



## BREVE HISTORIA DEL NEUTRINO

*Oswaldo Civitarese*

Departamento de Física. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad  
Nacional de La Plata. IFLP-CONICET, diag 113 y 63, La Plata  
Email: [osvaldo.civitarese@fisica.unlp.edu.ar](mailto:osvaldo.civitarese@fisica.unlp.edu.ar)

---

### *Palabras clave*

Neutrinos livianos  
Interacciones  
electrodébiles  
Decaimientos beta  
doble  
Extensiones del  
modelo estandar  
Axiones  
Bosones derechos  
Neutrinos pesados

### *Keywords*

Light neutrinos  
Electroweak  
interactions beyond  
the standard model  
Nuclear double  
beta decay  
Right-handed  
bosons  
Heavy neutrinos

**Resumen** En esta presentación me referiré a las cuestiones relacionadas con la física del neutrino, en especial al valor de su masa y a su papel en el esquema de interacciones fundamentales. Se discutirá la posibilidad de relacionar su valor con los correspondientes a los generadores de corrientes derechas en las extensiones mínimas del modelo Estándar. Analizaremos el decaimiento beta doble y los límites actuales para los ángulos de mezcla y masas de los auto-estados de masa en las diversas jerarquías. Finalmente discutiremos la conexión entre la física de neutrinos y la física de la materia oscura.

**Abstract** Brief history of the neutrino. In these notes I shall address some basic questions related to neutrino physics, the value of its mass and its role in the scheme of fundamental interactions. In this context I will focus the attention on the extensions of the Standard Model of Electroweak Interactions, including right-handed bosons and heavy mass neutrinos. Particularly, I will analyze the case of the neutrinoless double beta decay as a tool to assess the value of the light neutrino. Finally I will discuss the connection between the problem of the neutrino mass in astrophysics and in dark-matter physics.

---

### Dedicatoria

No puedo comenzar estas notas sin antes agradecer a las autoridades de la Academia y a sus miembros por el honor conferido, esperando estar a la altura del mismo.

Deseo dedicar estas notas al Dr Daniel Bes, a quién considero mi maestro y a quién se debe el desarrollo de las actividades de física nuclear teórica en

Argentina y al Dr. Mario Mariscotti, impulsor durante décadas de las actividades en física experimental en el país, concretadas en la construcción y puesta en funcionamiento del Laboratorio TANDAR.

---

## 1. Introducción

En esta presentación me referiré a los aspectos discutidos en la conferencia que expuse con motivo de mi incorporación a la Academia Nacional de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.

El conocimiento actual referido a la composición de la materia y sus interacciones está contenido en el llamado Modelo Standard, que incluye un sector de interacciones fuertes (SU(3)), un sector de interacciones débiles (SU(2)) y al electromagnetismo (U(1)).

A los generadores de las representaciones respectivas (quarks, gluones, leptones cargados y neutros, bosones cargados y neutros) se suman condiciones requeridas por la observación: confinamiento y libertad asintótica en el sector de quarks y gluones, covarianza relativista e invarianza de gauge y (hasta el momento) ruptura máxima de la paridad en el sector electrodébil (solo las corrientes izquierdas están permitidas en la teoría).

El mecanismo de Higgs (acoplamiento al bosón de Higgs) proporciona una explicación a la existencia de masas y a la estructura de las interacciones a diferentes escalas, desde la fuerte a la nuclear y atómica. Como es sabido, la teoría cuántica de campos y la mecánica cuántica relativista proporcionaron, a lo largo de décadas, las herramientas de cálculo adecuadas para la descripción de las observaciones.

No obstante la consistencia del esquema descripto, persisten algunos serios interrogantes, a los que intentaré hacer referencia en estas notas, que constituyen el tema de mi trabajo y del trabajo de muchos colegas con los que trabajé. Estos interrogantes son (primariamente):

*a) Naturaleza y composición del neutrino (es una partícula de Dirac y por lo tanto distinta de su antipartícula o de Majorana, y por lo tanto idéntica a su antipartícula ?*

*b) Cuál es su masa, ya que si la posee ella no proviene del mecanismo de Higgs,*

*c) Qué ocurre con las corrientes derechas y por qué limitar el conjunto de bosones  $W_{\pm}$  y  $Z_0$  al sector izquierdo?*

*d) Por qué persistir con representaciones de dobletes leptónicos (electrón, anti-neutrinos) izquierdos y singuletes (positrones) derechos?*

e) *Es posible mantener la noción de conservación del tipo leptónico? (en otras palabras: electrones y muones puede cambiar su estructura en presencia de los núcleos atómicos?)*

f) *Existen otras especies de neutrinos además de los asociados a los leptones cargados?*

g) *Cómo entra en el esquema del Modelo Standard la materia oscura?*

En lo que sigue me referiré brevemente a cada cuestión. Los detalles se consignan en la lista de publicaciones que aparece al final de las notas.

---

## 2. La Escuela de Roma: Fermi y Majorana

La historia del neutrino comienza con la observación del decaimiento beta y en su interpretación teórica, debida principalmente al trabajo del físico italiano Enrico Fermi (Fermi, 1933, 1934), quien observó que las cadenas de decaimientos con cambio de carga que tenían lugar en los núcleos atómicos implicaban la transformación de neutrones en protones (modo  $\beta^-$ ) o protones en neutrones, (modo  $\beta^+$ ) y estaba acompañada por la emisión de electrones o positrones, respectivamente.

Cuando estos decaimientos eran analizados en términos de estas partículas el balance de energías mostraba la violación del principio de conservación de la energía, algo inédito en Física.

El balance de cargas estaba correctamente descrito en la relación del número de protones del estado inicial con respecto al número de protones y electrones o positrones del estado final pero no en el balance correspondiente a la diferencia de energía entre los estados iniciales y finales y la correspondiente a la masa del electrón (positrón) emitidos. Entonces se postuló la existencia de una partícula, cuya masa debía ser extremadamente pequeña, su carga eléctrica nula y cuyo momento angular intrínseco debía ser semi-entero. Esta partícula fue denominada neutrino (*piccolo neutron*).

El estudio de las propiedades del neutrino impactó en el desarrollo de la teoría de partículas elementales y recibió nuevo impulso al formular Ettore Majorana su famoso postulado, que en términos sencillos consiste en afirmar que el neutrino es su propia antipartícula (Majorana, 1932). Junto al trabajo pionero de Majorana, las primeras consideraciones formuladas en relación al neutrino y sus propiedades, fueron concretadas por el físico italiano, naturalizado ruso, Bruno Pontecorvo, ex-discípulo de Enrico Fermi (Pontecorvo, 1957) en el Instituto de Física Nuclear de Dubna, hoy denominado Instituto N. N. Bogoliubov.

En su trabajo de 1957 (Pontecorvo, 1957) y en trabajos posteriores

(Pontecorvo, 1968), Pontecorvo se refirió a la posible transformación de una especie de neutrino en otro y planteó la diferencia entre neutrinos del sabor electrón y del sabor muón (Bilenky, 1978).

Uno de los discípulos de Pontecorvo, S. M. Bilenky, describió dichos avances en 2015 (Bilenky, 2015). Pontecorvo discutió no sólo el problema de la masa del neutrino, sino también la cuestión de las oscilaciones y la presencia de corrientes en los canales correspondientes a leptones pesados.

Pese a las décadas transcurridas desde entonces, ya casi una centuria, los problemas generados por el descubrimiento del neutrino como elemento esencial en la descripción de la estructura de la materia, sus componentes elementales y sus modos de interacción y decaimiento continúan vigentes.

Como hemos mencionado en la Introducción a estas notas, no conocemos aún el valor de la masa del neutrino, no sabemos si existen especies extra de neutrinos, no sabemos si el modelo standard de las interacciones electrodébiles contiene corrientes derechas o si solamente contiene corrientes izquierdas, no conocemos el mecanismo de generación de masa para el neutrino y no sabemos qué papel cumple el neutrino en la relación de materia oscura y materia visible.

Los detalles básicos de la formulación teórica convencional pueden consultarse en los textos de Weinberg (1996), Lee (1981), Bailin y Love (1993) y Aitchinson y Hey (1982).

En lo que sigue discutiré estas cuestiones, de la manera más sencilla posible, a partir de los resultados de nuestro trabajo, tal como se indica en las publicaciones respectivas (ver Referencias). Como fuente de información adicional me referiré al video de la charla de incorporación a la Academia, presentada el 21 de mayo del 2021.

---

### **3. El comienzo: problemas y soluciones**

Desde el agregado del neutrino al conjunto de partículas y/o grados de libertad necesarios para describir los decaimientos electrodébiles está pendiente la cuestión referida a su representación formal como fermión tipo Dirac (cada partícula es distinta a la antipartícula correspondiente a la representación) o tipo Majorana (cada partícula es idéntica a la respectiva antipartícula).

El neutrino es un fermión eléctricamente neutro y su momento angular intrínseco (spin) es semientero. A diferencia del neutrón, que también es un fermión de carga nula y que a nivel quarks está compuesto por dos quarks

down y un quark up, el neutrino descrito como una combinación de estados de masa oscila entre diferentes estados de sabor.

El sabor es una forma de identificar al leptón cargado que acompaña al neutrino (sabor electrón, muón o tau). Las representaciones correspondientes a cada sabor están recopiladas, entre otras fuentes, en el texto de Mohapatra y Palash (1991).

Esta particularidad, la de oscilar entre estados, tal como lo fuera anticipado por Bruno Pontecorvo (op. cit), ha sido observada en el sistema de kaones, donde la oscilación tiene lugar entre estados de partícula y antipartícula (Beshtoev, 2013). Si el neutrino es un fermión de Dirac entonces el término de masas de la amplitud de transición del decaimiento beta doble nuclear (modo sin neutrinos en el estado final) debe anularse. Si el neutrino es un fermión de Majorana dicho término debe ser no nulo y el decaimiento beta doble sin neutrinos en el estado final debe ser observado.

En nuestros trabajos (ver Referencias) hemos estudiado este problema en detalle y determinado valores teóricos, algunos de los cuales han sido confirmados experimentalmente, como el mecanismo de supresión de elementos de matriz del operador de Gamow-Teller en transiciones a núcleos doble impares, propuesto en 1987 (Civitarese et al., 1987), y otros aún aguardan por su confirmación, como los decaimientos beta doble en el sector de positrones propuesto en 1993 (Suhonen et al., 1998a). En Suhonen et al. (1998b) hemos consignado estos resultados.

---

#### 4. El fenómeno de las oscilaciones

Si consideramos al neutrino como una partícula elemental su estructura no debe cambiar como función del tiempo. Sin embargo, al estudiarse diversas reacciones que involucran neutrinos, por ejemplo las que ocurren en el Sol, se observa un déficit en el flujo de neutrinos tipo electrón. Algo análogo ocurre con los neutrinos generados en el decaimiento débil de mesones al ingresar a la atmósfera terrestre.

Una posibilidad (Smirnov, 2003), confirmada por las mediciones efectuadas por R. Davis mediante la captura de neutrinos tipo electrón provenientes del Sol (neutrinos solares) por núcleos de Cl que decaen a núcleos de Argon acompañados por la emisión de electrones (Cleveland et al., 1998) y más recientemente por Jelley et al. (2009) y Kajita en Kamioka (Abe et al., 2015), consiste en describir a los neutrinos de cada especie de sabor (electrón, muón, tau) como combinación lineal de tres (o más) autoestados (neutrinos de masa). Como lo prescribe la mecánica cuántica, la combinación lineal a tiempo  $t=0$ , es decir durante el proceso inicial, y la correspondiente a

un dado tiempo  $t$  posterior, dependerá de la diferencia en energía entre ambas combinaciones de estados. Este descubrimiento es una pieza clave en la comprensión actual de los fenómenos que involucran neutrinos y mereció el reconocimiento de la Academia Sueca en varias oportunidades.

Ahora bien, si consideramos a los neutrinos involucrados en las corrientes electrodébiles como compuestos por autoestados de masa surge inmediatamente la cuestión referida al número y ordenamiento jerárquico de tales autoestados (Mikheyev y Smirnov, 1985; McKellar y Thomson, 1994; Dasgupta et al., 2008; Schwetz et al., 2011). Esta cuestión, que hace a la posible existencia de los llamados neutrinos estériles, es un tema de investigación actual, por ejemplo, en el estudio de la evolución de estados previos al colapso y explosión de supernovas (Acero et al., 2022).

El carácter compuesto de los neutrinos posibilita la manifestación de fenómenos de decoherencia en el flujo de neutrinos provenientes de fuentes lejanas debido a las interacciones con otras partículas en el medio intergaláctico o interestelar (Bes et al., 2017, 2018). Recientemente hemos utilizado este mecanismo para identificar posibles distribuciones de materia oscura (Penacchioni et al., 2019, 2022).

---

## 5. Neutrinos en medios densos, resonancias

Como hemos mencionado anteriormente, la textura de la matriz de masas y el ordenamiento de las masas primordiales es objeto de intensas búsquedas a nivel experimental y nuestro conocimiento actual se ve reflejado en límites para los ángulos de mezcla y jerarquías de masas. No obstante, la distinción entre jerarquías de masas normal, inversa o degenerada no está establecida fehacientemente.

El trabajo de Dighe y Smirnov (2000) y Balantekin y otros (Balantekin et al., 2022) permite incorporar un elemento más a esta formulación teórica al establecer la posible existencia de resonancias asociadas a la interacción de neutrinos con medios densos.

Debido a la baja intensidad de los acoplamientos entre neutrinos y la materia hadrónica, los efectos de resonancias requieren, para evidenciarse, de altas concentraciones de materia.

En el trabajo reportado en Saez et al. (2022) estudiamos el comportamiento de estas resonancias en medios inter y extra-galácticos y en particular en los estadios de pre-explosión de supernovas. Tomando como ejemplo una supernova de la clase de la SN1987A y adoptando los modelos propuestos por Smirnov y Balantekin es posible analizar escenarios de interés

para la física de sistemas análogos tomando el comportamiento de los neutrinos como fuente de información.

---

## 6. El problema de la masa del neutrino

Hasta el momento la asignación de un valor a la masa del neutrino depende de los límites extraídos del proceso que se observa, e.g: neutrinos provenientes del Sol, neutrinos provenientes de decaimientos en la atmósfera terrestre, neutrinos con energías al final del espectro de decaimientos beta. Los valores varían en el rango comprendido entre decenas de electrón-voltios (eV) a milésimas de eV.

La imposición de una dada jerarquía de masas, sea ésta normal, inversa o degenerada, limita muy fuertemente los valores estimados para las diferencias de los cuadrados de las masas. Para el caso de la jerarquía normal el rango de masas esperado se puede tornar inobservable para las mediciones que se efectúen con las técnicas actuales (Barabash, 2018).

De esto surge la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de detección. A los diseños tipo SNO (Jelley et al., 2009) y Kamiokande (Fukuda et al., 2003) se suman las propuestas de aumento de volumen y cantidad del material de los detectores. Tal el caso de Super Kamikande (Abe et al., 2015), SNO+, Xenon1T, etc. Aquí el concepto dominante es el del aumento del material del detector como forma de mejorar la estadística acortando los tiempos de medida.

Para los detectores donde el material que decae es el mismo material que compone al detector, tal el caso de las mediciones relacionadas con el decaimiento beta doble en Ge, Te, Xe o en los centelladores (INa), la sensibilidad debe ser mayor para energías de los electrones emitidos en valores correspondientes al final del espectro. Para estos casos se debe, además, efectuar un estudio muy detallado de la composición de la radiación de fondo.

A la vista de estos emprendimientos, las mediciones que efectuó Davis en una escala mucho menor de recursos, y que le significaron el otorgamiento del premio Nobel, pueden ser calificadas de heroicas.

La determinación experimental del valor de la masa del neutrino no es, ciertamente, un mero problema académico. Significa elucidar cuestiones fundamentales y constituye, casi cien años después del descubrimiento del neutrino, un tema abierto cuya importancia en la comprensión de los fenómenos de la Naturaleza es crucial.

## 7. Corrientes derechas, bosones derechos, neutrinos pesados

El modelo standard de las interacciones electrodébiles, formulado por Weinberg, Salam y Glashow (Bilenky et al., 1982) establece la descripción de decaimientos beta mediante la emisión o absorción de bosones cargados (bosones W) seguidos por la emisión de pares electrón (positrón)-antineutrino (neutrino) todos ellos representados por componentes izquierdas de las corrientes.

Las constantes de acoplamiento, en cada caso, resultan del cociente entre la constante de Fermi y el cuadrado de la masa de los bosones mediadores. En el caso de corrientes neutras las interacciones están mediadas por el bosón neutro (bosón  $Z_0$ ) con la misma simetría izquierda. El modelo estándar viola maximalmente la simetría quiral al incluir sólo componentes izquierdas de las corrientes. Además, establece que la masa de todas las partículas participantes de los decaimientos, excepto los neutrinos, se generan a partir del acoplamiento al bosón de Higgs.

Dado que los neutrinos de corriente exhiben el fenómeno de las oscilaciones entre estados de sabor, neutrinos tipo electrón se pueden convertir en neutrinos tipo tau o mu porque poseen masa, es posible plantear la necesidad de ampliar el modelo estándar incorporando términos derechos de las corrientes. Si se trabaja en esta dirección, incorporando un nuevo grupo SU(2) derecho al esquema SU(2) (izquierdo) x U(1) (electromagnético), entonces la construcción de corrientes derechas implica necesariamente la introducción de un nuevo conjunto de bosones mediadores derechos, tanto cargados como neutros (Vergados, 2016).

Al conjunto de masas de los neutrinos livianos debe sumarse un nuevo conjunto de autoestados de masas pesadas, del orden de las centenas de MeV (Vergados, 2016). De acuerdo a este esquema a la matriz de mezcla del sector de masas livianas debe agregarse una nueva matriz de mezcla para el sector de masas pesadas. Naturalmente esto agrega nuevos parámetros cuyos valores deben determinarse experimentalmente; tal es el caso de ángulos de mezcla y diferencias cuadráticas de masas entre neutrinos pesados.

Las masas esperadas para los bosones derechos, en ciertas reacciones con protones, son del orden del TeV. Experimentos como los llevados a cabo en el acelerador del CERN han llegado al borde inferior de ésta región de energías y es de esperar que en el futuro inmediato la respuesta a la cuestión referida a la existencia de tales nuevas partículas pueda establecerse fehacientemente.

Mientras tanto se cuenta con otra fuente de información y es la aportada



por los estudios del decaimiento beta doble, al que nos referiremos a continuación.

En el marco de nuestros cálculos teóricos y considerando límites a la masa del neutrino del orden de décimas de eV hemos obtenido valores del orden de 2-5 TeV para las masas de los eventuales bosones derechos (Civitarese et al., 2015, 2016). Aquí es importante destacar que para valores menores de la masa del neutrino (milésimas de eV o menores) y la jerarquía normal en el ordenamiento de autoestados de masa, es posible obtener valores para los bosones derechos cuasi-degenerados con respecto a las masas de los bosones izquierdos.

De confirmarse los resultados recientemente divulgados por el Fermi Lab, ésta podría ser la explicación más sencilla y la más interesante desde el punto de vista teórico: neutrinos masivos ultra-livianos y simetrías completas de las corrientes electrodébiles.

Subsistiría aún el problema del mecanismo de generación de masa para el neutrino, y a este aspecto nos referiremos al mencionar la posible existencia del axión en la Sección 9 de esta nota.

---

## 8. El decaimiento beta doble

El decaimiento beta es, como mencionamos anteriormente, el proceso mediante el cual un neutrón se transforma en un protón acompañado de un par electrón-antineutrino (decaimiento  $\beta^-$ ), o un protón se transforma en un neutrón acompañado de un par positrón-neutrino (decaimiento  $\beta^+$ ). Ambos modos de decaimiento son posibles cuando a partir de un núcleo dado, el llamado núcleo madre, el estado final en el núcleo resultante, el llamado núcleo hija, posee una energía menor a la del estado inicial (Bohr et al., 1969).

Utilizando la notación usual diremos que el núcleo inicial, con  $N$  neutrones y  $Z$  protones, decae al núcleo final con  $N-1$  neutrones y  $Z+1$  protones (modo de decaimiento  $\beta^-$ ) o  $N+1$ ,  $Z-1$  (modo de decaimiento  $\beta^+$ ). De esta manera puede explicarse la secuencia de estados nucleares que se generan a partir de una especie nuclear dada. Una variante en las cadenas de decaimiento, que se observa en un número limitado de casos, ocurre cuando a partir de un núcleo dado, con  $N$  neutrones y  $Z$  protones se pueden poblar estados en un núcleo resultante con  $N-2$  neutrones y  $Z+2$  protones. Este proceso, conocido como decaimiento beta doble, ocurre cuando el estado fundamental del núcleo intermedio con  $N-1$  neutrones y  $Z+1$  protones posee una energía mayor que la del estado fundamental del núcleo inicial. En este proceso, a su vez, pueden manifestarse dos canales distintos: a) el decaimiento beta doble con emisión de dos electrones y dos neutrinos, que es el

denominado modo  $2\nu\beta\beta$ , y b) el decaimiento beta doble con emisión de dos electrones pero sin neutrinos, denominado modo  $0\nu\beta\beta$  (Suhonen et al., 1998b).

En el caso del modo  $2\nu\beta\beta$  la descripción teórica consiste en la consideración de dos decaimientos sucesivos con emisión de dos electrones y dos antineutrinos. El espectro de energía de los dos electrones emitidos exhibe, de acuerdo a las mediciones efectuadas, una forma cuasi-gaussiana que se extiende hasta el valor de la energía máxima permitida, que corresponde a la diferencia de energía entre los estados inicial (núcleo  $N, Z$ ) y final (núcleo  $N-2, Z+2$ ), ya que el par de antineutrinos emitidos no es detectado. Este modo de decaimiento, si bien muy raro ya que su vida media es del orden de  $10^{18}$ - $10^{20}$  años, y por lo tanto interesante en sí mismo desde el punto de vista del desarrollo de técnicas experimentales (Barabash, 1996), pero no aporta información alguna respecto a la naturaleza de los neutrinos.

El decaimiento beta doble con emisión de dos neutrinos ha sido observado en varios casos y los modelos teóricos discreparon inicialmente en la interpretación de los mismos, hasta que propusimos la inclusión de interacciones entre protones y neutrones en el canal de dos partículas, tanto en modelos esquemáticos como en modelos realistas de la estructura nuclear involucrada (Civitarese et al., 1987). Desde entonces, nuestros resultados teóricos para el modo  $2\nu\beta\beta$  fueron confirmados experimentalmente.

En lo que respecta al modo de decaimiento beta doble sin neutrinos, modo  $0\nu\beta\beta$ , la búsqueda experimental continúa y el límite establecido actualmente para la masa del neutrino, cuyo valor esperado debe ser menor a una décima de eV, proviene de la no-observación del modo  $0\nu\beta\beta$  al nivel de vidas medias del orden o mayores que  $10^{24}$  años (Barabash, 2018).

La explicación teórica del modo de decaimiento con dos neutrinos en el estado final constituyó un problema que suscitó la atención de los físicos teóricos durante décadas hasta que el agregado de interacciones entre protones y neutrones en el canal de dos partículas aportó la solución, como ya hemos mencionado. En lo que respecta a la teoría correspondiente al modo sin neutrinos, el sector de estructura nuclear no exhibe la misma sensibilidad asociada al otro canal (modo con dos neutrinos) pero en este caso la incerteza mayor corresponde al modelo adoptado para describir las interacciones débiles, como hemos discutido en varios trabajos (Suhonen et al., 1998).

Estos estudios se desarrollan de manera continuada, tanto a nivel de la formulación de modelos teóricos como a nivel del diseño de nuevas técnicas experimentales. Desde hace 20 años nos hemos ocupado de este problema y documentado los aportes de colegas teóricos y experimentales en la serie de conferencias MEDEX que se llevan a cabo cada dos años en el Instituto Tecnológico de la Universidad de Praga.

## 9. Axiones

La problemática expuesta en relación al neutrino, que lleva ya alrededor de cien años desde la propuesta original de Fermi y Majorana, está acompañada en este momento por otra cuestión no menos importante: la referida a la existencia y composición de la materia oscura. Como las observaciones astronómicas muestran, el universo se expande de manera acelerada, tal como si entre los cúmulos de materia visible existiesen formas de materia y/o energía repulsivas. Basado en estas observaciones el balance en fracciones indica que la materia visible constituye alrededor del 5%, la materia oscura 25% y la energía oscura 70%.

Como hemos mencionado en el material expuesto en las secciones anteriores, el mecanismo de Higgs no es aplicable al caso del neutrino, cuya masa no-nula es requerida por la existencia de las oscilaciones entre diferentes estados de sabor.

Hace ya varios años, R. Peccei y H. Quinn (Peccei y Quinn, 1977) propusieron, como forma de explicar el problema de la no-observación del momento dipolar del neutrón, la existencia de una partícula, el axión, definido como un bosón escalar neutro. A la propuesta original de Peccei y Quinn se suma, en la actualidad, la posibilidad de interpretar las propiedades de la materia oscura a partir del axión y su acoplamiento con otras partículas (Chada Day et al., 2021).

Esta alternativa abre, a su vez, una muy interesante posibilidad: la referida al acoplamiento de neutrinos y axiones. Los desarrollos teóricos respectivos han dado lugar al trabajo reciente de Penachioni et al. (2022).

De acuerdo a nuestros resultados, existe una relación directa entre los valores de la masa del axión y la masa del neutrino. Esta relación está definida por una constante, la constante de acoplamiento axión-neutrino, y por el valor de vacío del campo del axión. Este es el objeto de nuestro trabajo actual y constituye una muy interesante conexión en la intersección de los modelos que describen las extensiones del modelo estándar de interacciones electrodébiles, los modelos de estructura nuclear y los modelos de materia oscura.

---

## 10. Conclusiones

En esta presentación he intentado describir algunos de los aspectos importantes de la búsqueda por conocer que nos propone la Física. En este caso, la búsqueda se centra en el neutrino. Sin el neutrino el universo tal como

lo conocemos no existiría. Es una búsqueda fascinante que implica la integración, en la práctica, de los conceptos provenientes de la teoría de campos, la teoría de partículas elementales, la física nuclear y la astrofísica.

Las posibilidades a futuro son amplias, tanto en las actividades teóricas como en las experimentales. En estas últimas, las expectativas están puestas en la construcción de ambientes adecuados para la ubicación de nuevos dispositivos experimentales, al tipo de los detectores de gran volumen, base de la llamada física sin aceleradores.

Maximizar el potencial de descubrimiento en los experimentos que se están llevando a cabo en reacciones con neutrinos requerirá del desarrollo de la interfase física nuclear - física del neutrino - astrofísica nuclear. En esta dirección se han orientado nuestros trabajos más recientes y varias de las tesis doctorales y de licenciatura que hemos orientado (Colombi, 2020; Saez, 2021; Fushimi, 2021).

Finalmente, deseo mencionar que, localmente, impulsamos junto a colegas argentinos y chilenos, la construcción del laboratorio subterráneo ANDES (Civitarese, 2015), para la realización de experimentos de detección directa de neutrinos y de otros experimentos que requieren de condiciones de muy baja radiactividad de fondo.

La respuesta a todos o parte de los interrogantes que hemos planteado llegará, esperamos, en el futuro inmediato, considerando la intensa actividad en el campo.

---

## Agradecimientos

A mi alma mater, la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), al CONICET, a la Fundación Alexander von Humboldt y a la Fundación J. S. Guggenheim, por el apoyo recibido a lo largo de cuatro décadas de trabajo dedicado a los temas que he expuesto. A mis ex-tesistas y ex-alumnos de tesis de licenciatura de la Facultad de Ciencias Exactas y de la Facultas de Ciencias Astronómicas de la UNLP y a los investigadores que ha formado o aún forman el grupo de investigación en el que me desempeño. Al Dr. Ernesto Maqueda, por su generoso apoyo durante décadas y por haberme brindado su experiencia en temas de ética y política universitaria y de organización institucional en investigación.

---

## Referencias

Aaltonen T et al. (CDF Collaboration) (2022) High-precision measurement of the W boson mass with the CDF II detector Science, 376:170-176.

- Abe K. et al. (T2K Collaboration) (2015) Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with  $6.6 \times 10^{20}$  protons on target. *Physical Review D.*, 91:072010.
- Acero MA et al. (2022) White paper on light sterile neutrino searches and related phenomenology. arXiv:2203.07323.
- Aitchinson JR, Hey AJ (1982) Gauge theories in particle physics. Sussex University Press.
- Bailin D, Love A (1993) Introduction to gauge field theory. CRC Press (Boca Raton, USA), pp. 1-384.
- Barabash S, Saakyan R (1996) Experimental limits on  $2\beta^+$ ,  $K\beta^+$ , and  $2K$  processes for  $^{130}\text{Ba}$  and on  $2K$  capture for  $^{132}\text{Ba}$ . *Physics of Atomic Nuclei*, 59:179-184.
- Barabash S (2018) Possibilities of future double beta decay experiments to investigate inverted and normal ordering region of neutrino mass. *Frontiers in Physics*, 6, 00160, DOI: 10.3389/fphy.2018.00160.
- Bes DR, Civitarese O (2017) Decoherence effects in neutrino fluxes. *AIP Conference Proceedings* 1894, 020006.
- Bes DR, Civitarese O, Mosquera ME (2018) Decoherence effects in neutrino fluxes from the sun and from microquasars. *Journal of Physics: Conf. Series (XLI Symposium on Nuclear Physics 2018)*, 1078, 012004.
- Beshtoev KM (2013) About  $K^0$ ,  $K^0$  meson oscillations at strangeness violation by weak interactions without and with taking into account meson decays. arXiv:1303.1815v1.hep-ph.
- Bilenky SM (2015) Some comments on high precision study of neutrino oscillations. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 12, 453, arXiv:1502.06158 hep-ph,
- Bilenky SM, Pontecorvo BM (1978) Lepton mixing and neutrino oscillations. *Physics Reports*, 41:225-261.
- Bilenky SM, Husek J (1982) Glashow-Weinberg-Salam theory of electroweak interactions and the neutral currents. *Physics Reports (Review Section of Physics Letters)* 90:73-157.
- Bohr AA, Mottelson BR (1969) Nuclear structure. A. Benjamin (Amsterdam), pp. 399-413.
- Chadha Day F, Ellis J, Marsh DFJ (2021) Axion Dark Matter: What is it and why now? CERN-TH-2021-045, IPP/20/91.
- Civitarese O (2015) The ANDES underground laboratory project. *Nuclear and Particle Physics Proceedings* 267, pp. 377–381.
- Civitarese O, Faessler A, Tomoda T. (1987) Suppression of the two-neutrino double  $\beta$  decay. *Physics Letters B*, 194:11.
- Civitarese O, Suhonen J, Zuber K (2015) Simultaneous analysis of neutrinoless double beta decay and LHC pp-cross sections: limits on the left-right mixing angle. *Journal of Physics, Conference Series* 639, 012012.
- Civitarese O, Suhonen J, Zuber K. (2016) Combining data from high-energy proton-proton reactions and neutrinoless double-beta decay: Limits on the mass of the right-handed boson. *International Journal of Modern Physics E*, 25, 1650081.
- Cleveland BT, Daily T, Davis Jr. R, Distel JR, Lande K, Lee CK, Wildenhain PS, Ullman J (1998) Measurement of the solar electron neutrino flux with the homestake chlorine detector. *Astrophysical Journal*, 496:505-526.
- Colombi P (2020) Interacciones entre neutrinos: efectos colectivos y aplicaciones a medios astrofísicos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
- Colombi MP, Civitarese O, Penacchioni AV (2021) Does the DM background affect the propagation of extragalactic neutrinos? *International Journal of Modern Physics E*, 30, 2150081.
- Dasgupta B, Dighe A, Mirizzi A. (2008) Identifying neutrino mass hierarchy at extremely small  $\Theta_{13}$  through earth matter effects in a supernova signal. arXiv:0802.1481v3.
- Dighe AS, Smirnov AY (2000) Identifying the neutrino mass spectrum from a supernova neutrino burst. *Physical Review D*, 62, 033007.
- Fermi E (1933) Tentativo di una teoria dei raggi  $\beta$ . Nota preliminare. *Ricerca Scientifica*, 2.
- Fermi E (1934) Tentativo di una teoria dei raggi  $\beta$ . *Il Nuovo Cimento*, 11: 1-19.
- Fukuda Y et al. (2003) The Super-Kamiokande facility. *Nuclear Instruments and Methods A*, 501: 418-462.
- Fushimi KJ (2021) Estudio de modelos de materia oscura leptónica fría y sus efectos e escenarios de interés cosmológico. Tesis de Doctorado, Facultad de Astronomía, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
- Fushimi KJ, Saez MM, Mosquera ME, Civitarese O (2021) Dark matter, SN neutrinos and other backgrounds in direct dark matter searches. *International Journal of Modern Physics E*, 30: 2150107, arXiv: 2202.03887v1.

- Jelley N, McDonald AB, Robertson Hamish RG (2009) The Sudbury Neutrino Observatory. Annual Review of Nuclear and Particle Science. 59: 431-65.
- Lee TD (1981) Particle physics and introduction to field theory. Harwood Academic Publishers (New York), pp. 1-865.
- Majorana E (1932) Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario. Il Nuovo Cimento, 9:335-344.
- McKellar BHJ, Thomson MJ (1994) Oscillating neutrinos in the early universe. Physical Reviews D, 49:2710.
- MEDEX (2022) El ciclo de conferencias MEDEX es organizado por el Institute of Experimental and Applied Physics de la Czech Technical University, Prague (Czech Republic); la Universidad de La Plata (La Plata, Argentina), y la Universidad de Jyväskylä (Jyväskylä, Finland), y tiene lugar cada dos años desde 1997. Los trabajos presentados y expuestos en MEDEX son publicados por el American Institute of Physics (ver, por ejemplo, AIP Conference Proceedings, 2007, vol. 942, pp 1-115).
- Mikheyev AY, Smirnov AY (1985). Resonance enhancement of oscillations in matter and solar neutrino spectroscopy. Soviet Journal of Nuclear Physics, 42:913–917.
- Mohapatra RN, Palash B (1991) Massive neutrinos in physics and astrophysics. World Scientific Lecture Notes in Physics, 41, pp. 1-336.
- Peccei RD, Quinn HR (1977) CP conservation in the presence of pseudo particles. Physical Review Letters, 38:1440.
- Penacchioni AV, Civitarese O (2019) Extragalactic neutrinos as tracers of dark matter? arXiv:1904.04355v1.
- Pennachioni AV, Civitarese O (2022, en prensa). Constraining the axion mass from the non observation of  $0\nu\beta\beta$ . International Journal of Modern Physics.
- Pontecorvo B (1957) Mesonium and anti-mesonium. Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki, 33:549-551.
- Pontecorvo B (1968) Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge. Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki, 53:1717–1725.
- Saez M (2021) Estudio de formación de elementos pesados con inclusión de neutrinos masivos. Tesis de Doctorado, Facultad de Astronomía, Universidad Nacional de La Plata (Argentina).
- Saez MM, Mosquera ME, Civitarese O (2022 en prensa) Neutrino interactions in liquid scintillators including active-sterile neutrino mixing. International Journal of Modern Physics.
- Schwetz T, Tortola M, Valle JWF (2011) Global neutrino data and recent reactor fluxes: status of three flavour oscillation parameters. arXiv:1103.0734v2.
- Smirnov AY (2003). The MSW effect and solar neutrinos. arXiv e-prints (Preprint hep-ph/0305106)(2003).
- Suhonen J, Civitarese O (1998a) Systematic QRPA study of beta decay and electron capture decay transitions to excited states in 110-114 Cd and 114-122Sn . Nuclear Physics A, 584:449.
- Suhonen J, Civitarese O (1998b) Weak interactions and nuclear structure aspects of nuclear double beta decay. Physics Report, 300:123
- Vergados JD (2016) The standard model and beyond. World Scientific, pp. 1-452.
- Weinberg S (1996) The quantum theory of fields. Cambridge University Press.