

# ¿CÓMO DISTINGUIR NEUTRINOS DE MAJORANA DE NEUTRINOS DE DIRAC?

Aguilar Mayorga Andrea Alejandra (1), Ghislain Delepine David Yves (2)

1 [Bachillerato general, Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León] | [Andrea.mayorga0221@gmail.com]

2 [Departamento de Física, División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato] | [david\_delepine@hotmail.com]

## Resumen

Los neutrinos son partículas fundamentales del modelo estándar, de la familia de los fermiones, pertenecientes al grupo de los leptones. Tienen espín  $\frac{1}{2}$ , no poseen carga, y su masa es casi cero. Existen 3 tipos distintos (electrónico, tau y muónico), asociados respectivamente a cada una de las familias leptónicas. Otra característica de ellos, es que sólo interactúan mediante la fuerza débil, lo que los vuelve muy interesantes para la astrofísica, pues esto significa que pueden recorrer enormes distancias a través del espacio sin interactuar o verse demasiado afectados por la materia, de manera que contienen información bastante fidedigna de lo que ocurre en regiones distantes. Además, otra de las características más peculiares de estas partículas es que son los únicos fermiones descubiertos que podrían constituir su propia antipartícula. De ser esto cierto, podrían ayudar a dar una buena respuesta a una de las grandes interrogantes de la astrofísica en cuanto a por qué hay más materia que antimateria. Por tanto, en este artículo trataré de dar una introducción a la teoría que los propone como su propia antipartícula.

## Abstract

Neutrinos are known as some of the elementary particles according to the Standard Model, from the fermion family, pertaining to the lepton group. They have spin  $\frac{1}{2}$ , with no electric charge and their mass is almost equal to zero. There are 3 different kinds (electronic, tau and muonic), each one respectively associated to each leptonic family. Another of their characteristics is that they only present weak interactions, which makes them very interesting to astrophysics, since this means they are able to travel huge distances through space almost without being affected at all by matter they find along their journey; this way, they contain reliable information about what occurs in distant regions. Besides, another really peculiar characteristic of them is that they are the only discovered fermions that could constitute their own antiparticle. Given this, they could help to answer one of the greatest interrogants in astrophysics about why is there more matter than antimatter all over the observable universe. Therefore, within this article I'll try to give an introduction to the theory that proposes them as their own antiparticle.

## Palabras Clave

Leptones; Antipartícula; Ecuación de Dirac; Número leptónico; Decaimiento Beta.

## INTRODUCCIÓN

### Introducción histórica a los neutrinos

Los neutrinos surgieron en un inicio como partículas teóricas propuestas por Wolfgang Pauli como una solución para compensar una aparente violación a la tan conocida ley de conservación de energía en un proceso llamado “decaimiento Beta”; en ellos un núclido se transforma en otro con la emisión de un electrón. La conservación de cargas requiere que el núclido final tenga un protón más que el inicial; por tanto, el átomo en que se convierta se ubica una posición delante en la tabla periódica respecto a aquel que se convierte. Por ejemplo, el Cobre pasa a Zinc en un proceso tal:  ${}_{29}^{64}\text{Cu} \rightarrow {}_{30}^{64}\text{Zn}$ . [1]

- En 1932, Chadwick se dió cuenta de que lo que sucede aquí, es que un neutrón dentro del núcleo se convierte en un protón, liberando en el proceso un electrón. No obstante, este proceso  $n^0 \rightarrow p^+ + e^-$  requería una violación a la ley de conservación de la energía, y de momento angular además. Ante tal problema, Pauli proporcionó una posible solución en 1929, al postular la existencia de una nueva partícula teórica que era también liberada como un tercer producto, que conservaría la energía al poseer ella la aparentemente faltante. Esta partícula debía ser neutra para conservar la carga eléctrica, con una masa sumamente pequeña y de espín  $\frac{1}{2}$ .
- La existencia de esta partícula fue vista inicialmente con escepticismo, pero en 1933 Enrico Fermi presentó una teoría formal matemática que describía el decaimiento  $\beta$  incluyendo a esta partícula, que llamó “neutrino” ( $\nu$ ). Posteriormente, las pruebas experimentales de la existencia del neutrino fueron dadas por Frederick Reines y Clyde Cowan en 1956, con lo que los neutrinos finalmente dejaron de ser sólo teoría.
- Luego, se planteó la existencia de más de un solo tipo de neutrino, dado que al analizar una regla de conservación del número leptónico propuesta inicialmente como una manera de prever las reacciones que eran posibles y las que no, se vió que cierta reacción de decaimiento ( $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ ), a pesar de conservar la carga y seguir la regla del número leptónico, no se observaba experimentalmente. Entonces, para responder la pregunta de por qué no sucedía si era teóricamente posible, se postuló la existencia de dos distintos tipos de neutrino, uno electrónico ( $\nu_e$ ) y uno muónico ( $\nu_\mu$ ), cada uno asociado a las familias leptónicas del electrón y el muón respectivamente.
- Si se asignaba un número muónico y otro electrónico a las distintas partículas, creando así dos leyes distintas de conservación (una para número electrónico y otra para el muónico), se podía finalmente predecir de manera correcta (o al menos congruente con lo observado experimentalmente) los procesos permitidos y aquellos prohibidos. Después, la existencia del neutrino muónico fue efectivamente demostrada de manera experimental en 1962 por Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger. [1]

- *Tiempo después, en los 70's, un tercer leptón, el llamado "tau", fue descubierto por el grupo de Perl y con él se postuló la existencia de un tercer tipo de neutrino asociado a esta partícula, para el cual también habría entonces una tercera ley de conservación del número leptónico, que sería la del número tauónico. Finalmente, se corroboró la existencia del neutrino tau ( $\nu_\tau$ ) al descubrirse experimentalmente en el año 2000 por parte de la colaboración DONUT en Fermilab.*

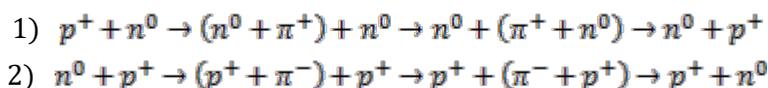
## MATERIALES Y MÉTODOS

Una antipartícula es aquella que tiene la misma masa y espín que la partícula, pero que se distingue de esta porque su carga eléctrica y números cuánticos son opuestos en signo. Posteriormente, al desarrollarse la electrodinámica cuántica, se estableció que cada partícula tiene su antipartícula correspondiente. La antimateria es entonces simplemente la materia compuesta por antipartículas. Por otra parte, existen partículas que son su propia antipartícula, pero, ¿Cómo es esto posible?

Los bosones son, junto con los fermiones, uno de los dos tipos básicos de partículas elementales. Para no ahondar demasiado en ellos, dejémoslo en que los bosones tienen espín entero y los fermiones, semi-entero. Lo que esto implica es que los fermiones se rigen por el principio de exclusión de Pauli, que establece que no puede haber dos fermiones con todos sus números cuánticos idénticos, mientras que por otra parte los bosones no cumplen con este principio. Pues bien, hasta ahora, las partículas que se han encontrado siendo su propia antipartícula son todas bosones, ya que para los bosones neutros, al no tener carga eléctrica, la diferencia entre partícula-antipartícula, no existe. Pero ahora, ¿Qué hay de los fermiones?

Para comenzar, casi todos tienen carga, por lo que desde ahí no pueden ser su propia antipartícula. Sin embargo, la excepción la constituyen los neutrinos, ya que ellos no tienen carga como hemos dicho; no obstante queda otra característica que difiere entre partícula y antipartícula: los números cuánticos. En cuanto a ellos, el único que difiere entre neutrino y antineutrino es el número leptónico. Pese a ello, si admitimos una posible violación a la conservación del número leptónico, entonces no hay restricciones por las cuales los neutrinos no sean iguales a los antineutrinos. Ahora bien, ¿por qué admitiríamos tal violación a una ley de conservación?, la respuesta es que ello podría ayudar a explicar la asimetría que existe en el universo, esto es, por qué hay más materia que antimateria. En 1937 el físico italiano Ettore Majorana propuso una teoría según la cual los neutrinos eran su propia antipartícula, por lo que cuando hablamos de un "neutrino de Majorana" nos referimos a que sea su propia antipartícula, mientras que el "neutrino de Dirac" es distinto a su antipartícula.

Como ya establecimos, todo comenzó al observar el proceso de decaimiento beta. Pero ahora, para probar que un neutrino puede ser de Majorana se necesita otro tipo de reacción, el doble decaimiento beta sin neutrinos ( $0\nu\beta\beta$ ). Normalmente en un núcleo los nucleones ( $n^0$  y  $p^+$ ) interactúan mediante la fuerza nuclear fuerte residual, lo que implica que en el núcleo atómico los protones se transforman continuamente en neutrones y viceversa, en reacciones del tipo:



(1: Un protón emite inicialmente un pión positivo, convirtiéndose en un neutrón; el pión positivo es reabsorbido luego por un neutrón convirtiéndose en un protón.

2: Un neutrón emite un pión negativo convirtiéndose así en un protón. Luego, el pión negativo es reabsorbido por otro protón, dando lugar a un neutrón.)

El resultado de dichas reacciones es una fuerza atractiva. [2]

Pero, existen otras 2 reacciones de interacción entre los nucleones producidas por la interacción débil, que por tanto son menos frecuentes, pero posibles:

$$1) p^+ \rightarrow n^0 + W^+ \rightarrow n^0 + (e^+ + \nu_e)$$

$$2) n^0 \rightarrow p^+ + W^- \rightarrow p^+ + (e^- + \bar{\nu}_e)$$

(En este caso, al haber un exceso de protones, uno de ellos emite un bosón  $W^+$  que es más difícilmente reabsorbido por los neutrones, por lo que antes de que ello suceda, puede decaer en un positrón más neutrino; análogamente, un exceso de neutrones dificulta la reabsorción del bosón  $W^-$ , que al desintegrarse antes de ser reabsorbido da lugar a un electrón más antineutrino.)

Por otra parte, hay ocasiones en que este proceso de decaimiento está energéticamente prohibido, ya que para que ocurra se requiere que el isótopo del núclido resultante tenga una energía de enlace nuclear mayor que el núclido original; y en algunos casos esto no es así. Es ahí donde ocurre el doble decaimiento beta ( $2\nu\beta\beta$ ), en el cual un núcleo inestable sufre una desintegración radiactiva mediante 2 procesos simultáneos de desintegración beta, emitiendo así 2 electrones y 2 antineutrinos o 2 positrones y dos neutrinos. De esta manera, el número atómico varía en dos unidades y no una. Las dos modalidades de este proceso son, entonces:[2]

$$1) (\beta^-\beta^-): (A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$

$$2) (\beta^+\beta^+): (A, Z) \rightarrow (A, Z - 2) + 2e^+ + 2\nu_e$$

(Siendo Z el número atómico y A el número de masa)

A pesar de la rareza de este proceso, sí ha sido observado. Sin embargo, si consideramos ahora la posibilidad propuesta por Majorana de que el  $\nu_e = \bar{\nu}_e$ , puede haber otro proceso: el decaimiento beta doble sin neutrinos. ( $0\nu\beta\beta$ ), ya que si los neutrinos son su propia antipartícula sería posible que los antineutrinos emitidos simultáneamente durante el doble decaimiento beta se aniquilaran entre sí. En un proceso tal, los neutrinos sólo serían partículas virtuales, pues al eliminarse durante el decaimiento no habría emisión de ellos de forma neta. Es por esto que el  $0\nu\beta\beta$  constituiría la prueba experimental de que los neutrinos son partículas de Majorana.

En cuanto a la parte matemática, fueron varios los intentos que se hicieron para encontrar una manera de describir sistemas cuánticos que se movieran a velocidades cercanas a las de la luz, lo que requería encontrar una ecuación que uniera los principios de la cuántica y la relatividad especial. Sin embargo, Dirac logró llegar a la buscada ecuación que finalmente describe el comportamiento cuántico de sistemas que se mueven de forma relativista. [3]

Las dos características más importantes de esta ecuación es que sus términos incluyen matrices en lugar de escalares y que además, incluye una función de onda ( $\psi$ ) representada por un vector de 4 componentes, para incluir en la descripción el espín de la partícula. Es por ello que esta ecuación compete tanto a los neutrinos, pues es la manera de describir partículas de espín  $\frac{1}{2}$ .

Ahora bien; en esta ecuación, tomando a los neutrinos como partículas de Dirac, se necesitan 4 grados de libertad definidos por los 4 componentes del espinor. Sin embargo, si los tomamos como partículas de Majorana, sólo se requiere de 2 grados de libertad, es decir 2 componentes del espinor.

Los espinores dentro de la ecuación describen las posibilidades de que la partícula sea “right handed” o “left handed”, lo que son las opciones de helicidad o quiralidad que tiene la partícula. Una partícula es “right handed” cuando su momento angular es paralelo a la dirección de su espín y “left handed” cuando es opuesto uno con respecto al otro. Entonces, si la partícula es distinta a su antipartícula, necesitamos 4 opciones posibles que describan cada uno de los posibles estados en que esté; esto serían dos “left handed” partículas (una positiva para la partícula y otra negativa para la antipartícula) y análogamente, dos “right handed”. En contraparte, si la partícula es la misma que la antipartícula, entonces nos basta con dos opciones (una “left handed” y otra “right handed”) para describir todas las opciones en que es posible que esta partícula esté. Por tanto, para indicar que el neutrino es una partícula de Majorana se emplea en la ecuación un espinor de dos componentes solamente, mientras que el de Dirac emplea uno de cuatro componentes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han llevado a cabo diversos experimentos en búsqueda del decaimiento ( $0\nu\beta\beta$ ), entre los cuales destaca el actual experimento GERDA de la organización de investigación italiana INFN, el cual es remarcable por ser considerado el primer experimento “sin fondo”, al poseer las condiciones que reducen al mínimo los eventos perturbadores de otras desintegraciones, de manera que los resultados son mucho más fiables. Con todo, aún no se ha logrado observar este fenómeno.

## CONCLUSIONES

Finalmente, para concluir, debemos decir que el gran interés que se tiene sobre la posibilidad de neutrinos de Majorana, radica en la necesidad de una respuesta al problema de la asimetría del Universo, sin embargo, a pesar de lo razonable de dicha propuesta, el que no haya sido observado el doble decaimiento Beta es un gran problema.

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera finalmente agradecer profundamente a las diversas personas sin cuyo apoyo, comprensión e instrucción este trabajo no habría sido posible. En primer lugar, por supuesto, gracias a mi madre y amigos, pues ellos son quienes siempre me alientan a seguir cuando las cosas no pintan bien, además de alimentar siempre mi amor por la ciencia. Por supuesto, también quiero hacer uso de este espacio para agradecer profundamente a mi asesor, el Dr. David Yves Ghislain Delepine, sin cuya orientación y explicación esta investigación hubiera perdido el curso. Por último, agradezco muy profundamente a la UG por las oportunidades que me ha brindado, además de por todo el conocimiento que me ha permitido adquirir.

## REFERENCIAS

- [1] Griffiths, David. (2004) Introduction to elementary particles. Germany, WILEY-VCH.
- [2] “Decaimiento Beta” (2018), Julio 2018 recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Desintegraci%C3%B3n\\_beta](https://es.wikipedia.org/wiki/Desintegraci%C3%B3n_beta)
- [3] “Ecuación de Dirac- primera parte.” (2013), Julio 2018 Recuperado de: <https://cuentos-cuanticos.com/2013/07/08/ecuacion-de-dirac-primera-parte/>