

RADIOACTIVIDAD – NEUTRINOS – OSCILACIONES DE NEUTRINOS:

Radioactividad:

El físico francés Antoine Henri Becquerel descubrió casualmente que un compuesto de uranio velaba las placas fotográficas envueltas en papel negro, descubriendo así la emisión de rayos, similares a los rayos X que descubrió el físico Conrad Rongten.

El primer estudio exhaustivo del fenómeno correspondió al matrimonio Pierre Curie, y Marie Curie, descubriendo un nuevo elemento, llamado Polonio, en honor a la Polonia natal de Marie; y el radio, del latín radius que significa rayo de luz. Marie llamo radioactividad a la propiedad de emitir rayos. El radio produce aproximadamente un millón de veces más radiación que el uranio.

Ernest Rutherford, nacido en 1871 en Nueva Zelanda, publicó en 1899 un documento esencial, en el que estudiaba el modo que podían tener esas radiaciones de ionizar el aire, situando al uranio entre dos placas cargadas y midiendo la corriente que pasaba. Estudió así el poder de penetración de las radiaciones, cubriendo sus muestras de uranio con hojas metálicas de distintos espesores. De ello dedujo que el uranio emitía dos radiaciones diferentes, pues tenían poder de penetración distinto.

En 1900, Paul Ulrich Villard químico y físico francés nacido en 1860, proporcionó evidencia de un tercer tipo de radiación en el radio, que denominó radiación gamma.

En 1904, Rutherford, junto a su ayudante en la Universidad de Manchester Johannes Wilhelm Geiger, físico alemán nacido en 1882 conocido como Hans, descubrieron que la radiación alfa estaba constituida por algo que se asemejaba a átomos de helio.

Recordar que en aquellos años no se había descubierto los neutrones. De hecho se consideraba que los núcleos atómicos, que sería descubiertos años después por el propio Rutherford, estaban formados por protones y electrones.

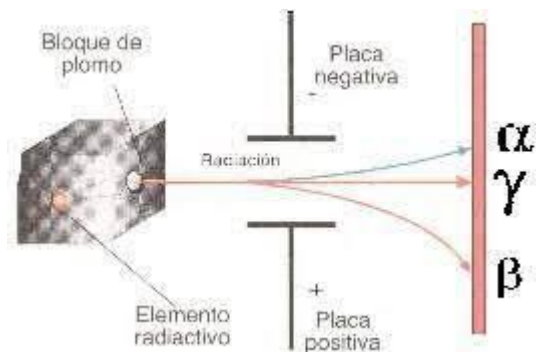
Finalmente, los tres tipos de radioactividad fueron identificados:

- Radiación alfa: constituida por núcleos de Helio 4 (dos protones y dos neutrones).
- Radiación beta: constituida por electrones.
- Radiación gamma: constituida por fotones de alta energía.

Desintegración beta:

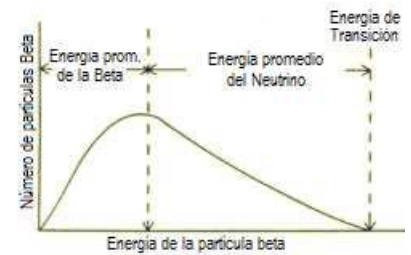
Lo que se esperaba fue lo que se encontró en el caso de la radiación alfa y gama. Las energías de los rayos coincidían exactamente con las diferencias de masa (energías) entre los sistemas nucleares. Sin embargo, la situación fue muy distinta con la radiación beta. En 1914 el físico James Chadwick mostro que el espectro energético de la emisión de radiación beta era continuo. Esto significaba que los electrones eran emitidos con energías muy distintas. Este resultado fue completamente inesperado y condujo a una gran confusión. Si los estados nucleares iniciales y finales tenían valores determinados de la energía, los electrones debían tener una energía fija, y no un espectro continuo

Muchos científicos (Niels Bohr) se hacían la pregunta de si había llegado el momento de abandonar el ppio de la conservación de la energía. El ppio sagrado que los científicos siempre han verificado mediante experimentos.



Propuesta del neutrino:

En el año 1930 Wolfgang Ernst Pauli, físico austríaco nacido en 1900 nacionalizado suizo, propuso otra solución para tratar de salvar el principio de conservación de la energía. El 4 de diciembre de 1930, invitado a un congreso de físicos en Tübingen, Alemania, envió a sus colegas una carta en donde proponía que, conjuntamente con la partícula beta, podría ser emitida otra partícula más, pero sin carga, la cual se lleva parte de la energía y que por ser neutra no había podido ser descubierta aún.



En febrero de 1932, el físico inglés James Chadwick nacido en 1891, descubre el neutrón, pero los neutrones son demasiado pesados y por ello no se corresponden a la partícula imaginada por Pauli.

En 1932 Carl David Anderson, físico estadounidense nacido en 1905, descubre el positrón. El positrón fue la primera partícula de antimateria observada, verificando la teoría de Paul Adrien Maurice Dirac, un físico británico nacido en 1902. A finales de 1933, mientras Frederic Joliot-Curie, yerno de los esposos Curie, descubre radioactividad beta positiva, esto es, un positrón es emitido en lugar de un electrón, en tanto que Enrico Fermi toma la hipótesis del neutrino y construye su teoría de la desintegración beta (Teoría de interacción débil).

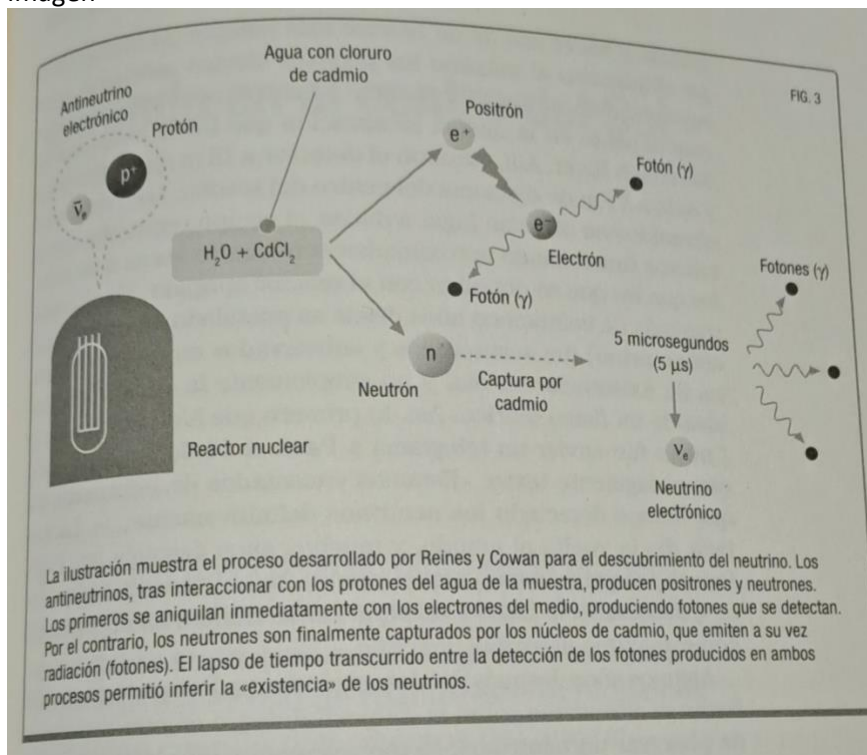
Características de neutrino:

- Masa del neutrino mucho menor que la masa del electrón
- Espín $\frac{1}{2}$
- Probabilidad de interacción del neutrino con la materia es miles de millones más pequeña que la probabilidad que la del electrón con la materia.
- Fermi ha propuesto llamarlo neutrino.

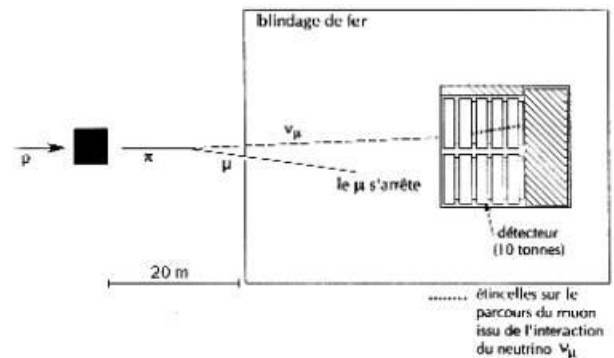
La primera propuesta:

Reines y Cowan realizaron un experimento usando un detector que constaba de un blanco de 400 litros de agua y cloruro de cadmio. El antineutrino producido en el reactor nuclear es emitido e interactúa con un protón del detector, produciendo un positrón y un neutrón. El positrón se aniquila con un electrón del material emitiendo simultáneamente dos fotones y el neutrón con baja energía cinética (neutrón térmico) es capturado eventualmente por un núcleo de cadmio, produciendo una emisión de fotones aproximadamente 5 microsegundos después de la aniquilación del positrón. El proceso observado es el inverso del decaimiento beta conocido.

Imagen



El estudio de los muones y piones debido a los protones de energía del orden del GeV, tuvo un enorme impacto en el propio conocimiento de neutrinos. Piones u muones eran fáciles de producir y ambas partículas se desintegraban al cabo de cierto tiempo. Se comprobó que el pion al desintegrarse daba lugar en la mayoría de los casos en un muon y un neutrino.



La confirmación del neutrino tauonico no resulto fácil. Debido a la enorme masa del leptón tau, era necesario disponer de neutrinos con energías muy altas, se pudo conseguir en el gran colisionador electron-positron del CERN. La observación del neutrino tau tuvo lugar en el año 2000 en el laboratorio de Fermilab.

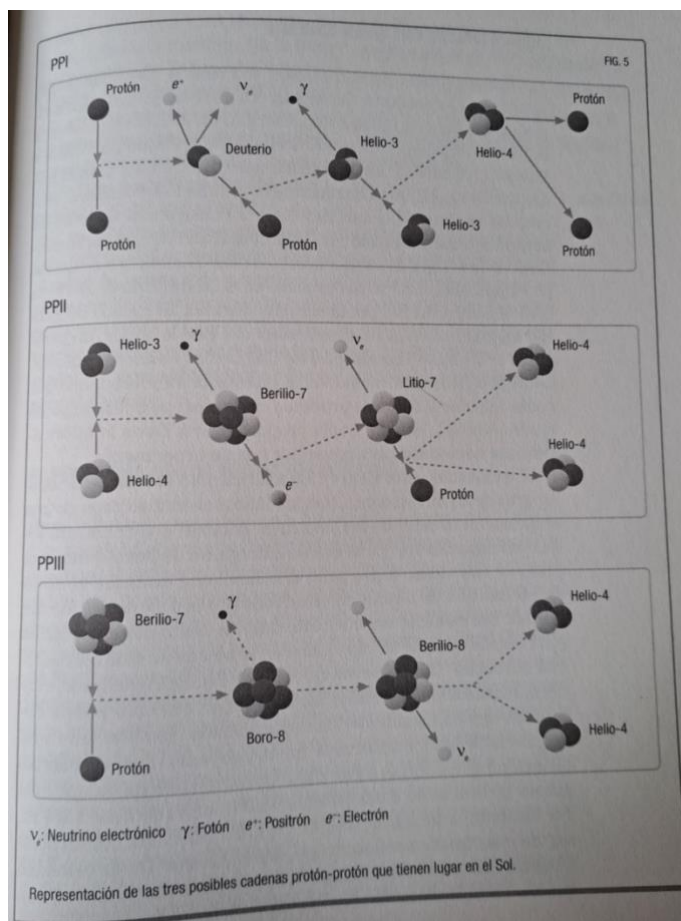
Mirando en el centro del sol: ¿Qué sucede en el interior del sol?

El sol es una fuente de neutrinos electrónicos.

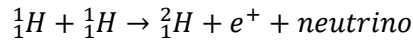
El proceso principal de la energía producida por el sol y las estrellas más pequeñas, se denomina cadena p-p

Dos protones de hidrogeno colisionan fusionandose en un núcleo de deuterio (constituido por un protón y un neutrón). En esta primera reacción se emite positrones y neutrinos. El deuterio captura un protón transformándose en un núcleo de Helio3 (2 protones y un neutrón) con la emisión de radiación electromagnética. Por último, dos núcleos de Helio3 interaccionan entre si dando lugar a un núcleo de Helio4 y dos protones.

El resultado global es 4 protones se fusionan en Helio4, entonces la energía producida se reparte en positrones, radiación electromagnética y neutrinos. Los positrones se aniquilan con los electrones produciendo radiación electromagnética.

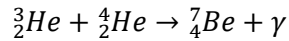


El neutrino producido en la reacción p-p

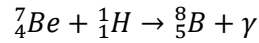


Tiene una energía pequeña y es difícil de detectar.

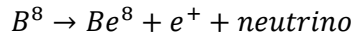
Pero la reacción que produce neutrinos, con mayor energía, no es un mecanismo ppal de la cadena p-p. Es la tercera reacción de la cadena pp: una vez que se forma Helio3, la mayoría reacciona con Helio4, formando Be7



Ese berilio captura un protón produce Boro 8

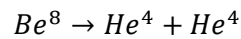


El boro es inestable y produce desintegración beta



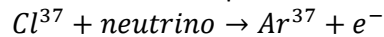
Este es el neutrino que podemos medir debido a que tiene suficiente energía para detectarse.

Aquí no termina el proceso, finalmente el



Ocurre con una pequeña fracción de Helio3

Una de las formas de detectar el neutrino es usando un isótopo de cloro37



El isótopo de argón es radiactivo y pueden detectarse los productos de su desintegración y así determinar cuántas reacciones tiene el cloro con el neutrino.

Esta es una forma de detectar neutrinos

El primer detector de neutrinos fue *Homestake*, El observatorio consistió principalmente en un tanque cilíndrico colocado al fondo de la mina con capacidad de albergar 400000 litros de cloro. La función de la mina es aislar al tanque de la radiación cósmica.

Los resultados que arrojó el observatorio, después de analizar los datos en un periodo de 1967-1997, fueron: el número de átomos:

$$N_{exp} = 2,56 \pm 0.16 \text{ SNU}$$

Mientras que el valor calculado teóricamente (Bahcall 1995) es:

$$N_{cal} = 8,5 \pm 0.9 \text{ SNU}$$

Que muestra un flujo casi un tercio menor al calculado por el Modelo Solar Estándar.

Estas detecciones son medidas por la unidad de flujo de neutrinos solares SNU (*Solar Neutrino Unit*), que es equivale a una captura por segundo por cada 10^{36} átomos del blanco.

Uno de los inconvenientes del uso de cloro en el experimento es que no permitía la detección de aquellos neutrinos menos energéticos asociados a la cadena pp, proceso dominante en el sol. Era necesario diseñar un nuevo experimento donde el cloro se sustituya por un elemento que permitiese la detección de estos neutrinos. El material adecuado era el galio que, tras interaccionar con los neutrinos daba lugar a un isótopo radiactivo de germanio. La ventaja del galio frente al cloro es que la reacción previa podía tener lugar con neutrinos con menos energía. En 1990 se desarrollaron los detectores de galio y comenzaron a tomar medidas. Los dos proyectos fueron GALLEX y SAGE.

GALLEX (instituciones europeas) se construyó en las instalaciones subterráneas del Laboratorio Nacional del Gran Sasso en el centro de Italia. Funciona desde 1991 al 1997. Continuando con la colaboración de GNO (Galio neutrino observatory) hasta 2003.

El segundo, SAGE (Sovietic American galio experiment), se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de Baksan en el Cáucaso, funciona de 1990 al 2007

Los neutrinos solares detectados eran la mitad de lo que predecía la teoría. Un número significado de neutrinos seguía estando ausente, y esta ausencia afectaba a neutrinos de diversas energías, tanto aquellos generados por el berilio como los producidos por la cadena p-p.

Los neutrinos de Kamiokande

El detector Kamiokande se situó en una mina de la compañía Kamioka a un kilómetro de profundidad en el centro de Japón. El detector consistía en un enorme tanque de agua ultra pura y rodeado por unos mil tubos fotomultiplicadores. El objetivo era detectar los neutrinos haciendo uso del denominado efecto Cherenkov.

El neutrino, tras colisionar con un electrón, le transfería energía suficiente para desplazarse en el agua a una velocidad superior a la velocidad de la luz en dicho medio. Esto no está en contradicción con la teoría de Einstein de la relatividad, que afirma que nada puede moverse más rápido que la luz en el vacío. La velocidad de la luz en el agua es un 75% de su velocidad en el vacío, pudiendo ser "superada" por la de las partículas cargadas. La forma y la intensidad de la luz Cherenkov revela qué tipo de neutrino es el causante y de donde viene. El electrón superluminico produce un cono de luz de cherenkov que puede detectarse en los fotomultiplicadores dando lugar a un anillo luminoso. El tamaño del anillo depende de la velocidad del electrón, que a su vez depende de la energía del neutrino que ha chocado con él. Así pues, el detector Kamiokande no solo permitía la detección de neutrinos, sino que también podía proporcionar información sobre su energía y procedencia. Además, se registraba en que momento tenían lugar las señales, es decir, se podía conocer el instante en que el neutrino interactuaba con el electrón. Sin embargo solo seguían detectando la llegada de la mitad de los neutrinos predichos por la teoría.

Estos experimentos conducían a la misma conclusión: un déficit en el número de neutrinos procedentes del sol respecto de la predicción teórica.

Esta incertidumbre estaba a punto de sufrir un cambio con la nueva versión del detector japonés, conocido SuperKamiokande, situado a un kilómetro bajo tierra, en la mina Mozumi, tendría una estructura cilíndrica de 39 m de ancho y 41 m de alto.

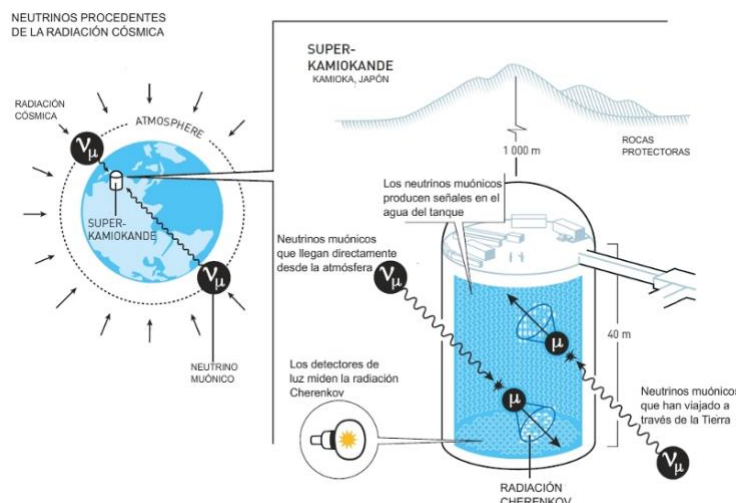
El detector estaba preparado para detectar neutrinos atmosféricos: electrónicos y muónicos. (los rayos cósmicos incidentes sobre la Tierra producen una ingente cantidad de partículas, entre las cuales se encuentran los piones. Estos se desintegran en muones y neutrinos muónicos, y a su vez, los muones decaen en electrones y neutrinos: electrónicos y muónicos. Todos estos neutrinos generados por la radiación cósmica reciben el nombre de neutrinos atmosféricos).

En ambos casos se producía un cono de luz de Cherenkov que daba lugar a un anillo luminoso que podía analizarse. Sin embargo, las señales eran distintas debidas a la diferencia de masa entre los dos leptones cargados asociados a ambos tipos de neutrinos. En el caso de los muones el anillo resultaba bien definido, y para los electrones se observaba más difuso. El detector podía determinar la energía, procedencia y el sabor.

En el caso de los neutrinos producidos en la atmosfera por encima del laboratorio, es decir, los que incidían en el detector por encima desde arriba, coincidían con lo que se había predicho.

En el caso de los neutrinos producidos en la atmosfera al otro lado del planeta, y que alcanzaban el detector luego de recorrer 13000 km. El número de neutrinos muónicos que se detectaban era el mismo que el de neutrinos electrónicos. La explicación posible era que los neutrinos muónicos, en su viaje a través de la Tierra, desaparecían o se transformaban en otro tipo que no podía detectarse.

Esto llevo a considerar que al igual que los neutrinos atmosféricos desaparecían (o se transformaban) en pleno vuelo a través de la Tierra, lo mismo podía suceder con los neutrinos electrónicos generados por el sol: en su largo trayecto a la Tierra muchos de ellos desaparecen o no pueden ser detectados.

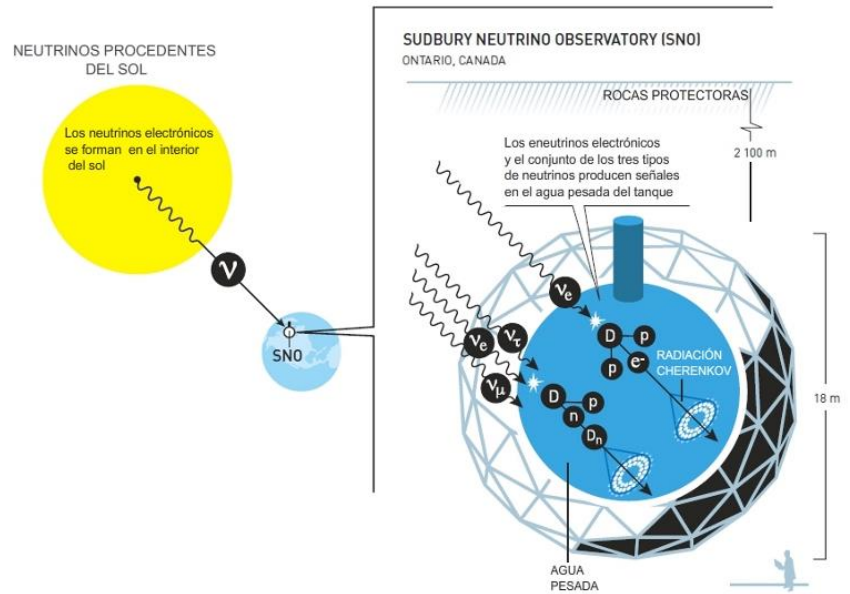


En 2001 se realizó un experimento en Canadá SNO () con un detector de 1000 toneladas de agua pesada, situado a dos km bajo Tierra. El agua pesada está constituida por deuterio en lugar de hidrogeno. Los neutrinos solares podían interactuar con los electrones del medio dando lugar a la radiación cherenkov. Este proceso tenía lugar con cualquier tipo de neutrino.

La energía de los neutrinos electrónicos era suficientemente alta, los núcleos podían romperse liberando sus constituyentes básicos. Como consecuencias del choque, produce dos protones y un electrón. Los neutrinos muónicos y tauónicos podían chocar con deuterios produciendo un neutrón, un protón y un neutrino.

Esquemáticamente:

Este experimento pudo mostrar que la cantidad de neutrinos electrónicos eran aproximadamente la tercera parte del flujo total. También pudo concluir que los neutrinos del sol cambian (oscilan) de un tipo a otro durante su trayecto desde el centro del sol hasta la Tierra.



En 2015 les dieron el premio Nobel a los directivos de SuperKamiokande y SON: Arthur B. McDonald y Takaaki Kajita

