se miden con frecuencia desde los años 1956 y 1962 respectivamente, no fue hasta el año 2000 cuando se midió por primera vez el neutrino tauónico. De hecho, hasta la actualidad solo se han medido unas decenas de neutrinos tauónicos.

5. LOS NEUTRINOS CAMBIAN DE SABOR

Una de las peculiaridades de los neutrinos es que, aunque se producen con cierto sabor, este cambia cuando se propagan. Esto quiere decir que, por ejemplo, si bien en el sol únicamente se producen neutrinos de tipo electrónico, el flujo de neutrinos solares que medimos en la Tierra está compuesto por neutrinos de los tres sabores. Este hecho fue un misterio para la comunidad científica hasta que se pudo demostrar que los neutrinos cambian de sabor mientras viajan. Este fenómeno se denomina oscilaciones de sabor y su descubrimiento fue galardonado con el premio Nobel de Física en el año 2015.

En la actualidad, hemos medido este fenómeno de cambio de sabor en neutrinos de la atmósfera, neutrinos de reactores y neutrinos producidos en aceleradores de partículas, y podemos explicarlo mediante las leyes de la física cuántica. En la primera parte de la tesis doctoral “Neutrino properties from the laboratory and the cosmos”, se presenta el estado

actual de la medida de los parámetros que explican las oscilaciones de sabor de los neutrinos. Para ello, se lleva a cabo un análisis en el que se combinan los resultados de todos los experimentos de neutrinos para lograr la máxima precisión [1]. Este trabajo únicamente lo realizan tres grupos independientes a nivel mundial y sirve como referencia para la comunidad científica.

Este fenómeno tiene además implicaciones muy relevantes para el modelo estándar de la física de partículas, la teoría que explica cómo interactúan las partículas y sus propiedades. Esta teoría predice que los neutrinos son partículas sin masa (y que por tanto, viajan a la velocidad de la luz). No obstante, el fenómeno de oscilaciones de neutrinos sólo se puede explicar si al menos dos de los neutrinos tienen masa. Por tanto, la observación de las oscilaciones de neutrinos implica que el Modelo Estándar es una teoría incompleta

6. ¿CUÁNTO PESA UN NEUTRINO?

El fenómeno de oscilación de sabor requiere que al menos dos de los neutrinos tengan masa. En la actualidad, podemos poner cotas superiores a estas masas, partiendo, por ejemplo, de observaciones sobre las estructuras del Universo –así sabemos que deben ser muy bajas, posiblemente cientos de miles de veces inferiores a la del electrón–, pero ningún experimento las ha medido aún. Uno de los principales proyectos diseñados para este fin se basa en la conservación de la energía en la desintegración de núcleos de tritio (un isótopo del hidrógeno con dos neutrones y un protón en el núcleo). Además, las observaciones sobre las estructuras del universo, entre otras, también permiten acotar el valor de la masa de los neutrinos. En la primera parte de la tesis doctoral, los resultados de este experimento y las observaciones del universo se usan para actualizar los rangos de valores posibles para las masas de los neutrinos

7. ¿CÓMO INTERACCIONAN LOS NEUTRINOS CON LA MATERIA?

El fenómeno de oscilación de neutrinos tiene implicaciones muy relevantes para el Modelo Estándar de la física de partículas, la teoría que explica cómo interactúan las partículas y sus propiedades. Esta teoría predice que los neutrinos son partículas sin masa, por lo que no podrían cambiar de sabor. Así, la observación de las oscilaciones de neutrinos implica que el Modelo Estándar está incompleto.

Para explicar la masa de los neutrinos se han formulado distintas teorías, a veces llamadas “extensiones” del Modelo Estándar. Estas propuestas pueden conllevar también modificaciones a la forma en que los neutrinos, en teoría, interactúan con la materia.

Utilizando experimentos en los que se estudia directamente la interacción de neutrinos con electrones, protones y neutrones en el laboratorio, se puede poner a prueba estas predicciones. Además, los experimentos de oscilaciones de neutrinos también aportan información complementaria. En concreto, combinando datos de neutrinos solares con datos de neutrinos de reactores, en los próximos años podremos probar si las nuevas e hipotéticas interacciones son aproximadamente un 10% más fuertes que las que predice el Modelo Estándar [2]. Este es uno de los resultados que forman parte de la segunda parte de la tesis doctoral.

Además, las medidas que prueban las proporciones entre materia y radiación a lo largo de la historia del universo también sirven para acotar estas nuevas interacciones. En el pasado, el universo era un plasma donde los neutrinos, los electrones y la luz interactuaban constantemente. Al expandirse el universo, ese plasma se fue enfriando y las interacciones pasaron a ser cada vez menos frecuentes hasta que los neutrinos pudieron escapar del plasma y viajar libremente. Si los neutrinos interactúan de manera diferente con los electrones, este proceso de desacoplamiento del plasma se vería modificado, y produciría una diferencia entre nuestras predicciones y las observaciones [3]. En la tesis, se utiliza este argumento para acotar de manera independiente las interacciones de los neutrinos con los electrones.

8. ¿SON LOS NEUTRINOS REALMENTE ‘NEUTROS’?

Los modelos que intentan explicar la masa de los neutrinos a menudo predicen que los neutrinos dejarían de ser partículas neutras -como indica su nombre- y podrían interactuar, por ejemplo, con campos eléctricos y magnéticos. Otro de los trabajos que se incluye en la tesis doctoral aborda esta cuestión. En concreto, se establecen límites a las interacciones entre los neutrinos y el campo magnético del sol.

En el sol se producen únicamente neutrinos, no antineutrinos. Sin embargo, estos neutrinos podrían interactuar con el campo magnético del sol y tendría lugar un fenómeno denominado precesión de spin-sabor, que daría lugar a un flujo de antineutrinos solares. Dado que no hemos observado antineutrinos provenientes del sol en los observatorios de neutrinos, podemos acotar esta hipótesis [4]. Para ello, se utilizan datos de diversos experimentos como KamLAND y Super-Kamiokande, en Japón, Borexino, en Italia, y SNO, en Canadá

9. ¿HAY MÁS DE TRES NEUTRINOS?

Aunque hasta la fecha únicamente hemos detectado tres tipos de neutrinos, cabe la posibilidad de que existan más. Si estos no interactuasen con la materia, entonces solo

podríamos detectarlos de manera indirecta en experimentos de oscilaciones de neutrinos o por su impacto en la evolución del universo. Esta segunda manera de estudiar la existencia de neutrinos de masa muy grande pero que no interactúan con la materia -neutrinos estériles o leptones pesados neutros- se propuso por primera vez en uno de los trabajos recogidos en la tesis [5].

10. ¿QUÉ RELACIÓN EXISTE ENTRE LOS NEUTRINOS Y LA MATERIA OSCURA?

Los neutrinos no son la única evidencia de que hay física más allá del Modelo Estándar. Desde hace décadas, observaciones astronómicas y cosmológicas muy diversas confirman que la materia que conocemos forma únicamente el 15% de la materia del universo. El 85% restante es una forma de materia que no interactúa con la luz y que, por tanto, no podemos ver. Sin embargo, sí que podemos observar su influencia gravitatoria y deducir su presencia. Esta forma de materia desconocida se conoce como materia oscura y su naturaleza es uno de los grandes misterios de la ciencia en la actualidad.

En la tercera parte de la tesis doctoral, se proponen dos formas en las que los neutrinos podrían contribuir a entender la naturaleza de la materia oscura para dos casos concretos: si estuviese compuesta por agujeros negros originados en los primeros instantes del universo [6] o si consistiese en partículas extremadamente ligeras [7]. Con análisis específicos en la siguiente generación de experimentos de neutrinos, estas dos hipótesis se pueden explorar, ayudando a arrojar luz sobre el misterio de la materia oscura

11. ¿QUÉ PUEDEN ENSEÑARNOS LOS NEUTRINOS SOBRE LAS LEYES FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA?

El Modelo Estándar, a pesar de ser una teoría incompleta, describe de manera precisa muchos de los procesos que observamos a nivel microscópico. Por otra parte, la relatividad general de Einstein predice con precisión los efectos de la gravedad en el universo, es decir, en escalas mucho más grandes. Las teorías de gravedad cuántica buscan unificar ambas descripciones de la naturaleza de manera consistente. En ocasiones, estas teorías predicen diferencias en las propiedades de las partículas y sus correspondientes antipartículas. Analizando datos de neutrinos y antineutrinos por separado, se puede comprobar si estas predicciones son ciertas [8] y, por tanto, aprender sobre las leyes fundamentales de la naturaleza.

Aunque la física de neutrinos ha avanzado considerablemente en las últimas décadas, aún quedan una gran cantidad de respuestas por contestar. ¿Cómo obtienen su masa los neutrinos? Cuáles son exactamente los parámetros que explican las oscilaciones de sabor?

¿Cuánto pesan los neutrinos? ¿Coinciden el resto de propiedades con las que predice el Modelo Estándar de la física de partículas? ¿Pueden interaccionar con campos magnéticos o eléctricos? ¿Cómo interactúan con la materia? ¿Existen más tipos de neutrinos? ¿Cómo afectarían estas propiedades a las medidas en nuestros experimentos? ¿Cómo cambia nuestro conocimiento sobre la historia del universo si los neutrinos se comportan de manera diferente? ¿Están la materia oscura y los neutrinos relacionados? ¿Podemos utilizar neutrinos para aprender sobre qué es la materia oscura?

Para resolver algunas de estas cuestiones será imprescindible un enfoque multidisciplinar que combine la información que podemos obtener de observaciones astronómicas y cosmológicas junto con los datos recogidos en los experimentos de neutrinos en la Tierra. Para continuar con este aprendizaje, la comunidad internacional está llevando a cabo experimentos capaces de medir neutrinos de diferentes orígenes, para así maximizar su potencial. En la tesis doctoral, se aborda el papel que jugaran algunos de ellos -DUNE, en Estados Unidos, JUNO, en China, Hyper-Kamiokande, en Japón, entre otros- y los avances que esperamos en la comprensión de las propiedades de los neutrinos

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] de Salas, P.F., Forero, D.V., Gariazzo, S. *et al.* 2020 global reassessment of the neutrino oscillation picture. *J. High Energ. Phys.* **2021**, 71 (2021).
[https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2021\)071](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2021)071)
- [2] Martínez-Miravé, P., Molina Sedgwick, S., Tórtola, M., Nonstandard interactions from the future neutrino solar sector. *Phys. Rev. D* **105** **2022** 035004 (2022).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.035004>
- [3] de Salas, P. F., Gariazzo, S., Martínez-Miravé, P., Pastor, S., Tórtola, M., Cosmological radiation density with non-standard neutrino-electron interactions, *Phys.Lett.B* **820**, 136508 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2021.136508>
- [4] Akhmedov, E., Martínez-Miravé, P. Solar flux: revisiting bounds on neutrino magnetic moments and solar magnetic field. *J. High Energ. Phys.* **2022**, 144 (2022).
[https://doi.org/10.1007/JHEP10\(2022\)144](https://doi.org/10.1007/JHEP10(2022)144)
- [5] Gariazzo, S., Martínez-Miravé, P., Mena, O., Pastor, S., Tórtola, M., Non-unitary three-neutrino mixing in the early Universe, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **03** **2023** 046 (2023). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2023/03/046>

- [6] De Romeri, V., Martínez-Miravé, P., Tórtola, M., Signatures of primordial black hole dark matter at DUNE and THEIA, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 10 **2021** 051 (2021). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2021/10/051>
- [7] Dev, A., Machado, P.A.N., Martínez-Miravé, P. Signatures of ultralight dark matter in neutrino oscillation experiments. *J. High Energ. Phys.* **2021**, 94 (2021). [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2021\)094](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2021)094)
- [8] Barenboim, G., Martínez-Miravé, P., Ternes, C.A, Tórtola, M., Neutrino CPT violation in the solar sector, *Phys.Rev.D* 108 **2023** 3, 035039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.035039>