

Los Neutrinos

Julián Félix*

RESUMEN

De todas las propuestas para entender la estructura de la materia, y la conformación del mundo natural, los neutrinos es la más enigmática, abstracta, y ajena a la experiencia inmediata; sin embargo, es la que más hondo ha ido calando a lo largo de los ya casi ochenta años de haber sido formulada por Wolfgang Pauli –en el año 1930- como una medida radical para entender el decaimiento de los nucleones, y otras partículas, sin que se violara el principio de la conservación de la energía y del momento a nivel subatómico. La propuesta ha evolucionado a lo largo de los años, y de la idea original de Pauli ya sólo lo básico permanece. En este artículo está el relato de la hipótesis de los neutrinos, su historia primera, su evolución hasta el presente, los esfuerzos que en la actualidad se realizan para estudiarlos. En breve, ésta es la física de los neutrinos.

ABSTRACT

From all the proposals to understand the structure of matter, and the way the natural world is conformed, the one about neutrinos is the most enigmatic, abstract, and foreign to immediate experience; however, this is the one that has delved more deeply over the nearly eighty years since it was formulated by Wolfgang Pauli –in 1930- as a radical proposition to understand nucleon decay, and the decay of other particles, without the violation of the principle of conservation of energy and momentum at subatomic level. This proposition has evolved through the years, and from Pauli's original idea only the basic elements remain. This article contains the tale of the hypothesis of neutrinos, its early history, its evolution up to present day, and the efforts done nowadays to study them. In summary, this is the physics of neutrinos.

Recibido: 28 de Mayo de 2007
Aceptado: 27 de Julio de 2007

INTRODUCCIÓN

La física invariablemente se construye sobre evidencias obtenidas mediante la experimentación, la observación controlada, y la observación libre. Y las propuestas de edificación de la física insoslayablemente tienen que cotejarse contra los datos experimentales. En esta dinámica, la naturaleza siempre ha mostrado ser más rica, versátil, y enigmática, siempre dejando cortas las propuestas formuladas por los físicos, que tienen que acomodar éstas para abarcar la evidencia experimental todo el tiempo en crecimiento.

La hipótesis de los neutrinos ejemplifica muy bien la situación anterior, siempre presente en la física. Nació como una necesidad de explicación simplista, aunque muy ajena y poco plausible, a un hecho experimental –conservación de energía-momento en decaimientos beta de los nucleones–; confirmó indirectamente su realidad experimental; y mostró la vastedad de la constitución de la naturaleza cuando los físicos encontraron tres clases diferentes y distinguibles de neutrinos, junto con sus antineutrinos –el neutrino asociado al electrón, el neutrino asociado al muón, y el neutrino asociado al tau–; que tienen masa, pequeña aunque finita, –únicamente se ha medido el cuadrado de ésta, la masa del neutrino calculada usando esa medición es 53×10^{-6} la masa del electrón, negativa–; que son las más elusivas de todas las que se conocen –su sección transversal de interacción es del orden de 10^{-44} cm², ésta aumenta con la energía–; que pueden cambiar de identidad o sabor en pleno vuelo –por ejemplo, un neu-

Palabras clave:

Neutrinos; Decaimiento beta; Pauli; Reines; Cowan.

Keywords:

Neutrinos; Beta decay; Pauli; Reines; Cowan.

* Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato. León Guanajuato, 37150. México. Correo electrónico: felix@fisica.ugto.mx.

trino asociado al electrón creado en el sol puede cambiar a un neutrino asociado al muón cuando va del sol a la tierra donde es detectado; que constituyen las partículas más abundantes en la naturaleza –su número debe de ser superior al número de protones o neutrones en el universo–; que podrían dar la mayor parte de la masa al universo –actualmente se calcula que podrían contribuir con 0,3 % a la masa total de universo, equiparable a la contribución de todas las estrellas que es del 0,5 %–; que podría haber una clase que no interactúe de ningún modo con la materia ordinaria –neutrinos estériles, accesibles a nuestro mundo físico únicamente mediante un cambio de sabor–; que podría haber otras clases de neutrinos hasta el momento no detectadas; que podrían ser las partículas que determinen la dinámica del universo completo y de sus constituyentes como las estrellas, las galaxias, y estructuras más complejas y hasta el momento no determinadas. Estas dos proposiciones últimas son básicamente especulaciones, con poco o nada de evidencia experimental.

El neutrino es la pieza más pequeña en la estructura del universo hasta ahora imaginada, postulada y encontrada por los seres humanos. Su física está todavía bajo estudio en diferentes lugares del mundo.

El estudio de su física empezó, como evidencia experimental contundente y definitiva, a finales de la década de 1920. El estudio consistía en medir la energía cinética del electrón proveniente del decaimiento beta de los nucleones –los núcleos de los átomos, por ejemplo ^{60}Co –, es decir, el tipo de decaimiento donde en el estado final de la reacción aparece un electrón, –por ejemplo, el neutrón sigue esta línea de reacción $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$, donde $\bar{\nu}_e$ es el neutrino asociado al anti-electrón; este canal de decaimiento es llamado beta–; en este decaimiento el electrón presenta un espectro de energía continuo, en vez de uno discreto como se esperaba en base a la mecánica cuántica, recién formulada por ese entonces, y a la teoría de la relatividad especial. En la Figura 1 se ilustra la idea del decaimiento beta; en la Figura 2, un ejemplo de decaimiento beta; en la Figura 3, el espectro del decaimiento beta de algún nucleón (podría ser ^{60}Co , por ejemplo).

Los primeros resultados experimentales fueron obtenidos por Otto Hahn, Lise Meitner –Figura 4– y otros; y resultados conclusivos, por James Chadwick –Figura 5– en el año de 1914, que contradecían el principio de conservación de la energía, porque el electrón –la única partícula presumiblemente emitida– debería de tener una energía fija en vez de todo un espectro continuo.

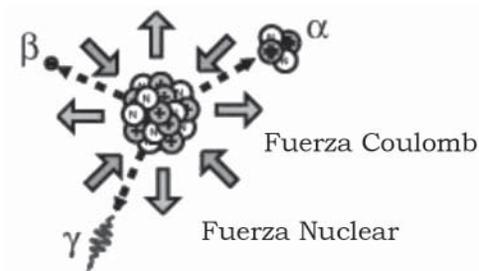


Figura 1. Idea del decaimiento beta. Un nucleón inestable, mantenido por el equilibrio de las fuerzas nucleares atractivas (flechas hacia adentro) y las eléctricas repulsivas (flechas hacia afuera) decae en un núcleo alfa, un rayo gamma (fotón), un rayo beta (electrón) y un nucleón más liviano (no ilustrado).

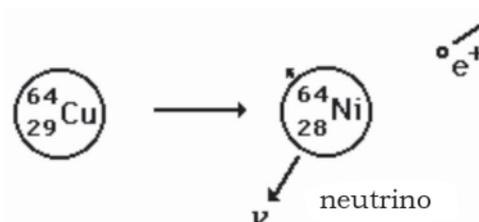


Figura 2. Ejemplo de decaimiento beta. Un núcleo de Cobre ^{64}Cu decae en un núcleo de Níquel ^{64}Ni , más un positrón (e^+ , anti electrón) que normalmente no se detecta directamente sino hasta que se recombina con un electrón del medio ambiente produciendo un par de fotones que pueden ser detectados, más un neutrino asociado al electrón (ν) que normalmente no se detecta; la existencia de éste fue la propuesta de Pauli para explicar el espectro de energías del decaimiento beta de los nucleones.



Figura 3. Espectro continuo de energía del electrón proveniente del decaimiento beta de un nucleón (Scott, 1935). Está en franca contradicción con el cálculo teórico (10.0×10^5 eV), un solo valor, mostrado como una línea continua considerando la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad especial. Sin tomar en cuenta otra partícula más que las conocidas y observadas, hay contradicción con el principio de conservación de la energía y el momento.



Figura 4. Otto Hahn y Lise Meitner en su laboratorio. Obtuvieron los primeros resultados experimentales del espectro de energías del decaimiento beta de los nucleones.



Figura 5. James Chadwick. En el año de 1914 obtuvo datos conclusivos del espectro del decaimiento beta de los nucleones.

Los neutrinos originales de W. Pauli

Una posible explicación a los resultados experimentales de Chadwick es que efectivamente el principio de conservación de la energía y momento no se cumpliera a nivel subatómico, aunque hubiera muchos experimentos que sustentaran la validez de éste a nivel macroscópico, a nivel del mundo de las experiencias diarias. Esta posible explicación fue formulada, y apoyada fuertemente, por Niels Bohr (Figura 6) y otros prominentes físicos de la época.



Figura 6. Niels Bohr. Postuló, para explicar el espectro de energías del decaimiento beta de los nucleones, que el principio de conservación de la energía y el momento no se cumple a niveles subatómicos. Las evidencias experimentales completas no sustentan este postulado.



Figura 7. Wolfgang Pauli. Propuso la existencia de los neutrinos (él les llamó neutrones) para explicar el espectro continuo de energía del decaimiento beta de los nucleones, sin violar el principio de la conservación de la energía y el momento. La evidencia experimental sustenta su tesis plenamente.

Otra posible explicación es que el principio de conservación de la energía también se cumple a niveles subatómicos y hay una partícula extra –que está involucrada en el decaimiento beta– que ha permanecido sin ser detectada hasta ese entonces. Ésta fue la solución, o tesis, propuesta y apoyada fuertemente por el físico austriaco Wolfgang Pauli (Figura 7) al problema del espectro de energías continuo del electrón en el decaimiento beta de algunos núcleos atómicos. La evidencia experimental completa es compatible con esta propuesta. Pauli originalmente les llamó neutrones a estas elusivas partículas; hay muy poca relación entre estas partículas y las que son llamadas neutrones en nuestros días. Las dos clases de bloques, de partículas, son completamente distinguibles unas de otras por su masa, por su vida media, por su forma de interactuar, etc. y no se confundirían por ningún motivo en ningún laboratorio del mundo.

En el congreso de Tübingen, en el año de 1930, Pauli se expresó por escrito de esta manera de sus hipotéticas partículas –esas que él originalmente llamó neutrones– Figura 8:

Admito que mi propuesta es más que improbable desde el inicio, porque si los neutrones existieran ya habrían sido descubiertos desde hace mucho tiempo. Sin embargo, nada se gana sin aventurar algo... debemos por lo tanto discutir seriamente cada posible ruta que conduzca a la salvación.

Según Pauli, esas partículas estarían dentro de los núcleos atómicos junto con los protones y los electrones –y se liberarían al momento de decaer los núcleos atómicos–; deberían de tener masa del

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, how because of the "wrong" statistics of the N and Li^6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call neutrons, which have spin 1/2 and obey the exclusion principle and which further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton masses. The continuous beta spectrum would then become understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant...

I agree that my remedy could seem incredible because one should have seen those neutrons very earlier if they really exist. But only the one who dare can win and the difficult situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is lighted by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's well better not to think to this at all, like new taxes". From now on, every solution to the issue must be discussed. Thus, dear radioactive people, look and judge. Unfortunately, I cannot appear in Tübingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December.

With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant.

W. Pauli

Figura 8. Escrito de Pauli enviado a los asistentes del congreso de Tübingen. En él defiende su tesis de los neutrinos (o neutrones como él los llamó). Está fechada el 4 de Diciembre del año 1930.

orden de la masa de los electrones; deberían de tener espín 1/2; deberían de ser eléctricamente neutras; deberían de tener como diez veces la potencia de penetración de los rayos gamma después de ser emitidas; deberían de poder explicar los resultados experimentales dado que la suma de la energía de éstas –de una de ellas- más la energía del electrón permanecería como una constante; además, deberían explicar la conservación de la cantidad de movimiento angular en decaimientos nucleares, y la estadística seguida por los núcleos atómicos.

De la propuesta de Bohr y de la de Pauli, una podría, o ninguna, ser confirmada por la evidencia experimental. La evidencia experimental completa del decaimiento beta de los núcleos atómicos es incompatible con la propuesta de Niels Bohr y colaboradores; pero es compatible con la propuesta de Wolfgang Pauli. La idea de un orden preestablecido –conservación

de la energía y el momento-, que se cumple a nivel subatómico y a nivel macroscópico en este caso funcionó para explicar el espectro de energías del decaimiento beta de los nucleones.

La propuesta de Pauli permitió no sólo explicar el espectro de energía continuo del electrón del decaimiento beta de los núcleos, sino a él mismo formular una solución al problema de la estadística del núcleo de Nitrógeno, considerado en ese entonces constituido de 7 electrones y 14 protones, Figura 9. Al contener un número impar de partículas de espín 1/2 debería de comportarse de acuerdo a la estadística de Fermi-Dirac, Figura 10, y no de acuerdo a la estadística de Bose-Einstein, Figura 11, que siguen partículas de espín entero, como experimentalmente es el caso. Proponiendo siete de sus hipotéticas partículas más de espín 1/2 para constituir el núcleo ya se tiene un número par de partículas de espín 1/2 -es decir, un número entero de espín-; de este modo Pauli pudo explicar esta otra evidencia experimental.

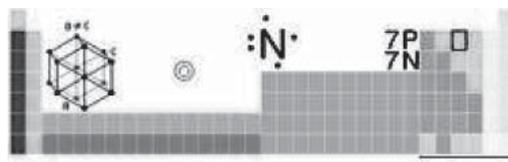
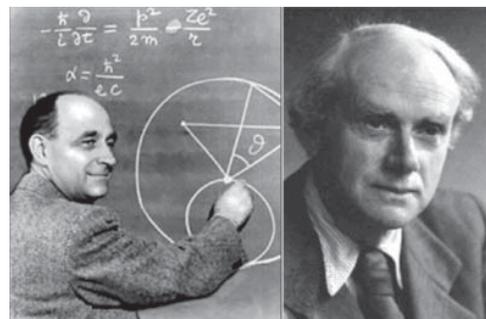
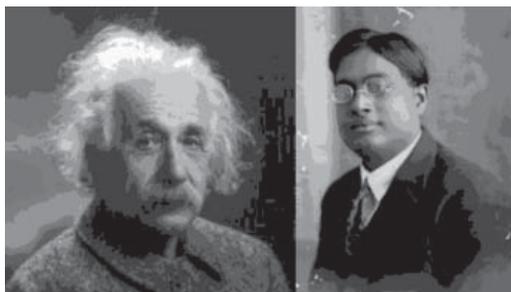


Figura 9. Constitución del núcleo de N, tal como se conoce en estos días. La propuesta de Pauli para explicar el espectro de energías de los electrones en el decaimiento beta de los nucleones también pudo, temporalmente, explicar la estadística de los núcleos atómicos como el N. La evidencia experimental posterior mostró que la solución de Pauli no es la adecuada. La correcta es la que se muestra en la figura.



$$f(E) = \frac{1}{e^{(E - E_f)/kT} + 1}$$

Figura 10. La estadística de Fermi-Dirac explica el comportamiento de las partículas de espín semi-entero, por ejemplo los neutrones, los electrones, etc. La ecuación describe como se distribuyen los estados energéticos en esta estadística.



$$f(E) = \frac{1}{Ae^{E/KT} - 1}$$

Figura 11. La estadística de Bose-Einstein explica el comportamiento de las partículas de espín entero, por ejemplo los fotones, de pares de electrones, etc. La ecuación describe como se distribuyen los estados energéticos, en particular, en esta estadística.

La solución anterior de Pauli duró muy poco, porque contradecía la evidencia experimental que después se acumuló. James Chadwick en 1932 descubrió el neutrón, una partícula de espín $\frac{1}{2}$, constituyente del núcleo atómico, y eléctricamente neutra. Esta nueva partícula resolvía muy bien el problema de la estadística de los núcleos atómicos, aunque no era la partícula postulada por Pauli, ya que la masa del neutrón es del orden la masa del protón, y sin las complicaciones que introducía la hipotética partícula de Pauli. Ahora el núcleo de Nitrógeno es constituido por 7 protones y 7 neutrones, ya no hay necesidad de postular electrones como constituyentes del núcleo atómico; como ambas clases de partículas poseen espín $\frac{1}{2}$, y es un número par de ellas en el núcleo, la estadística de Bose-Einstein se cumple cabalmente. Sin embargo, el misterio de las partículas postuladas por Pauli permanecía.

Los neutrinos de E. Fermi

Enrico Fermi, Figura 12, publicó en 1934 la teoría del decaimiento beta, para explicar las evidencias experimentales del decaimiento beta de los núcleos atómicos. En esta teoría, las partículas hipotéticas de Pauli no existen dentro de los núcleos atómicos, son creadas durante las desintegraciones de éstos, junto con las partículas beta –los electrones-. Por ejemplo, el electrón y el neutrino no existen dentro del neutrón; éstos primeros son creados durante la desintegración de éste último. Fermi llamó, en esta teoría, a las hipotéticas partículas de Pauli *neutrinos*, o *pequeños objetos neutros*. Y calculó la dependencia del espectro de energía como función de la masa del neutrino. Comparando sus curvas teóricas con las distribuciones



Figura 12. Enrico Fermi. Formuló la teoría del decaimiento beta de los nucleones. Dentro de ésta, nombró a las partículas postuladas por Pauli neutrinos –con raíces italianas-, esto es, pequeñas partículas neutras.

experimentales, Figura 13, concluyó que la masa del neutrino es ya sea cero o extraordinariamente pequeña en comparación con la masa del electrón.

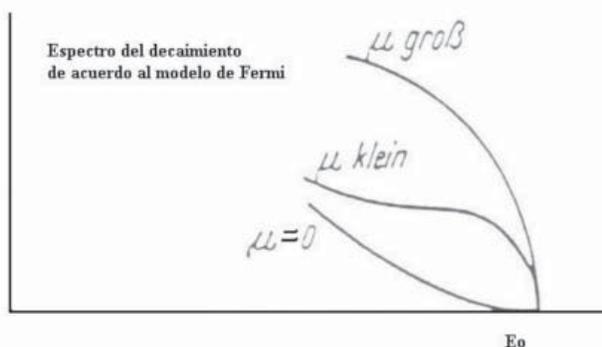


Figura 13. Curvas teóricas de la teoría de desintegración beta de Fermi para diferentes valores de la masa de los neutrinos.

Rudolf Peierls, Figura 14, y Hans Bethe, Figura 15, dentro de la teoría anterior de Fermi, calcularon la probabilidad de interacción de los neutrinos con la materia ordinaria; concluyeron que esta probabilidad es extremadamente pequeña. Por ejemplo, los neutrinos con la energía que adquieren en la desintegración beta de un neutrón tienen una trayectoria libre media en agua de aproximadamente de 1000 años luz. Esto quiere decir que si el volumen de la Vía Láctea (que mide unos 100 000 años luz de diámetro mayor), Figura 16, fuera llenado con agua, y después algunos neutrinos enviados a través de ella, la atravesarían casi todos sin siquiera chocar una sola vez con las moléculas de agua. Eso es lo que quiere decir una probabilidad de interacción muy pequeña. Debido a este resultado,



Figura 14. Rudolf Peierls. Calculó la probabilidad de interacción de los neutrinos con la materia ordinaria. Concluyó que no hay forma práctica de detectar a los neutrinos.



Figura 15. Hans Bethe. Calculó la probabilidad de interacción de los neutrinos con la materia ordinaria. Concluyó que no hay forma práctica de detectar a los neutrinos.

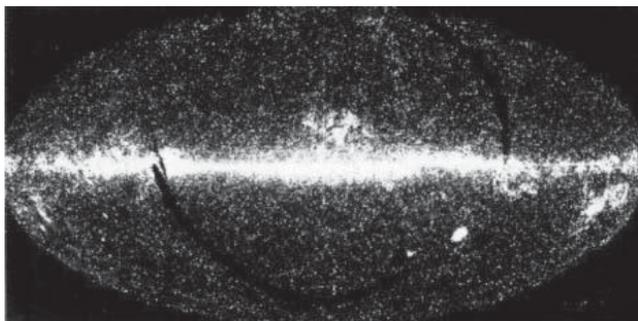


Figura 16. Dibujo de la Vía Láctea. Las medidas, en años luz, son 100 000 en el diámetro mayor y 30 000 en el diámetro menor, aproximadamente.



Figura 17. Arthur Eddington. Dudó incluso de la capacidad e ingenio de los físicos para producir y detectar a los neutrinos.



Figura 18. George Gamow. Mantuvo su interés en la física de los neutrinos. Consideró seriamente su estudio y su posible universalidad.

Bethe y Peierls concluyeron que no hay forma práctica alguna de detectar, u observar, a los neutrinos.

Pauli mismo se sintió desanimado al enterarse de los resultados anteriores de Bethe y Peierls, y se expresó de esta forma:

*He postulado una partícula que no puede ser detectada.
He hecho una cosa terrible.*

Así fue como nació el neutrino. Y permaneció como una posibilidad enigmática durante casi tres décadas, a pesar de las opiniones en contra que algunos físicos prominentes tenían. Bohr, por ejemplo, aún después de leer el trabajo de Fermi permaneció escéptico, e incrédulo, acerca de la realidad de los neutrinos; y Arthur Eddington, Figura 17, no sólo acerca de la naturaleza de los neutrinos sino acerca de la capacidad e ingenio de los físicos para producirlos y detectarlos; y Fermi mismo al preguntársele acerca de la posibilidad de producirlos y detectarlos, evadió la respuesta diciendo que podría ser un bonito experimento y que bueno sería hacerlo, pero que no tenía idea de cómo hacerlo.

A pesar de las anteriores opiniones cautelosas y, en cierta medida, adversas, físicos como George Gamow, Figura 18; Frederick Reines, Figura 19; y Clyde Cowan, Figura 20, entre otros, permanecieron activos buscando nuevas formas de apoyar la propuesta de los neutrinos y aportar pruebas experimentales de su existencia.

George Gamow en 1948 escribió acerca de la realidad de los neutrinos, con elocuencia y confianza sobre su existencia, a pesar de que hasta esos días nadie los había detectado directamente, basándose exclusivamente en evidencias experimentales indirectas.



Figura 19. Frederick Reines. Consideró seriamente el estudio de los neutrinos. Concibió sistemas experimentales innovadores para producirlos y detectarlos. Detectó por primera vez a los antineutrinos.



Figura 20. Clyde Cowan. Consideró seriamente el estudio de los neutrinos. Concibió sistemas experimentales innovadores para producirlos y detectarlos. Detectó por primera vez a los antineutrinos.

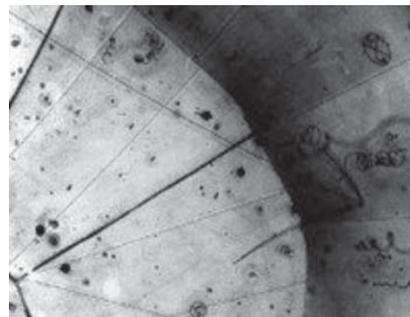


Figura 21. Cámara de Wilson y trazas dejadas en la misma por partículas generadas por neutrinos que la atraviesan.

Por ejemplo, mediciones muy cuidadosas de la energía y momento, hechas en cámaras de niebla de Wilson –Figura 21–, en decaimientos beta, de los electrones y de los núcleos remanentes indicaban que cantidades cuantificables de energía y momento no se detectaban; esto indicaba que otra partícula emitida al mismo tiempo que el electrón no estaba siendo detectada, que era responsable de llevarse la cantidad de movimiento y energía faltantes, y que dejaba muy poca duda acerca de su existencia.

George Gamow incluso especuló, en su escrito, que los neutrinos podrían aparecer en la desintegración de los recién descubiertos piones y mesones mu atmosféricos, Figura 22, porque también aparentemente una partícula esquiva se llevaba parte de la energía y momento de los decaimientos.

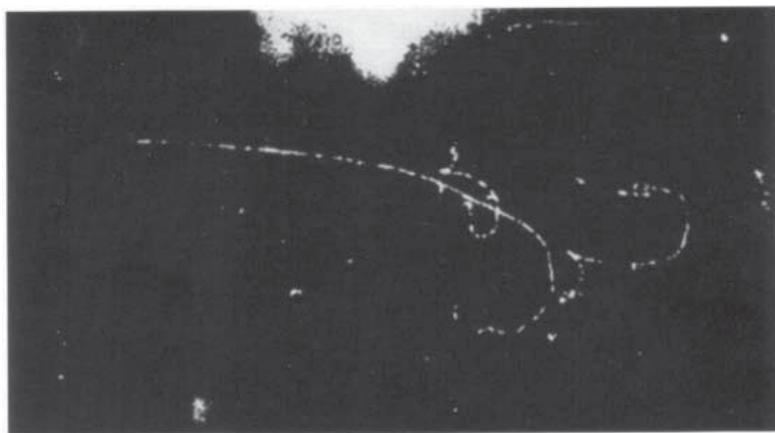


Figura 22. Rastros de Piones y muones atmosféricos dejados en una cámara de Wilson. Mediciones precisas de las energías de los productos de decaimiento muestran que fracciones importantes de energía faltan. Un pión puede decaer en un muón más un neutrino asociado al anti-muón; sólo el muón es detectado. El muón puede decaer en un electrón más un neutrino; sólo el electrón es detectado. En ambos casos se observa una faltante de energía –que corresponde al neutrino no detectado, como lo supuso G. Gamow.

Gamow, quizá sin saberlo ni proponérselo, estaba ya buscando la universalidad de los neutrinos, al tratar de extender la validez de la hipótesis de Pauli a fenómenos de la naturaleza apenas recién descubiertos pero que guardan cierta similitud con el decaimiento de los núcleos atómicos. Curiosamente este camino también lo siguió A. Einstein cuando extendió la hipótesis del quantum de Planck a fenómenos aparentemente no relacionados con el espectro de radiación del cuerpo negro como el efecto fotoeléctrico; también lo siguió Maxwell cuando unificó la electricidad, el magnetismo y la óptica; y Newton cuando unificó la mecánica celeste con la mecánica terrestre. Este camino, o forma de pensar o proponer soluciones, ha mostrado ser muy fructífero para realizar descubrimientos científicos relevantes y para impulsar el desarrollo de la física.

Por el camino seguido por George Gamow poco podría decirse de forma conclusiva qué son los neutrinos, cómo está relacionado el neutrino con el anti-neutrino, cuál es su masa, cuál es su espín, y muchas otras interrogantes que después aparecieron.

Para detectar a los neutrinos directamente había que seguir nuevos métodos. Frederick Reines y Clyde Cowan intentaron otros caminos experimentales, ensayando y creando otras tecnologías para detectarlos, Figura 23.

Esta es una verdad universal en física, y en las ciencias en general: un entendimiento más profundo de la naturaleza siempre va emparejado con el desarrollo de una tecnología más avanzada; y cuando se obtiene el nuevo conocimiento, éste permite desarrollar el siguiente paso tecnológico, para calar todavía más profundamente en la naturaleza. Y así sucesivamente hasta el punto de esclarecer todas las leyes de la naturaleza y establecer una colección de principios que permitan obtener deductivamente esas leyes. En este camino se habrá creado una tecnología que en estos días ni siquiera podemos entrever o soñar.

Los experimentos de F. Reines y C. Cowan

La idea primera de Reines y Cowan fue verificar experimentalmente si el neutrino existe independientemente de la reacción subnuclear que lo produce, adquiriendo identidad propia. Y sus experimentos se enfocaron directamente hacia ese objetivo. En uno de sus artículos, escribieron su idea básica de la siguiente forma:

...para mostrar que el neutrino tiene una existencia independiente, i. e., que éste puede ser detectado lejos del sitio donde es creado...

Su idea básica, por lo tanto fue corroborar una hipótesis. La hipótesis sobre la existencia de los neutrinos como partículas independientes con las propiedades singulares postuladas por Pauli, y extendidas y refinadas por Fermi.

En 1951, cuando Reines y Cowan iniciaron los trabajos, su



Figura 23. Nuevas tecnologías ensayadas por Reines y Cowan para detectar a los neutrinos de Fermi, como electrónica de coincidencia, centelladores, fotodetectores, automatización, etc.

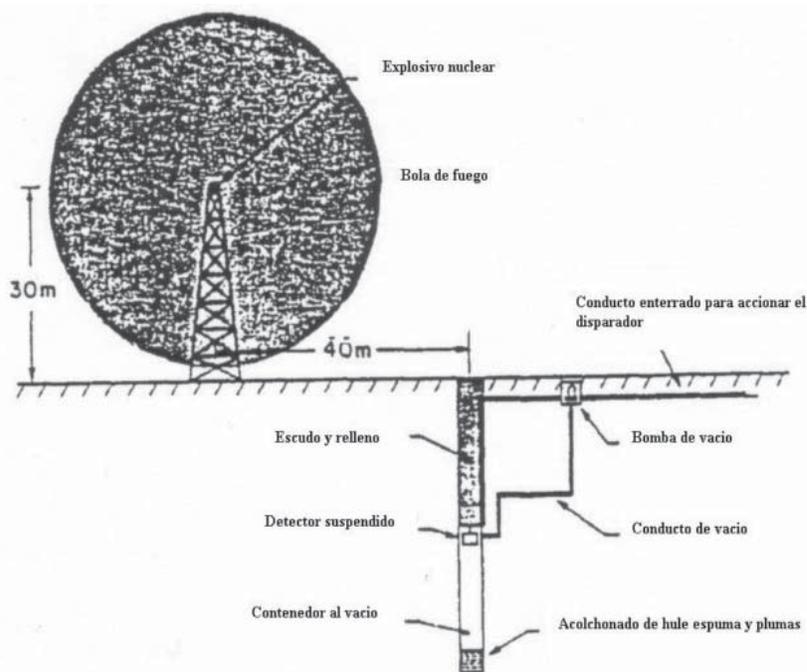


Figura 24. Diagrama de la propuesta experimental de Reines y Cowan para detectar a los neutrinos producidos en una explosión nuclear. La propuesta fue aprobada por las autoridades del Laboratorio de los Álamos, NM, USA. Nunca fue realizado de esa forma.

primera aproximación fue usar la explosión de una bomba nuclear como fuente de neutrinos –ya que es una fuente muy copiosa de neutrinos– y un detector enterrado a unos 100 metros de distancia del foco de la explosión, Figura 24.

La idea original de Reines y Cowan era impráctica. La reacción estudiada y buscada fue $\bar{\nu}_p \rightarrow n e^+$ -anti-neutrino proveniente de la explosión nuclear colisionando con un protón del blanco para producir un neutrón más un positrón- detectada usando centelladores líquidos de reciente invención. Aunque el experimento fue aprobado por el director

del laboratorio de los Álamos, el experimento nunca fue realizado de esa manera. Técnicamente la reacción de la idea original de Reines y Cowan se conoce como decaimiento beta inverso.

Siguiendo la idea propuesta, Bethe preguntó a Reines y Cowan cómo distinguirían el evento de un neutrino de otros que se originarían de la explosión nuclear. La respuesta fue que primero blindarían el detector de los rayos gamma y de los neutrones; segundo buscarían señales coincidentes desfasadas de la captura del neutrón y del aniquilamiento del positrón. El problema real era operar un detector en la proximidad de una explosión nuclear, además de no poder repetir el experimento tantas veces como fuera necesario para conseguir una alta estadística.

Meses después, Reines y Cowan se percataron que las señales buscadas de la explosión nuclear serían muy abundantes y que por lo tanto también podrían usar un reactor nuclear operando de manera estable como fuente de neutrinos. Le contaron su idea a Fermi, y éste no vio objeciones. Y les respondió, el 8 de Octubre de 1952, de la siguiente forma:

...Ciertamente sus nuevos métodos deben ser mucho más simples de llevar a cabo y tienen las enormes ventajas de que las mediciones pueden ser repetidas cualquier número de veces. Estaré muy interesado en ver cómo su detector de 10 pies cúbicos de centelladores va a trabajar, y no sé de ninguna razón por la cual no pueda funcionar.

El primer sistema experimental de Reines y Cowan fue emplazado cerca de uno de los reactores nucleares usados para producir Plutonio en el proyecto Manhattan, Figura 25; el detector consistió básicamente de un tanque de 300 litros de centellador líquido. Y su resultado primero –un incremento significativo de la señal buscada–, con el reactor en funcionamiento, fue opacado por la radiación cósmica de fondo. Es decir, no lograron un resultado conclusivo.

El segundo sistema experimental fue emplazado cerca del reactor nuclear del río Savannah, Figura 26, que generaba un flujo de 10 billones de antineutrinos por centímetro cuadrado por segundo a una distancia de 11 metros, a 12 metros por debajo del suelo para evitar los rayos cósmicos. Por ese tiempo ya se reconocía la existencia de los neutrinos y de los antineutrinos; este último, por ejemplo, producido en pareja con el electrón en un decaimiento beta de un nucleón. El detector consistió en tres tanques de centelladores orgánicos, cada uno con 110 tubos fotomultiplicadores, y entre cada dos de éstos un tanque de 200 litros lleno de agua con Cloruro de Cadmio disuelto para capturar neutrones. Figura 27.



Figura 25. Primer sistema experimental de Reines y Cowan para detectar neutrinos (en realidad antineutrinos) provenientes de un reactor nuclear. En la fotografía Reines lo inspecciona.



Figura 26. Segundo sistema experimental de Reines y Cowan.

Un antineutrino proveniente del reactor ocasionalmente chocaba con un protón del agua desencadenando una reacción que producía un positrón y un neutrón; el positrón se aniquila casi inmediatamente con un electrón de algún átomo produciendo dos fotones de rayos gamma que eran detectados por el centellador; unos 10 microsegundos después el neutrón es capturado por un núcleo atómico de Cadmio produciendo un segundo rayo gamma detectado por los centelladores, Figura 28.

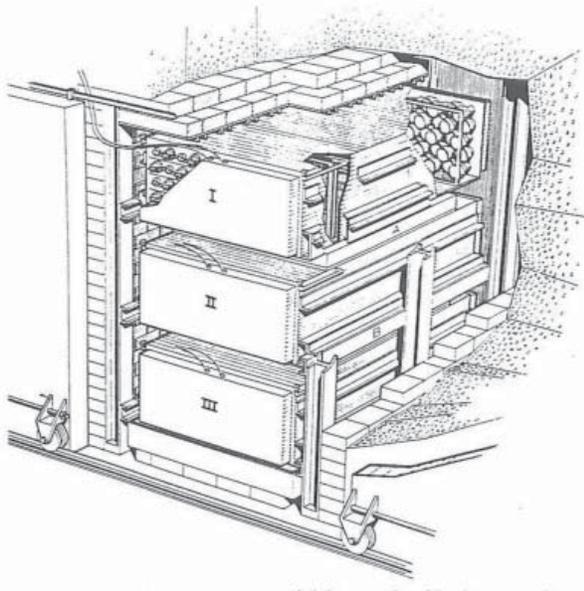


Figura 27. Dibujo del segundo detector de centelleo usado por Reines y Cowan en su segundo experimento para detectar neutrinos.

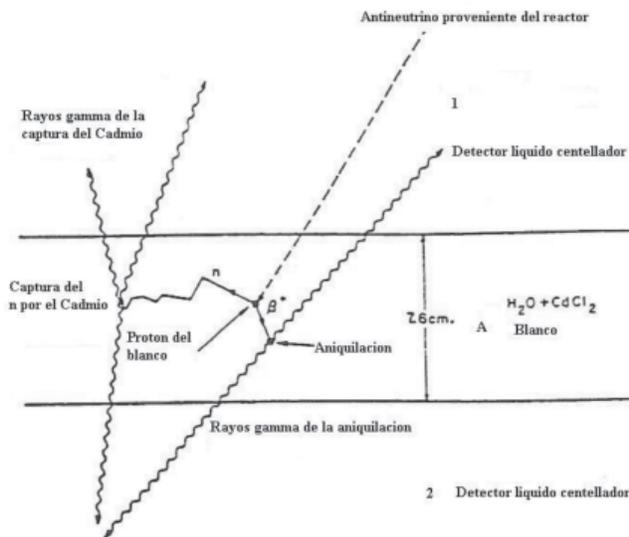


Figura 28. Reacción física en el centellador de Reines y Cowan. Las señales electromagnéticas coincidentes detectadas fueron tomadas como la evidencia directa de la interacción de un neutrino proveniente del reactor con un protón del centellador, produciendo un neutrón –que libera un rayo gamma al ser capturado por un núcleo– más un positrón –el antielectrón– que produce una señal electromagnética –dos fotones– al ser aniquilado por un electrón del medio.

La coincidencia desfasada de las dos señales en los centelladores fue tomada por Reines y Cowan como la detección de un antineutrino. Ellos observaron tres eventos por hora con el reactor funcionando, que era mucho más grande que la radiación de fondo producidos por rayos cósmicos o coincidencias accidentales.

Llenos de gozo y orgullo, por su descubrimiento, F. Reines y C. Cowan enviaron un telegrama a Pauli el 14 de Junio de 1956 que decía textualmente lo siguiente:

Estamos muy contentos de informarle que hemos definitivamente detectado neutrinos en los remanentes de la fisión nuclear observando el decaimiento inverso de los protones.



Figura 29. Mensaje de Reines y Cowan para Pauli.

Por versión de Reines, Pauli y sus amigos bebieron una caja de Champagne para celebrar el descubrimiento y muy tomado respondió a Reines y Cowan lo siguiente:

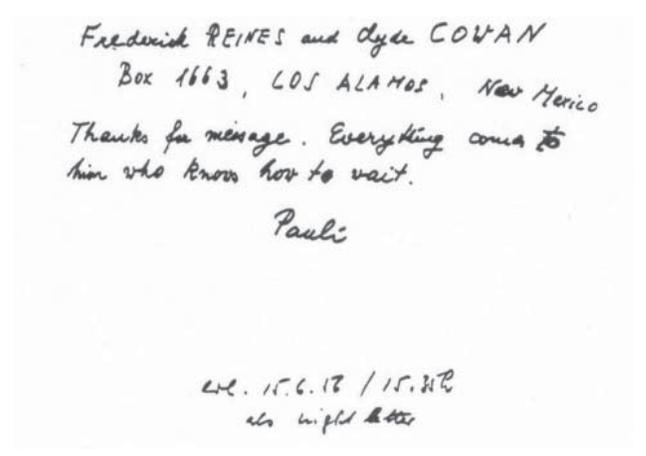


Figure 30. Mensaje de Pauli a Reines y Cowan.

Gracias por el mensaje.

Todo se cumple para el que sabe cómo esperar.

F. Reines recibió el premio Nóbel de física en 1995.
C. Cowan no lo recibió, murió antes.

Los descubrimientos en física de neutrinos continúan hasta nuestros días. Por ejemplo, los experimentos DONUT(E872), MINERvA(E938)¹, MiniBooNE(E998/E944), NoVA(E929), NuTeV(E815), MINUS(E875/E934), SciBooNE(E954), y otros muchos de Fermilab y de otros laboratorios del mundo. La rama de la física de neutrinos es una de las dos ramas en que se divide gruesamente la física de altas energías en estos días. La otra rama es la física de hadrones pesados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente apoyado por los siguientes proyectos: Apoyo a la investigación científica UGTO 2006, CONACYT 39941, CONCYTEG 06-16-K117-99.

REFERENCIAS

A. Pais, A. (1986). *Inward Bound*. Clarendon Press, Oxford Mass. USA.

Anderson, C. D. (1933). *Phys. Rev.* 44, 406.

Anderson, D. y Anderson, H. L. (1983). *The birth of particle physics*. (L. M. Brown y L. Hoddeson, editores) Cambridge University Press, Cambridge Mass. USA.

Bernardini, G. (1983). *The birth of particle physics*. (L. M. Brown y L. Hoddeson, editores) Cambridge University Press, Cambridge Mass. USA.

Brown, L. M. (1978). *Phys. Today*, September, 23.

Conversi, M. (1988). *40 Years of Particle physics*. (B. Foster y P. H. Fowler editores) Adam Higer, London England.

Cowan Jr., C. L., Reines, F., Harrison, F. B., Kruse, H. W., y McGuire, A. D. (1956). Detection of the Free Neutrino: A Confirmation. *Science* 124, 103.

Danby, G. *et al.*, (1962). *Phys. Rev. Lett.* 9, 36.

http://www.ps.uci.edu/~superk/superk_detector.html

Kropp, W., Moe, M., Price, L., Schultz, J. y Sobel, H. (editores) (1991). *Neutrinos and Other Matters, Selected Works of Frederick Reines*. World Scientific, Singapore.

Lattes, C. M. G. *et al.*, (1947). *Nature* 159, 694.

Lee, T. D. y Yang, C. N. (1960). *Phys. Rev. Lett.* 4 307.

Marshak, R. E. y Bethe, H. A. (1947). *Phys. Rev.* 72, 506.

McDonald, A. B., Klein, J. R., y Wark, D. L. (2003). Solving the Solar Neutrino Problem, *Scientific American* 288, 40.

Neddermeyer, S. H. y Anderson, C. D. (1937). *Phys. Rev.* 51, 884.

Newman, H. B. y Ypsilantis, T (editors). (2007). *History of Original Ideas and Basic Discoveries in Particle Physics*. Springer, USA.

Perl, M. L. *et al.*, (1975). *Phys. Rev. Lett.* 35, 1489.

Perl, M. L. (1996). Reflections on Experimental Science. *World Scientific Publishing Company*, Singapore.

Pionni, O. (1983). *The birth of particle physics*. (L. M. Brown y L. Hoddeson, editores) Cambridge University Press, Cambridge Mass. USA.

Pontecorvo, B. (1960). *Soviet Physics JETP* 37, 1236.

Reines, F. (1979). The Early Days of Experimental Neutrino Physics. *Science* 203, 11.

Reines, F. (1994). *40 Years of Neutrino Physics. Progress of Particle and Nuclear Physics*, Vol. 32, 1.

Reines, F. *et al.*, (1960). *Phys. Rev.* 117, 159.

Reines, F. *The Detection of Pauli's Neutrino*. NATO ASI series, ARW94/066, Eds. H.B. Newman and T. Ypsilantis.

Reines, F. y Cowan Jr., C. L. (1953). *Phys. Rev.* 92, 830.

Reines, F. y Cowan Jr., C. L. (1956). The Neutrino. *Nature* 178, 446.

Reines, F. y Cowan Jr., C. L. (1957). Neutrino Physics. *Physics Today* 10, No. 8, p.12.

Rossi, B. B. (1983). *The birth of particle physics*. (L. M. Brown y L. Hoddeson, editores) Cambridge University Press, Cambridge Mass. USA.

Schwartz, M. (1960). *Phys. Rev. Lett.* 4, 306.

Scott, F. A. (1935). *Phys. Rev.* 48, 391.

Street, J. C. y Stevenson, E. C. (1937). *Phys. Rev.* 51, 1005(A).

Sutton, C. (1992). *Spaceship neutrino*. Cambridge University Press, Cambridge Mass. USA.

Yukawa, H. (1935). *Phys. Math. Sec. Japan* 17, 48.

¹ El Dr. Julián Félix, el Dr. Gerardo Zavala, el Dr. Marcos Reyes, y el Dr. Gerardo Moreno, todos de la Universidad de Guanajuato, están asociados a la colaboración MINERvA. Los estudiantes de física, o de computación, o de electrónica, de la UGTO o de cualquier universidad pueden participar en MINERvA; comunicarse con el Dr. Julián Félix.