



NEUTRINOS: LOS FANTASMAS DE LA ÓPERA

NEUTRINOS: THE PHANTOMS OF THE OPERA

*Yuber Ferney Pérez González**

Recepción 06 / 06 / 2011

Evaluación 20 / 07 / 2011

Aprobado 09 / 08 / 2011

Resumen

La física de los neutrinos es una de las ramas más fascinantes e importantes del estudio de las partículas elementales que componen nuestro universo. Desde que fue propuesta su existencia, los neutrinos siempre han sorprendido con sus características inusuales. Tales características han revolucionado nuestra forma de ver la física de altas energías, como por ejemplo, el descubrimiento de la violación de la simetría de paridad en 1956. Recientemente, los resultados sorprendentes del experimento OPERA, situado en Italia, han intrigado a la comunidad científica, ya que muestran que el neutrino tiene una velocidad mayor que la de la luz en el vacío, lo cual está en contra de una de las teorías mejor establecidas, la teoría de la relatividad de Einstein. En el presente artículo se hará una revisión de esta anomalía, presentando los resultados del experimento y las posibles explicaciones teóricas del origen

*Doctor Departamento de Física Matemática, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: yfperezg@fma.if.usp.br

de estos. Además, se pretende hacer una breve introducción al estudio de estas extraordinarias partículas.

Palabras clave: Física de neutrinos, Relatividad, Experimento OPERA

Abstract

Neutrino physics is one of the most fascinating and important branches of study of particle physics that build our universe. Since their existence was proposed, neutrinos have always surprised by their unusual characteristics. Such characteristics have revolutionized the way we see high energy physics, for example, the discovery of violation of parity symmetry in 1956. Recently, the surprising results of the OPERA experiment, located in Italy, have intrigued scientific community because they show that neutrino has a velocity bigger than the velocity of the light, which is against one of the most well established theories: Einstein's theory of Relativity. In this paper, we will review this anomaly, presenting the results of the experiment and some possible explanations of their origin. Besides, we intend to give a brief introduction to the study of these extraordinary particles.

Keywords: Neutrino Physics, Relativity, OPERA experiment.



Introducción

En los últimos meses hemos visto muchos titulares de prensa que hablan sobre cómo un experimento en Italia, el experimento OPERA (Colaboración OPERA, s.f.), fue capaz de hacer temblar las bases mismas de la física moderna. Este experimento dio un resultado alarmante: una partícula, denominada neutrino, tiene una velocidad mayor que la de la luz en el vacío. Para entender lo inquietante de este resultado, recordemos que nuestra física moderna se basa en dos grandes teorías, la teoría de la Relatividad de Einstein y la Mecánica Cuántica. La primera posee dos postulados aparentemente simples, primero, todos los observadores en movimiento uniforme relativo (velocidad constante) ven las mismas leyes de la física; segundo, como consecuencia del anterior postulado, existe una velocidad límite a la cual podemos movernos, la velocidad de la luz. Este segundo postulado puede reescribirse de un modo más abstracto y más profundo: las interacciones físicas no se transmiten a una velocidad infinita, como se suponía antes del descubrimiento de la relatividad einsteniana, sino que existe una velocidad límite a la cual se transmite la información, la velocidad de la luz. Este “nuevo” postulado impone la denominada causalidad, o sea, la relación causa-efecto debe cumplirse para cualquier tipo de interacción. Luego, si encontrásemos una partícula (sea cual sea su naturaleza) con una velocidad mayor que la de la luz, o sería necesario replantear la teoría de la relatividad misma, ya que sería posible tener una violación de la ley de causalidad, o deberíamos estudiar en detalle las propiedades de tal partícula para determinar la causa de la violación de los postulados de la relatividad. Notemos en este punto que existen teorías que proponen la existencia de una partícula, denominada taquión, que puede moverse a una velocidad superluminal (mayor que la de la luz) sin violar los principios de la causalidad, sin embargo, tales teorías poseen muchos problemas, como veremos más adelante.

No obstante los resultados de OPERA, debemos tener en cuenta que la teoría de la relatividad ha sido probada en múltiples experimentos y en todos ha mostrado su validez. En consecuencia, surgen varias preguntas: ¿cómo un experimento puede tener tales resultados y a su vez estar de acuerdo con la relatividad? ¿será que los resultados reflejan en realidad que el neutrino posee características que lo hacen diferente a todos los demás tipos de materia? ¿quizás existe un efecto que desconocemos que hace que los neutrinos aparentemente viajen con una velocidad superluminal? O simplemente, ¿el experimento OPERA ha presentado un resultado no del todo correcto?

Para tratar de responder estas preguntas, el presente artículo se va a dividir en las siguientes partes: primero, se va a presentar una visión general de la física de los neutrinos, dando énfasis a mediciones anteriores de su velocidad, para luego describir de manera resumida el experimento OPERA y sus resultados, ya que consideramos mejor que el lector se remita directamente al artículo de la colaboración. Entonces, vamos a estudiar algunas de las explicaciones teóricas sobre los resultados anómalos de OPERA, y, a continuación, vamos a considerar un trabajo simple pero muy importante que señaló el rumbo de los estudios teóricos luego de su publicación, (Cohen & Glashow, s.f.), mostrando la imposibilidad de que los resultados de OPERA sean válidos. Finalmente, en el epílogo se van a mencionar los resultados del experimento ICARUS, y, a partir de estos, vamos a dar algunas conclusiones.

¿Qué es un neutrino?

De toda la anterior discusión surge una pregunta simple, ¿qué es un neutrino? La definición formal nos dice que un neutrino es un fermión¹ con espín 1/2, masa muy pequeña pero no nula

¹ La naturaleza fermiónica *exacta* del neutrino es aún desconocida, pudiendo ser un fermión de Dirac (1928) o de Majorana (1937).



que únicamente interactúa débil y gravitacionalmente. Sin embargo, esta definición no revela la increíble historia de la manera como ha evolucionado nuestro entendimiento sobre estas partículas. Por eso, vamos a dar una breve descripción sobre como fue necesario introducir a nuestro conjunto de partículas elementales una partícula tan extraña como es el neutrino (para una descripción detallada de la historia del neutrino véanse Giunti y Kim (2007)).

La historia del neutrino comienza como la historia de muchas otras partículas elementales; al estudiar los fenómenos de radiactividad, se pudo determinar la existencia de partículas alfa, beta y gamma, que desde nuestro punto de vista más moderno son electrones, núcleos de helio ionizados y fotones, respectivamente. Los distintos estudios sobre estos fenómenos radioactivos mostraron que tanto el decaimiento alfa como el decaimiento gamma poseen espectros definidos, es decir, que las partículas alfa y gamma generadas en la reacción poseen una energía definida, mientras que para el decaimiento beta se determinó que un núcleo se convertía en otro emitiendo una partícula beta (un electrón) en un espectro continuo. Esto generó un problema de proporciones gigantescas pues ¡no había conservación de la energía en tal decaimiento! Otros estudios mostraron que no solo la energía no era conservada, sino también el momento angular y el momento lineal. En pocas palabras, todo era un desastre. Muchas especulaciones teóricas surgieron en aquella época, entre las que podemos mencionar la de Bohr, la cual prácticamente proponía abandonar la conservación de la energía. Sin embargo, una propuesta diferente fue hecha por Pauli (1991), quien, en una carta dirigida a los caballeros y damas “radioactivos”, propuso que además del electrón producido en el decaimiento se producía otra partícula neutra de espín $1/2$ con una masa mucho menor que la del electrón, a la cual denominó “neutrón” (no debe confundirse con el neutrón que conocemos hoy en día). Como podemos notar, las dos propuestas eran totalmente descabelladas, una proponía dejar a un lado algo

tan importante como la conservación de la energía, mientras que la otra proponía la existencia de una partícula que no se podía (ni se pretendía) ser detectada².

No obstante, otro físico muy importante, Fermi, tomó muy en serio la propuesta de Pauli, y desarrolló una teoría que además de estudiar el decaimiento beta, introducía un nuevo tipo de interacción a la naturaleza, la Fuerza Nuclear Débil (1934). En tal teoría era necesaria la existencia de una partícula neutra con masa muy pequeña o nula. Fermi hizo uso de su conocimiento del idioma italiano (él mismo lo era) y denominó a tal partícula como neutrino (pequeño neutrón)³, puesto que el nombre “neutrón” ya había sido dado para la partícula que hace parte del núcleo atómico. El gran problema que encontró Fermi fue que la sección eficaz de interacción del neutrino era muy pequeña o, en otras palabras, el neutrino interactúa muy poco con la materia. Esta es la razón principal de por qué la primera detección directa de los neutrinos tardó aproximadamente 30 años desde la propuesta de Fermi.

Antes de la confirmación directa de la existencia de los neutrinos, dada por Reines *et al.* (1960), se llevaron a cabo distintos experimentos con el fin de caracterizar al neutrino, es decir, se buscó determinar su masa, carga, espín, etc. a partir de medidas indirectas. Sin embargo, una nueva sorpresa apareció al estudiar detalladamente el decaimiento beta, las interacciones débiles violan la simetría de paridad. En un experimento en el que se estudiaba el decaimiento beta de un núcleo de ⁶⁰Co se observó que solo eran producidos neutrinos con helicidad⁴ izquierda. Esto indicó, además de la violación de la simetría de paridad, que el neutrino debía ser una partícula con masa nula (Landau, 1957; Lee & Yang, 1957; Salam, 1957).

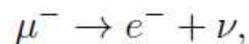
² El mismo Pauli dijo que no esperaba que tal partícula fuera detectada nunca, sin embargo, sí fue posible detectar tal partícula, aunque muchos años después de su propuesta.

³ Una traducción burda al español sería “neutronicito”.

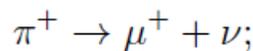
⁴ La helicidad se refiere a la proyección del espín en la dirección del momento, luego una helicidad “derecha” indica que el espín tiene la misma dirección que el momento, mientras que la “izquierda” indica lo contrario.



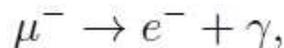
Por otro lado, muchas otras partículas, que fueron identificadas en los años posteriores a las propuestas de Fermi, mostraban características que indicaban que interactuaban débilmente, es decir, mediante la fuerza nuclear débil. Entre ellas, podemos nombrar al muón μ , el cual decaía siempre en un electrón y cierta cantidad de energía “perdida” (un neutrino ν),



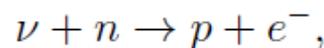
el pión⁵, otra partícula inestable que decaía en un muón y un neutrino,



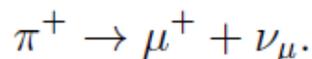
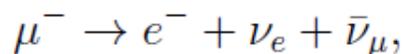
sin embargo, debido a la ausencia de ciertos decaimientos como (γ fotón)



e interacciones del tipo



con el neutrino ν producido en el decaimiento del pión, Pontecorvo (1968) propuso que ya que el neutrino producido en este decaimiento no podía inducir un electrón debía ser una partícula diferente. Experimentos llevados a cabo en los años sesenta establecieron que, de hecho, existían dos diferentes tipos de neutrinos, neutrino electrónico ν_e y muónico ν_μ por lo que los decaimientos del muón y del pión debieron reescribirse de la siguiente manera,



Años después se estableció que en la naturaleza existen tres tipos de neutrinos, electrónico ν_e , muónico ν_μ y tauónico ν_τ . Además, se determinó el denominado Modelo Estándar de Partículas Elementales (MEP) por Weinberg, Salam y Glashow

⁵ De hecho, existen tres tipos de piones, pero por razones prácticas no vamos a entrar en detalles sobre este tema.

(citados en Rodríguez, Poveda & Poveda, 2006), en el cual se explicaba la interacción nuclear débil a través del intercambio de partículas “mediadoras”, conocidas como bosones gauge. Asimismo, el MEP hace uso del Mecanismo de Higgs para explicar de qué manera los bosones y fermiones adquieren masa, tal como es visto experimentalmente. Aún así, el MEP fue construido de modo tal que los neutrinos fueran partículas sin masa, tal como se creía que era.

No obstante, la historia de los neutrinos no acaba aquí. Uno de los principales desafíos que se presentó a la comunidad científica fue el de detectar neutrinos extraterrestres, por ejemplo, neutrinos producidos en el sol, ya que se esperaba que se produjesen neutrinos según el modelo solar y estos fueran detectables en la tierra. De hecho, lo fueron, ya que el experimento Homestake (Colaboración Homestake, 1998) fue el primero capaz de detectar neutrinos solares. Pese a su éxito, los resultados de este experimento revelaron un problema, la cantidad de neutrinos detectados era aproximadamente un tercio de los neutrinos que se esperaban. Este es el conocido problema de los neutrinos solares. Tal problema fue confirmado por otros experimentos independientes Kamiokande, GALLEX/GNO, SAGE, Super-KamiokaNDE y SON (Colaboración Homestake, 1998). La solución a este problema apareció antes de encontrar el problema mismo.

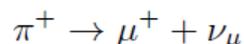
Pontecorvo propuso en 1967 (Gribov & Pontecorvo, 1967; Bilenky & Pontecorvo, 1975; Bilenky & Pontecorvo, 1976), que los neutrinos conocidos en ese momento, es decir, los neutrinos electrónico y muónico, podían “mudar” su identidad debido a un efecto cuántico, en un proceso conocido como oscilaciones de neutrinos. Este fenómeno, que únicamente se presenta si los neutrinos son partículas masivas, se debe a que es posible que los estados masivos de los neutrinos sean diferentes a los estados que interactúan, o sea, es posible que los estados de interacción sean una superposición de los diferentes estados



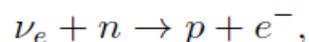
masivos. De modo formal correspondería a la situación en la que (ν_1, ν_2 son los neutrinos con masas definidas)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

siendo θ el ángulo que indica la mezcla de los estados masivos. Podemos ver este fenómeno de la siguiente manera, los estados de sabor⁶ definido están “rotados” respecto a los estados con masas definidas. De este modo, al determinar la evolución temporal del sistema, se encuentra que si por ejemplo un neutrino muónico es creado por el decaimiento del pión,



existe una probabilidad de que sea detectado con un sabor diferente, por ejemplo como un neutrino electrónico,



además, este fenómeno se denomina “oscilaciones” debido a que la probabilidad de encontrar un neutrino con el mismo sabor o con un sabor diferente al creado en cierto proceso de interacción débil depende de una función oscilatoria (en general una función sinusoidal) de la distancia entre la fuente de los neutrinos y el detector.

Este fenómeno de oscilación entre los estados de sabor (o de interacción) permite explicar del modo más simple el problema de los neutrinos solares: ya que en el sol son producidos neutrinos electrónicos, estos van a mudar de identidad durante su propagación hacia la tierra, con lo cual el número de neutrinos detectados va a ser menor al esperado, si no oscilaran. Nótese en este punto que otros experimentos de neutrinos también presentan resultados consistentes con el fenómeno de oscilaciones (Colaboración Kamiokande, 1988; Colaboración K2K, 2001; Colaboración MINOS, 2006; Colaboración KamLAND, 2003), con lo cual es posible afirmar

⁶ Se denomina sabor a la propiedad que diferencia a los distintos tipos de neutrinos, es decir, un neutrino electrónico tiene un sabor diferente al neutrino muónico o tauónico.

que los neutrinos son de hecho partículas masivas, aunque con masas mucho menores que las masas de los demás fermiones, lo cual prueba la existencia de una física más allá del MEP.

Hemos visto de modo general como ha sido la evolución de la física de neutrinos, pero para nuestros propósitos debemos concluir esta parte haciendo alusión a los experimentos que han medido la velocidad de los neutrinos. La primera medición de la velocidad fue realizada de modo casual. En 1987 estaban en funcionamiento varios experimentos que detectaban neutrinos electrónicos, y un día de febrero hubo una cantidad enorme de neutrinos detectados con energías muy parecidas (12 vs por el experimento Kamiokande-II en un período de 20s, 8 por IMB en un periodo de 5s y 5 por Baksan en 9s)⁷. Este extraño crecimiento del número de neutrinos electrónicos detectados fue explicado poco después cuando fue observada una supernova de tipo II, SN1987A, la cual generó los neutrinos que fueron observados en estos experimentos. Así, determinando la distancia de la supernova, y calculando el intervalo de tiempo entre la detección de los neutrinos y la luz por los observatorios se pudo determinar una cota experimental de la velocidad de los neutrinos⁸ (Longo, 1987).

$$\left| \frac{v_\nu - c}{c} \right| < 2 \times 10^{-9}, \quad (2)$$

siendo c la velocidad de la luz. Esta medición está totalmente de acuerdo con el postulado de la relatividad. Una medida más reciente de la velocidad fue realizada en experimento Main Injector Neutrino Oscillation Search MINOS (Colaboración MINOS, 2007). Los resultados de la colaboración MINOS son

⁷ Estos números son “enormes”, ya que en un experimento normal de neutrinos se suele detectar uno o dos neutrinos por día.

⁸ El lector perspicaz se preguntará cómo es posible que los neutrinos hayan llegado primero que la luz, siendo que estos tienen una velocidad menor; la respuesta es que en el modelo actual de la explosión de supernovas, los neutrinos escapan primero que los fotones de la estrella en explosión, luego si los neutrinos tuviesen una velocidad mayor, estos hubiesen llegado mucho tiempo antes que la luz, o sea, antes de la observación de la supernova, por lo cual no hubiera sido posible asociar la detección de los neutrinos con la supernova.



compatibles con la relatividad especial, aunque no cuenten con la significancia que posee OPERA. El resultado de MINOS es

$$\frac{v_\nu - c}{c} = (5,1 \pm 2,9(\text{stat+sis})) \times 10^{-5}. \quad (3)$$

Experimento OPERA

El experimento OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) (Colaboración OPERA, s.f.) fue inicialmente desarrollado con el propósito de determinar un tipo de oscilación de neutrinos nunca antes visto, el canal de oscilación $\nu_\mu \rightarrow \nu$, además, se pretende buscar el canal $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ que permitirá determinar con precisión el ángulo de mezcla θ_{13} , el cual se creía hasta hace poco que era nulo. Por otro lado, este experimento tomó medidas controladas de la velocidad de los neutrinos, cuyos método y resultados estudiaremos a continuación.

Configuración general

La configuración del experimento, realizada para hacer la medida de la velocidad, fue descrita con gran detalle en el artículo puesto en la base virtual arxiv por la colaboración a cargo de OPERA (s.f.). Aquí haremos un resumen de tal configuración. Para determinar la velocidad de los neutrinos, el experimento OPERA utiliza un haz de neutrinos creados en el LHC (Large Hadron Collider). Este haz de neutrinos se forma al hacer colisionar un haz de protones acelerados a 400 GeV/c contra un blanco de grafito. Luego, por diferentes procesos mediados por interacciones nucleares fuertes y débiles, se crean distintas partículas inestables que decaen en algunas partículas y neutrinos en un túnel de 1 km de longitud. La energía media de los neutrinos creados en el CERN es de $E_\mu = 17$ GeV.

Por otro lado, el detector de OPERA, localizado en laboratorio subterráneo de Gran Sasso (LNGS), está diseñado de modo tal que sea posible diferenciar entre los distintos tipos de neutrino. Para ello, el detector está compuesto de “ladrillos” que actúan como una cámara de Wilson y por detectores de muones. Así, si un neutrino muónico alcanza el detector, será posible detectar su presencia utilizando R que, por interacciones débiles, va a crear un muón que dejará un rastro determinado en el detector; de este modo, estudiando el rastro de la partícula producida por la interacción del neutrino se puede determinar el sabor del neutrino que fue detectado y con ello se puede hacer la estadística.

Para llevar a cabo la medición de la velocidad de los neutrinos, se utilizó además un sistema de GPS de alta precisión que determinó la distancia entre el CERN y el laboratorio de Gran Sasso, obteniendo como resultado,

$$d = (731278,0 \pm 0,2)m,$$

nótese que la precisión de la medida está por el orden de los centímetros. Esta medida tiene en cuenta todas las posibles distancias, tanto en el equipamiento del CERN, como en el detector.

En este punto debe mencionarse que la medida de la velocidad no fue una medida simple, ya que es imposible conocer el lugar y el tiempo exactos en que el neutrino fue creado; esto se debe básicamente a que no es posible saber donde decaen los mesones secundarios creados en la interacción del haz de protones con el grafito. De este modo, para determinar la velocidad se utilizó un análisis puramente estadístico que consistía en comparar dos distribuciones temporales, la distribución del haz de protones, conocida con exactitud en el LHC, y la distribución de los neutrinos obtenida en el detector de OPERA. En realidad, la velocidad se estableció midiendo la diferencia temporal entre la distribución de los neutrinos y la



distribución de los protones, haciendo un corrimiento en un tiempo igual al que recorrería la luz la distancia entre el CERN y Gran Sasso. Y conociendo tal diferencia se puede deducir la diferencia entre las velocidades de los neutrinos y la luz.

Resultados

Al hacer el análisis “ciego” de la diferencia temporal entre las distribuciones de protones y neutrinos, se encontró que los neutrinos aparentemente presentan un tiempo de llegada anterior a lo esperado, suponiendo la propagación de la luz en el vacío en la misma distancia,

$$\delta t = TOF_c - TOF_\nu = (1048,5 \pm 6,9) \text{ ns}, \quad (4)$$

siendo TOF_c , el tiempo de vuelo de la luz y de los neutrinos. En otras palabras, δt indica el intervalo de tiempo entre la llegada de los neutrinos y la de la luz, suponiendo que fueron creados simultáneamente. De este modo, los neutrinos se propagarían a una velocidad mayor que la de la luz en el vacío. Sin embargo, se debe tener en cuenta que existen ciertas correcciones al valor anterior debidas a los tiempos que gastan en la transmisión de la información en el sistema de sincronización tanto en el CERN como en el LNGS. Al determinar los retrasos generados por los sistemas de sincronización, se encuentra finalmente que la diferencia temporal es de

$$\delta t = (60,7 \pm 6,9(\text{stat}) \pm 7,4(\text{sis})) \text{ ns}, \quad (5)$$

la cual implica una diferencia entre las velocidades del neutrino y de la luz de

$$\frac{v_\nu - c}{c} = (2,48 \pm 0,28(\text{stat}) \pm 0,30(\text{sis})) \times 10^{-5}. \quad (6)$$

Notemos que este resultado posee una significancia estadística de $¡6\sigma!$

Sin embargo, el artículo de la colaboración OPERA fue muy cauteloso al dar algún tipo de interpretación de estos resultados, ya que, en palabras textuales, concluyó:

A pesar de la gran importancia de la medida reportada aquí y de la estabilidad del análisis, el impacto potencialmente grande del resultado motiva la continuación de nuestros estudios para determinar fuentes posibles aún desconocidas de efectos sistemáticos que puedan explicar la anomalía observada. Deliberadamente no intentaremos ningún tipo de interpretación fenomenológica o teórica de estos resultados. (s.f.).

De esta manera, el verdadero propósito del anuncio hecho por la colaboración OPERA en el artículo publicado, fue presentar a la comunidad científica un resultado anómalo que no pudo ser entendido a pesar del detallado análisis que se llevó a cabo. En consecuencia, la publicación de esta anomalía pretendía que la comunidad contribuyese a determinar si algún tipo de efecto, ya sea experimental o teórico, podía explicar el resultado, y no generar un revuelo en la prensa, como fue lo que sucedió.

Explicaciones teóricas propuestas

Luego de la publicación del artículo de OPERA, aparecieron distintas explicaciones teóricas que mostraban tanto las consecuencias del resultado anómalo como sus posibles orígenes, siempre intentando de algún modo salvar la relatividad o modificarla un poco. Respecto a estas explicaciones se puede mencionar que existen básicamente dos fenómenos que dan cuenta de la anomalía, uno, que el neutrino posea propiedades que hacen que viole la relatividad especial, y dos, que el neutrino



sea una partícula como las demás, pero el “medio ambiente” haga que aparentemente viaje a una velocidad mayor que la de la luz. Debemos mencionar también que para el primer tipo de explicaciones solo ha sido posible descartar ciertas teorías que describían partículas que viajaban a velocidades superlumínicas. A continuación vamos a estudiar tres explicaciones de las muchas que aparecieron en la literatura⁹.

Taquiones

Como ya se mencionó, los taquiones son partículas hipotéticas que viajan a velocidades mayores que la luz. Ahora bien, la idea de que el neutrino, en especial el muónico, sea un taquión, no es nueva (Chodos, Hauser & Kostelecky, 1985; Hugues & Stephenson Jr., 1990). Ciertas medidas de la masa cuadrática del neutrino muónico indicaban un valor negativo, por lo cual se conjeturó que el neutrino podría ser un taquión (Chodos, Hauser & Kostelecky, 1985). Sin embargo, se mostró que no existe una teoría de campos satisfactoria que describa a estas partículas (Hugues & Stephenson Jr., 1990). Para esto, vamos a considerar una teoría que en apariencia describe un fermión taquiónico. Recordemos que la energía y el momento relativistas para partículas “normales” están dados por

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (7a)$$

$$|\vec{p}| = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (7b)$$

siendo v la velocidad y m la masa de la partícula. Ahora bien, podemos modificar las anteriores expresiones haciendo que la masa sea un parámetro imaginario puro $m \rightarrow im, \tilde{m}$ real, de

⁹ En la literatura se alcanzaron 200 publicaciones que se referían a los resultados de OPERA.

modo tal que podamos invertir la diferencia que aparece entre la raíz, o lo que es lo mismo, que estas partículas puedan tener velocidades mayores que la de la luz en el vacío,

$$E = \frac{\tilde{m}c^2}{\sqrt{v^2/c^2 - 1}}, \quad (8a)$$

$$|\vec{p}| = \frac{\tilde{m}v}{\sqrt{v^2/c^2 - 1}}, \quad (8b)$$

por lo que esa partícula con masa en reposo imaginaria tendría una energía y un momento definidos relacionados por

$$E^2 = |\vec{p}|^2 c^2 - \tilde{m}^2 c^4. \quad (9)$$

Tal partícula se define como taquión. Notemos también que esta partícula tiene un valor mínimo para su velocidad, la velocidad de la luz. Por otro lado, una lagrangiana que puede describir a tal partícula está dada por

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma_5\gamma^\mu\partial_\mu\psi - \tilde{m}\bar{\psi}\psi, \quad (10)$$

o introduciendo un nuevo conjunto de matrices de Dirac,

$$\tilde{\gamma}_\mu \equiv i\gamma_5\gamma_\mu, \quad (11)$$

la anterior lagrangiana queda igual a

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}\tilde{\gamma}^\mu\partial_\mu\psi - \tilde{m}\bar{\psi}\psi, \quad (12)$$

por lo que se obtiene la ecuación de movimiento de estas partículas,

$$i\bar{\psi}\tilde{\gamma}^\mu\partial_\mu\psi - i\tilde{m}\bar{\psi}\psi = 0 \quad (13)$$

donde es evidente que esta teoría representa estados con masas imaginarias, es decir, taquiones. No obstante, esta lagrangiana



tiene un problema fundamental, ya que la componente cero de la corriente conservada

$$j^{\mu} = \bar{\psi} \gamma^5 \gamma^{\mu} \psi \quad (14)$$

es idénticamente nula, debido a que la representación es no-unitaria, tendremos que

$$\bar{\psi} \psi = 0, \quad (15)$$

lo que implica que los estados de taquiones tienen norma nula, y, por ende, no existe una interpretación de esta teoría en términos probabilísticos.

Ahora bien, si suponemos que existe una teoría válida para taquiones que no posea ningún problema de consistencia, existe otro argumento que impide que los neutrinos sean taquiones (Drago, s.f.). Para esto, notemos que a partir de las relaciones (8) podemos escribir

$$\frac{v - c}{c} = \frac{c}{v + c} \left(\frac{\tilde{m}c^2}{E} \right)^2, \quad (16)$$

Luego, teniendo en cuenta el resultado de OPERA y aproximando que $v \approx c$ en la suma, tenemos que la masa del neutrino muónico es aproximadamente

$$m_{\nu_{\mu}} c^2 \approx \sqrt{2 \frac{v - c}{c}} E = 105 \text{ MeV}, \quad (17)$$

mientras que para el neutrino electrónico,

$$m_{\nu_e} c^2 < 40 \text{ eV}, \quad (18)$$

donde hemos considerado el límite puesto por la supernova SN1987A (Drago, s.f.). De esta manera, vemos que ya que las masas de los neutrinos, electrónico y muónico, son bastante

diferentes, el fenómeno de oscilaciones no puede presentarse¹⁰. Así, debido a que existen muchas evidencias experimentales a favor de las oscilaciones, es necesario descartar la explicación de que los neutrinos son taquiones.

Neutrinos de Coleman-Glashow

Otra propuesta para explicar la anomalía de OPERA surge de una propuesta de Coleman y Glashow (1999), la cual postula que para cada partícula presente en la naturaleza existe una velocidad máxima alcanzable c_i , por lo cual la relación de dispersión relativista se ve modificada

$$E_i^2 = |\vec{p}_i|^2 c_i^2 + \tilde{m}_i^2 c_i^4, \quad (19)$$

de modo tal que es posible tener partícula superluminal, siendo m_i la masa de la partícula. Luego, a partir de los resultados de OPERA y de la SN1987A, podemos deducir que dos de los estados masivos de neutrinos poseen velocidades máximas diferentes (Drago, s.f.), dadas por:

$$c_1 \approx c,$$

$$\frac{c_2 - c}{c} \approx 2 \times 10^{-5}. \quad (20a)$$

$$(20b)$$

El problema que posee esta situación es que las oscilaciones de neutrinos son de nuevo suprimidas. Al determinar la evolución temporal de los neutrinos de Coleman-Glashow, se encuentra que la probabilidad de oscilación (Drago, s.f.) está dada por

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{L}{\hbar c} \left\{ \frac{(m_2^2 - m_1^2)c^4}{4E} + \frac{c_2 - c}{c} \frac{E}{2} \right\} \right), \quad (21)$$

¹⁰ Se puede preguntar si las oscilaciones son válidas para neutrinos taquiónicos, para resolver esta duda véanse Caban et al., (2006) donde se demuestra la validez de esta afirmación.



siendo L la distancia entre fuente y detector. Los experimentos de oscilaciones indican un valor de $(m^2_2 - m^2_1)c^4 \approx 10^{-4} \text{ eV}^2$, lo cual implica que la diferencia entre las velocidades de los neutrinos debe ser del orden de:

$$\frac{c_2 - c}{c} \approx 10^{-18}, \quad (22)$$

mucho más pequeño que el valor reportado por la colaboración OPERA. Esto se puede ver de otra manera. Ya que los dos estados masivos de neutrinos poseen una velocidad diferente, al ser producidos en cualquier interacción débil van a empezar a alejarse uno del otro, por lo que al alcanzar al detector no será posible que sean coherentemente detectados. De esta manera, las oscilaciones son suprimidas. Sin embargo, ya que, de nuevo, muchos experimentos son consistentes con las oscilaciones, la explicación de Coleman-Glashow debe descartarse.

Efectos ambientales

La última posibilidad que vamos a considerar es que el neutrino no tenga características intrínsecas que hagan que viole los postulados de la relatividad, sino que de alguna manera aparente viaje a una velocidad superlumínica. Esta propuesta fue hecha por Dvali y Vikman (s.f.), en la que se considera que la superluminosidad del neutrino se origina debido a un efecto ambiental en la vecindad terrestre. Para desarrollar esta idea es necesario introducir una nueva fuerza de tipo gravitacional generada por la tierra, que acopla de modo diferente al neutrino:

$$\left(\eta_{\mu\nu} + \frac{h_{\mu\nu}}{M^*} \right) \bar{\nu} \gamma^\mu \partial^\nu \nu, \quad (23)$$

siendo $h_{\mu\nu}$ el nuevo campo de espín 2 que representa la nueva interacción y M^* es la escala, dependiente del resultado de

OPERA, que caracteriza la intensidad de la misma. Como resultado de esta interacción el neutrino ve una métrica efectiva

$$g_{\mu\nu}^{(\nu)} = \eta_{\mu\nu} + \frac{h_{\mu\nu}}{M_*}. \quad (24)$$

Nótese en este punto que el campo $h_{\mu\nu}$ no necesariamente tiene un origen geométrico como la gravedad, ni M^* es necesariamente la escala de Planck. Por otro lado, este campo se acopla con el resto de la materia de la siguiente manera

$$\frac{h_{\mu\nu}}{M} T^{\mu\nu}, \quad (25)$$

siendo $T^{\mu\nu}$ el tensor momento-energía asociado al resto de las especies y M la escala que caracteriza esta interacción. Observemos que debido a que el campo nuevo no tiene un origen gravitacional, no es necesario que el principio de equivalencia sea obedecido. Ahora bien, para ver como aparece la superluminosidad en los neutrinos, se puede mostrar que el campo $h_{\mu\nu}$ obedece a una ecuación del tipo (m masa del campo $h_{\mu\nu}$ y $T = T_{\mu\nu}\eta^{\mu\nu}$)

$$(-\Delta + m^2)h_{\mu\nu} = \frac{1}{M} \left\{ T_{\mu\nu} - \frac{1}{3} \left(\eta_{\mu\nu} + \frac{\partial_\mu \partial_\nu}{m^2} T \right) \right\}, \quad (26)$$

donde $T_{\mu\nu}$ hace referencia a la fuente del campo. La solución para las componentes temporal y espacial en el caso $r \ll m^{-1}$ es (M_E es la masa de la tierra)

$$h_{00} = \frac{2}{12\pi} \eta_{00} \frac{M_E}{M r}, \quad h_{ij} = -\frac{1}{12\pi} \eta_{ij} \frac{M_E}{M r}, \quad (27)$$

luego, la métrica efectiva que “siente” el neutrino es



$$g_{00}^{(\nu)} = \left\{ \left(1 - \frac{\epsilon}{3} \right) + \epsilon \right\} \eta_{00}, \quad g_{ij}^{(\nu)} = \left(1 - \frac{\epsilon}{3} \right) \eta_{ij}, \quad (28)$$

con

$$\epsilon \equiv \frac{M_E}{4\pi M_* M r}, \quad (29)$$

de este modo ϵ da cuenta de la superluminosidad del neutrino. A partir del resultado de OPERA $\epsilon \approx 10^{-5}$ y tomando $r \approx 10^8$ cm, tenemos que la relación entre las escalas M^* y M es

$$M_* M \approx 10^{-4} M_P^2. \quad (30)$$

A partir de otras restricciones experimentales se puede mostrar que

$$M_* \approx 10^{-6} M_P, \quad M \approx 10^2 M_P. \quad (31)$$

El único inconveniente que aparentemente presenta esta explicación es la asimetría del acoplamiento de este nuevo campo con los neutrinos y con el resto de la materia. Por otro lado, es interesante notar que si existiese esta nueva interacción es posible tener distintos experimentos que en principio pueden validar o refutar esta hipótesis.

Cohen y Glashow

Durante la discusión de la anomalía de OPERA apareció el estudio de Cohen y Glashow (s.f.) que prácticamente refutó los resultados de la colaboración. En este trabajo se consideró un fenómeno que se tiene como consecuencia de la superluminosidad del neutrino: una radiación de tipo Cherenkov. Esta radiación surge debido a que sabemos que

el neutrino presenta interacciones débiles, y, por tanto, si es superluminal puede emitir partículas, tal y como lo hace una partícula cargada con velocidad mayor a la de la luz en cierto medio o como hace un jet supersónico al emitir una onda de choque. Para un neutrino podremos tener las siguientes interacciones, representadas por los diagramas de Feynman de la Figura 1,

$$\nu_\mu \longrightarrow \begin{cases} \nu_\mu + \gamma & (a) \\ \nu_\mu + \nu_e + \bar{\nu}_e & (b) \\ \nu_\mu + e^+ + e^- & (c) \end{cases}, \quad (32)$$

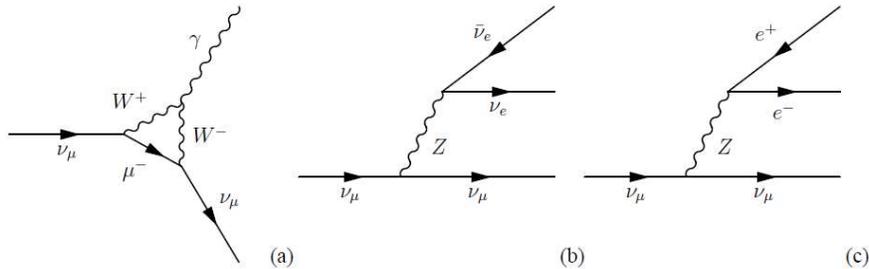


Figura 1: Diagramas de Feynman que contribuyen a la radiación de Cherenkov de los neutrinos.

Notemos que el segundo tipo de proceso es irrelevante ya que los neutrinos deben propagarse a una velocidad muy parecida, tal como lo indican las oscilaciones. La consecuencia principal de estos procesos es que los neutrinos van a perder energía al propagarse.

Para determinar la pérdida de energía, se va a considerar únicamente el proceso (c), ya que es el que más contribuye debido a que corresponde a un término de segundo orden en la expansión perturbativa. Determinando la razón de emisión de pares Γ y dE/dx la razón de pérdida energética en el límite de alta energía, se obtiene que



$$\Gamma = \frac{1}{14} \frac{G_F^2}{192\pi^3} E^5 \delta, \quad (33a)$$

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{25}{448} \frac{G_F^2}{192\pi^3} E^6 \delta, \quad (33b)$$

siendo

$$\delta \equiv \frac{v - c}{c}. \quad (34)$$

De la cinemática del sistema se puede obtener la energía mínima que necesita el neutrino para emitir el par electrón-positrón,

$$E_0 = \frac{2m_e}{\sqrt{\delta}} = 140 \text{ MeV}, \quad (35)$$

donde hemos utilizado el resultado de OPERA. Podemos determinar la energía terminal de un neutrino superluminal luego de recorrer cierta distancia, para eso, integramos dE/dx , para obtener

$$E^{-5} - E_0^{-5} = k\delta^3 \frac{G_F^2}{192\pi^3} L \equiv E_T, \quad (36)$$

con k una constante numérica. Aplicando los resultados de OPERA y la distancia medida por ellos, se encuentra que la energía terminal medida para OPERA es de $E_T = 12,5 \text{ GeV}$. Luego, los neutrinos que llegasen a OPERA deberían ser medidos con energías menores a esta energía terminal. Además, la probabilidad de detectar un neutrino con velocidad mayor es despreciable debido a los anteriores resultados. Por tanto, podemos decir que ya que OPERA midió neutrinos con energías mayores a este valor, no es posible afirmar que los neutrinos poseen una velocidad superluminal. Por otro lado, si existiesen neutrinos superluminales deberían emitir pares electrón-positrón fácilmente medibles en distintos experimentos. Sin

embargo, otro experimento situado en el LNGS, denominado ICARUS (Imaging Cosmic And Rare Underground Signals) afirma no haber detectado ninguno de esos pares (Colaboración ICARUS, s.f.). De esta manera, es necesario descartar la posibilidad de que estos resultados sean compatibles con un neutrino superlumínica.

Epílogo

En días anteriores, el experimento ICARUS presentó nuevos resultados ligados a la medición de la velocidad de los neutrinos (Colaboración ICARUS, s.f. b). En su estudio no se encontró ninguna discrepancia significativa con la relatividad, pues se halló que los neutrinos provenientes del CERN poseen una velocidad menor que la de la luz en el vacío. Esto lleva a la gran pregunta, ¿los resultados de OPERA son correctos? Esta pregunta aún necesita mucho tiempo para ser respondida con seguridad. Será necesario que distintos experimentos independientes, incluyendo OPERA, determinen la velocidad del neutrino y establezcan si la anomalía es producto de algún error no considerado por OPERA.

No obstante los posibles resultados de la medición de la velocidad de los neutrinos, hemos visto que la búsqueda por comprender a estas increíbles partículas ha tenido un gran impacto sobre como vemos nuestro universo. La física de los neutrinos no solo se centra en estudiar las características de estas, sino también en buscar posibles repercusiones de las propiedades en otras ramas de la ciencia. En particular, se debe mencionar que hoy en día se están llevando a cabo experiencias que buscan detectar neutrinos de orígenes remotos. Esta nueva manera de ver nuestro universo se denomina Astrofísica de Neutrinos y pretende complementar las observaciones astronómicas que siempre hemos utilizado. Por otro lado, diversas investigaciones teóricas en el área de la cosmología han revelado distintas consecuencias de la existencia de los neutrinos. Entre estas, vale la pena citar el caso de la Leptogénesis. Esta hipótesis



se centra en responder el porqué existe más materia que antimateria en nuestro Universo; para ello, hace uso de las propiedades de los neutrinos y muestra como, debido a sus características inusuales, se genera dinámicamente un número mayor de partículas comparado con el de antipartículas. En conclusión, el estudio de los neutrinos siempre será una parte fundamental, no solo de la física de partículas elementales, sino también de la física como un todo. Además, en la última década hemos vivido grandes avances, tanto teóricos como experimentales, hacia la comprensión de las características de los neutrinos. Así, solo nos resta esperar nuevas sorpresas que nos tengan estas maravillosas partículas.

Finalmente, el autor agradece a Diego Gallego por la invitación a presentar el presente artículo y a la *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo* (FAPESP) y al *Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia* (CNPq) por el apoyo económico recibido.

Lista de referencias

- Bilenky, S. & Pontecorvo, B. (1975). *Phys. Lett.*, 17, 569.
- Bilenky, S., Pontecorvo, B. (1976). Again on neutrino oscillations. *Lett. Nuov. Cim*, 17, 569.
- Caban, P., et al. (2006). Oscillations do not distinguish between massive and tachyonic neutrinos. *Found. Phys. Lett.*, 19, 619.
- Chodos, A., Hauser, A. I. & Kostelecky, V. A. (1985). The neutrino as a Tachyon. *Phys. Lett.*, 150B, 6.
- Cohen, A. G. & Glashow, S. L. (s.f.). *New constraints on Neutrino Velocities*. ArXiv e-print, hep-ph/ 1109.6562v1. Recuperado de <http://arxiv.org/pdf/1109.6562v1.pdf>
- Colaboración Homestake. Lande, K., et al. (1998). *Astrophys. J.* 496, 505; *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl)* 77, 13 (1999);

Colaboración Kamiokande. Fukuda, Y., *et al.* (1996). *Phys. Rev. Lett.* 77, 1683; Colaboración Gallex. Hampel, W., *et al.* (1999). *Phys. Lett. B* 447, 127; Colaboración GNO. Altmann, M. *et al.* (2000). *Phys. Lett. B* 490, 16; Colaboración SAGE. Abdurashitov, J. N., *et al.* (1999). *Phys. Rev. C* 60, 055801; Gavrin, V. N. (2001). *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 91, 36; Colaboración Super-Kamiokande. Fukuda, Y., *et al.* (1999). *Phys. Rev. Lett.* 81, 1158, (E) 81, 4279 (1998); *ibid*, 82, 1810 (1999); *ibid*, 82, 2430 (1999); Suzuki, Y. (2001). *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 91, 29; Cravens, J. P., *et al.* (2008). *Phys. Rev. D* 78, 032002; Colaboración SON. Ahmad, Q. R., *et al.* (2001). *Phys. Rev. Lett.* 87, 071301; *Phys. Rev. Lett.* 89, 011301 (2002); Ahmed, S. N. *et al.* (2004). *Phys. Rev. Lett.* 92, 181301; Aharmim, B., *et al.* (2008). *Phys. Rev. Lett.* 101, 111301; *Phys. Rev. C* 81, 055504 (2010); Colaboración Borexino, Oberauer, L. (2010). *J. Phys. Conf. Ser.* 203, 012081.

Colaboración ICARUS. Antonello, M., *et al.* (s.f. a). *A search for the analogue to Cherenkov radiation by high energy neutrinos at superluminal speeds in ICARUS*. ArXiv e-print, hep-ex/1110.3763. Recuperado de <http://arxiv.org/pdf/1110.3763.pdf>

Colaboración ICARUS. Antonello, M., *et al.* (s.f. b) *Measurement of the neutrino velocity with the ICARUS detector at the CNGS beam*. ArXiv e-print, hep-ex/1203.3433. Recuperado de <http://arxiv.org/pdf/1203.3433.pdf>

Colaboración Kamiokande. Hirata, H. S., *et al.* (1988). *Phys. Lett. B* 205, 416; *ibid.* 280, 146 (1992); Fukuda, Y., *et al.* (1994), *ibid.* 335, 237; Colaboración IMB. Becker-Szendy, R., *et al.* (1992). *Phys. Rev. D* 46, 3720; Colaboración Soudan-2. Allison, W. W. M., *et al.* (1997), *Phys. Lett. B* 391, 491; Colaboración Super-Kamiokande. Fukuda, Y., *et al.* (1998). *Phys. Rev. Lett.* 81, 1562; *Phys. Lett. B* 436, 33 (1999); Abe, K., *et al.* (2006). *Phys. Rev. Lett.* 97, 171801; *Phys. Rev. D* 77, 052001 (2008).

Colaboración KamLAND. Eguchi, K., *et al.* (2003). *Phys. Rev. Lett.* 90, 021808; Araki, T., *et al.* (2005). *Phys. Rev. Lett.* 94, 081801; Abe, S. *et al.* (2008). *Phys. Rev. Lett.* 100, 221803.



- Colaboración K2K. Ahn, S. H., *et al.* (2001). *Phys. Lett. B* 511, 178; Aliu, E., *et al.* (2005). *Phys. Rev. Lett.* 94, 081802; Ahn, M. H., *et al.* (2006). *Phys. Rev. D* 74, 072003.
- Colaboración MINOS. Michael, D. G., *et al.* (2006). *Phys. Rev. Lett.* 97, 191801; Adamson, P., *et al.* (2008). *Phys. Rev. Lett.* 101, 131802.
- Colaboración MINOS. Adamson, P., *et al.* (2007). Measurement of neutrino velocity with the MINOS detectors and NuMI neutrino beam. *Phys. Rev. D*, 76, 072005.
- Colaboración OPERA. Adam, T. *et al.* (s.f.). *Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam.* ArXiv e-print, hep-ex/1109.4897. Recuperado de <http://arxiv.org/pdf/1109.4897v2.pdf>
- Coleman, S. R. & Glashow, S. L. (1997). Cosmic ray and neutrino tests of special relativity. *Phys. Lett. B*, 405, 249; Coleman, S. R. & Glashow, S. L. (1999). High-energy tests of Lorentz invariance. *Phys. Rev. B*, 59, 116008.
- Dirac, P. A. M. (1928). The Quantum theory of the electron. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 117, 610.
- Drago, A. (s.f.). *The Hypotheses of Superluminal Neutrinos: comparing OPERA with other Data.* ArXiv e-print, hep-ph/1109.5917v1. Recuperado de <http://arxiv.org/pdf/1109.5917v1.pdf>
- Dvali, G. & Vikman, A. (s.f.). *Price for Environmental Neutrino-Superluminality.* ArXiv e-print, hep-ph/1109.5685v1. Recuperado de <http://arxiv.org/pdf/1109.5685v1.pdf>
- Fermi, E. (1934). Versuch einer Theory der β -Strahlen. *Z. Phys*, 88, 161.
- Giunti, C. & Kim, C. (2007). *Fundamentals of Neutrino in Physics and Astrophysics.* Oxford, UK: Oxford University Press.



- Gribov, V. & Pontecorvo, B. (1967). Neutrino astronomy and lepton charge. *Phys. Lett. B*, 28, 493.
- Hugues, R. J. & Stephenson, G. J. Jr. (1990). Against tachyonic neutrinos. *Phys. Lett. B*, 244, 1.
- Landau, L. (1957). The conservation laws for weak interactions. *Nucl.Phys.*, 3,127.
- Lee, T. D. & Yang, C. N. (1957). Parity nonconservation and a two component theory of the neutrino. *Phys. Rev.*, 105, 1671.
- Longo, M. J. (1987). Tests of relativity from SN1987A. *Phys. Rev. D*, 36, 10.
- Majorana, E. (1937). Teoria simmetrica dell'eletrone e del positrone. *Il Nuov. Cim.*, 14, 171.
- Pauli, W. (1991). *Neutrino Physics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Pontecorvo, B. (1968). Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge. *Sov. Phys. JETP*, 26, 984.
- Reines, F., Cowan, C. L., Harrison, F. B., McGuire, A. D. & Kruse, H. W. (1960). Detection of the free antineutrino. *Phys. Rev.*, 117, 159.
- Rodríguez, J. A., Poveda, F. J. & Poveda, N. (2006). El modelo estándar de partículas elementales. *Ciencia en Desarrollo*, 2, 105.
- Salam, A. (1957). On parity conservation and neutrino mass. *Il Nuov. Cim*, 5, 299.