

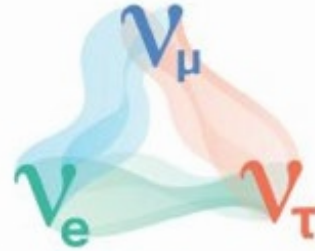
UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



XXX Verano de la Ciencia UG



X X X
Verano
D E L A
Ciencia
Universidad de Guanajuato



Aplicación de los neutrinos para la detección de isótopos radioactivos naturales

David Delepine, Luis Ernesto Guerrero Garcia, Barbara Daniela Hernandez

Los neutrinos

Los neutrinos son un tipo de partícula subatómica, sin carga, capaz de atravesar cualquier materia del universo.

Nada ni nadie me parará.

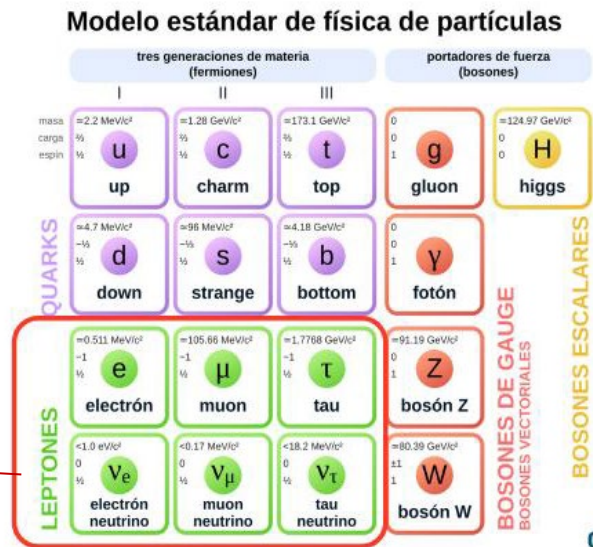
los **NEUTRINOS**, la "partícula fantasma".

Son las partículas más diminutas y segundas más abundantes en el universo.
- Son **partículas elementales** (en su interior no están conformadas por absolutamente ninguna otra partícula) por lo tanto, **forman parte del Modelo Estándar de Partículas**

Los neutrinos son parte de la familia de los **leptones**. Esta familia **no experimenta interacción fuerte**, además que forman parte de otra familia conocida como Fermiones, al igual que los quarks.

	I	II	III
masa	$<2.2 \text{ eV}/c^2$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$
carga	0	0	0
espín	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nombre	ν_e Neutrino electrónico	ν_μ Neutrino muónico	ν_τ Neutrino tauónico
Lepton	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e Electrón	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ Muón	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau

Familia de leptones



NEUTRINOS

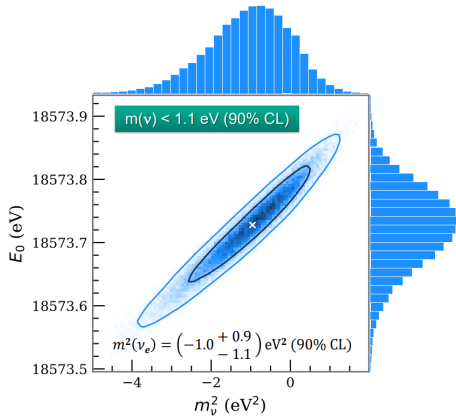


Son partículas increíblemente elusivas, es decir, su **tasa de interacción es baja**. Esto los convierte en los **mejores mensajeros del universo**, incluso mejores que los fotones, pues su naturaleza evasiva les permite **transportar y mantener la información de eventos astronómicos desde los lugares más inalcanzables del Cosmos**.

La tierra misma produce neutrinos, específicamente los isotopos radioactivos de la tierra

Naturaleza de los neutrinos

Masa

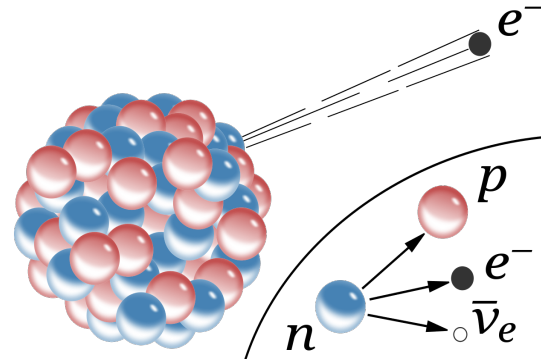


<https://francis.naukas.com/files/2019/09/D20190917-arxiv-1909-06048-katrin-neutrino-mass-direct-kinematic-method.png>

Masa inferior a 0,8 electronvoltios o $1,6 \times 10^{-36}$ kg

-- Poseen una masa muy pequeña, casi nula. Ningún experimento ha logrado medir directamente el valor absoluto de la masa de cada tipo de neutrino con alta precisión

Fuerza de interacción



Los neutrinos solo pueden interactuar por **fuerza débil**, donde se requieren partículas de materia y de fuerza (Bosones Z y W).

Carga eléctrica



Tiene una **carga eléctrica neutra** (neutrino: pequeño neutrón), por lo que no se ve afectado por fuerzas electromagnéticas.

Espín

<p>neutrinos</p> <p>all neutrinos are left-handed</p>	<p>no such thing as a right-handed neutrino</p>
<p>anti-neutrinos</p> <p>all anti-neutrinos are right-handed</p>	<p>no such thing as a left-handed antineutrino</p>

El espín **para todos los neutrinos es de $\frac{1}{2}$** . En 1958 se descubrió que el espín de los neutrinos **es siempre contrario a su movimiento**, a lo que se le denomina "**neutrino diestro**". Lo contrario para los antineutrinos.

Oscilaciones de los neutrinos



Desde 1957 se predijo una **curiosa propiedad** de los neutrinos por **Bruno Pontecorvo**.
Predicha cuando solo se conocía solo un sabor de neutrino.

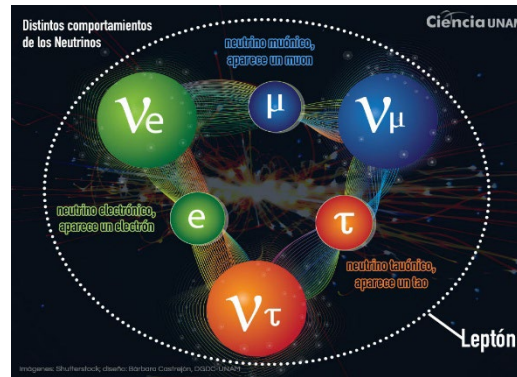
Existen tres “sabores” de neutrinos: Neutrinos **electrónicos, muonicos y tauonicos**.

Oscilación de neutrinos

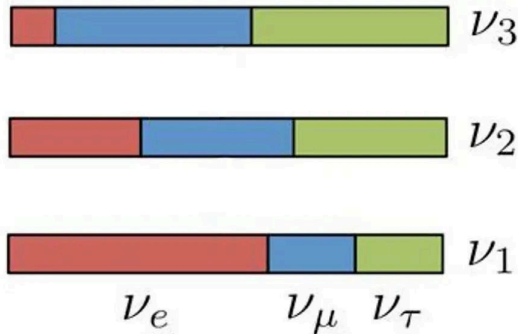
Para los neutrinos, existen **dos estados**: de *masa* y de *sabor*.

La diferente masa de “los estados de masa” provoca que estos se **muevan a diferentes velocidades, se desfasen** y que el neutrino **cambie de sabor**.

Es la capacidad de los neutrinos es que, al recorrer cierta distancia en el espacio, **su sabor cambia a otro por si mismo**.



**Los neutrinos no tienen un estado de masa definido, todo neutrino es una combinación/superposición de los tres estados de masa al mismo tiempo.*

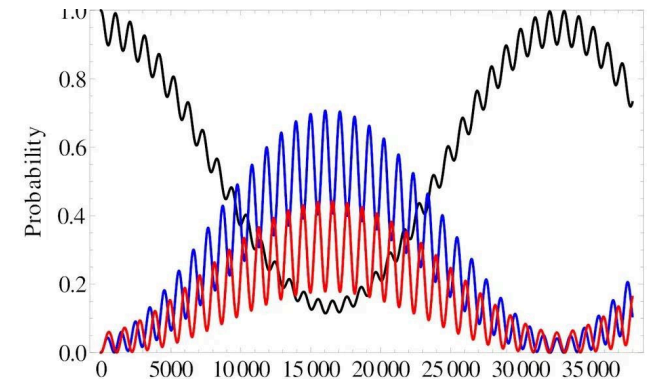


La siguiente formula representa la probabilidad de oscilación de los neutrinos:

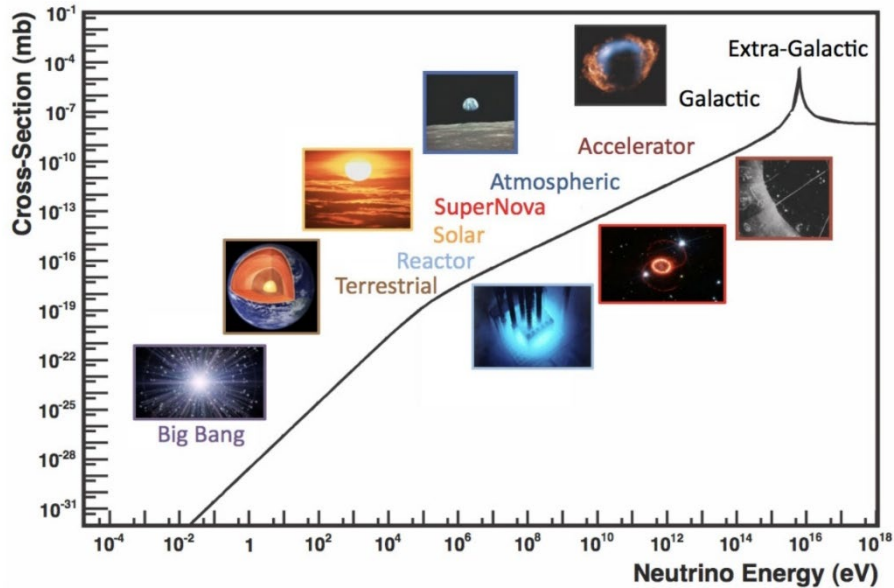
Extraemos:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E_\nu}\right)$$

θ_{23} : Ángulo de rotación
 Δm_{32}^2 : Diferencia de masa
 L : Distancia al detector lejano (longitud del largo viaje del neutrino)
 E_ν : Energía del flujo de neutrinos



Fuentes de neutrinos



Existen varias fuentes que emiten neutrinos, tanto **naturales como artificiales**, que emiten la partícula con diferentes valores de energía.

Las diferentes fuentes producen diferentes sabores de neutrinos o antineutrinos (Tau, Muón, Electrón).



electron neutrino



muon neutrino



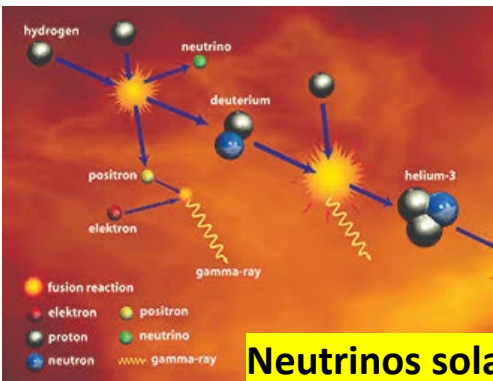
tau neutrino

Fuentes naturales

Ocurren durante continuas reacciones de fusión nuclear que convierten hidrógeno en helio, liberando ingentes cantidades de energía

Son producidos por la desintegración beta de isótopos radiactivos de larga vida que están presentes de forma natural en el interior de la Tierra, distribuidos en la corteza y el manto.

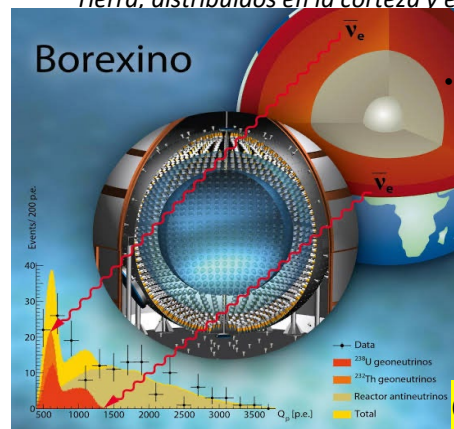
Se originaron en las etapas más tempranas del universo, aproximadamente un segundo después del Big Bang.



Neutrinos solares

- Generan gran cantidad prodigiosa de neutrinos, específicamente neutrinos electrónicos (ν_e).

- Se estima que el Sol produce aproximadamente 2×10^{38} neutrinos electrónicos por segundo.

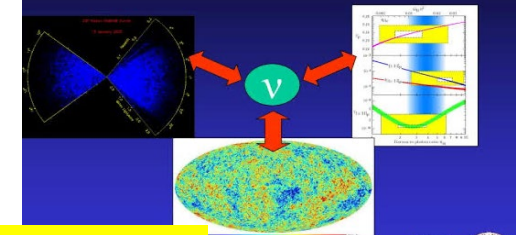


Geoneutrinos

Viajan desde las profundidades de la Tierra hasta los detectores en la superficie sin alteración, llevando consigo información directa sobre su punto de origen.

- Principales isótopos: **Uranio-238, Uranio-235, Torio-232, Potasio-40**
- Tiene implicaciones para la comprensión de la tectónica de placas, la convección del manto y la evolución de la Tierra.

RELIC NEUTRINOS: NEUTRINO PROPERTIES FROM COSMOLOGY



Neutrinos Relic

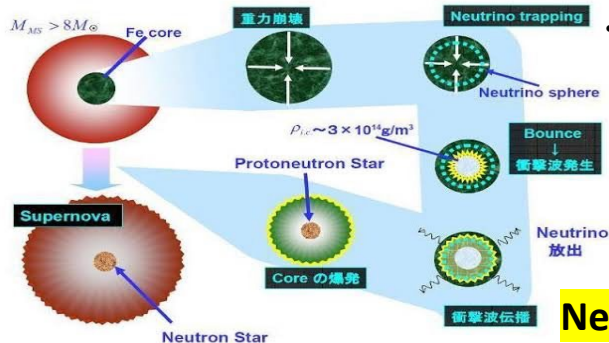
Sergio Pastor (IFIC)

- Se predice que permea todo el universo, con una densidad actual de 336 neutrinos por cm^3 y una temperatura de aproximadamente 1.95 K (-271.2 °C)
- Si pudieran ser detectados directamente, proporcionaría información invaluable sobre las condiciones del universo en su primer segundo de existencia

Fuentes de neutrinos

Fuentes naturales

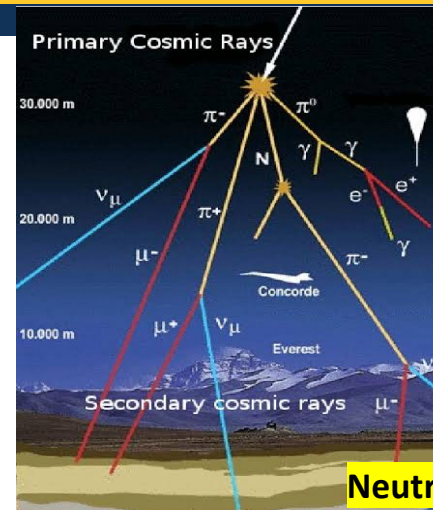
Producidas cuando se marca el final de la vida de estrellas masivas. La gran mayoría de esta energía se emite en forma de una ráfaga breve pero potente de **neutrinos y antineutrinos de todos los sabores**.



Son sondas únicas del interior de una estrella en colapso, región que es completamente opaca a la luz debido a la extrema densidad del material.

Neutrinos supernova

- Mientras que los fotones quedan atrapados en el denso material de la supernova y tardan horas en difundirse hacia el exterior, los neutrinos, debido a su débil interacción, escapan del núcleo colapsado casi instantáneamente, en cuestión de segundos.



Neutrinos de los rayos Cósmicos

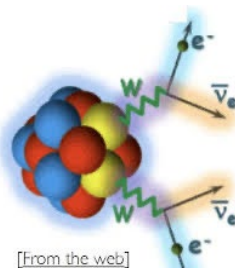
Cuando los rayos chocan con un núcleo atmosférico, produce partículas secundarias: **piones (π) y kaones (K)**. Estas partículas inestables se desintegran rápidamente:

Se generan en la atmósfera terrestre como resultado de la interacción de los rayos cósmicos con los núcleos de los átomos del aire (nitrógeno y oxígeno)

- Los **piones cargados**, suelen desintegrarse en **muones (μ) y neutrinos muónicos (ν_μ o $\bar{\nu}_\mu$)**
 - Los **muones** se desintegran en **electrones (e^- o e^+), neutrinos electrónicos (ν_e o $\bar{\nu}_e$) y neutrinos muónicos (ν_μ o $\bar{\nu}_\mu$)**.
- Los experimentos diseñados para observarlos suelen construirse en lugares subterráneos profundos, como minas o túneles bajo montañas para reducir el fondo de otras partículas de rayos cósmicos

Fuente artificial (Más común)

Un reactor nuclear típico puede producir del orden de **1020 antineutrinos por segundo**.

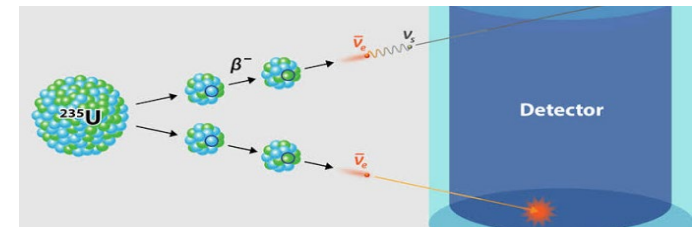
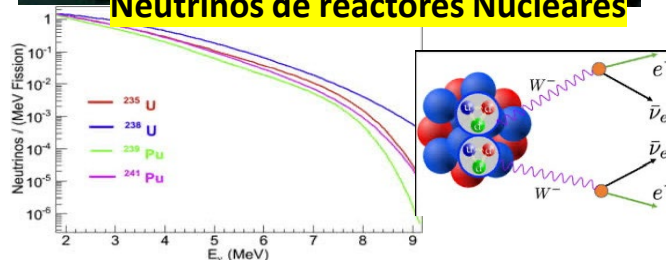


PROCESO:

- Núcleos pesados (**uranio-235, plutonio-239**) se fisionan al absorber un neutrón, se dividen en dos núcleos más ligeros, llamados **fragmentos de fisión**.
- Estos fragmentos de fisión suelen ser ricos en neutrones y son inestables.
- Para alcanzar la estabilidad, **sufren una cadena de desintegraciones beta**, en las cuales un neutrón se convierte en un protón, emitiendo un electrón y un antineutrino electrónico.



Neutrinos de reactores Nucleares

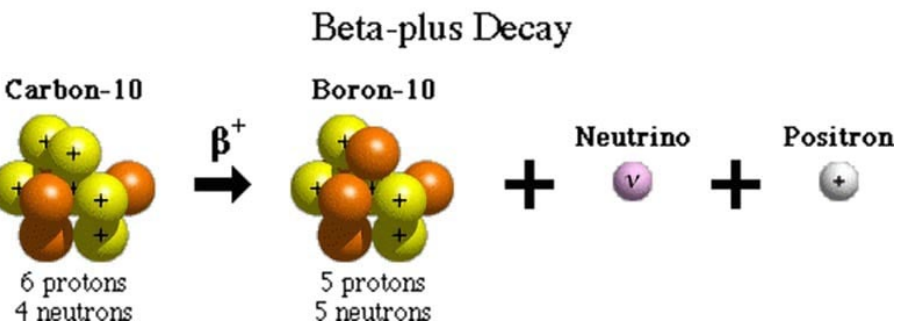
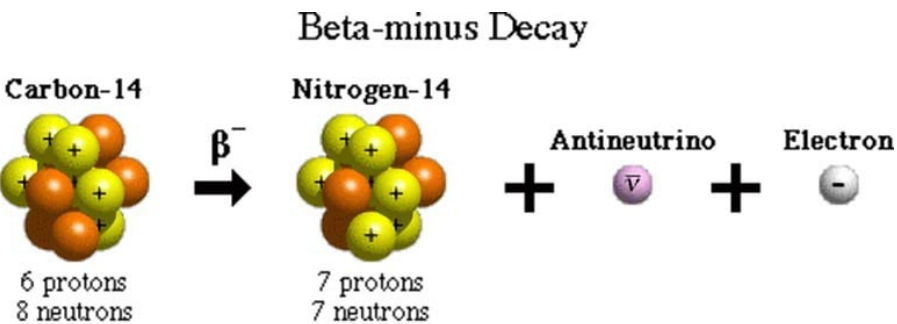
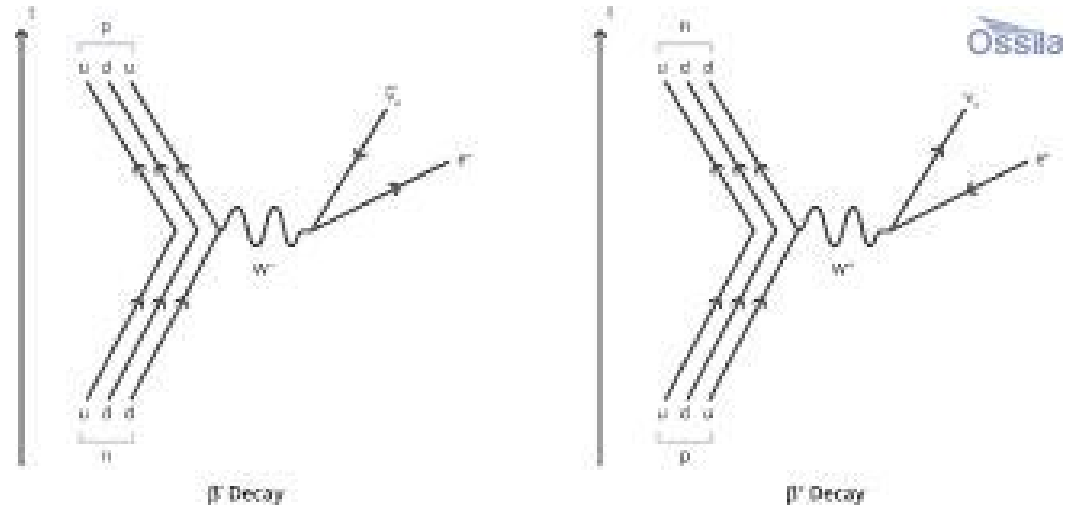


- Interés:** Uso de la detección de antineutrinos para aplicaciones de monitoreo de la no proliferación nuclear.
- el **flujo y el espectro de los antineutrinos** emitidos por un reactor **dependen de su potencia térmica y de la composición de su combustible nuclear**,
- midiendo los antineutrinos desde fuera del reactor, se podría verificar si un reactor está operando según lo declarado o si se ha desviado material fisible con fines no pacíficos.

Producción de geoneutrinos

La forma de desintegración de elementos radioactivos más común es el “**decaimiento beta**”. Un proceso motivado por el **desbalance de protones y neutrones** en un núcleo atómico.

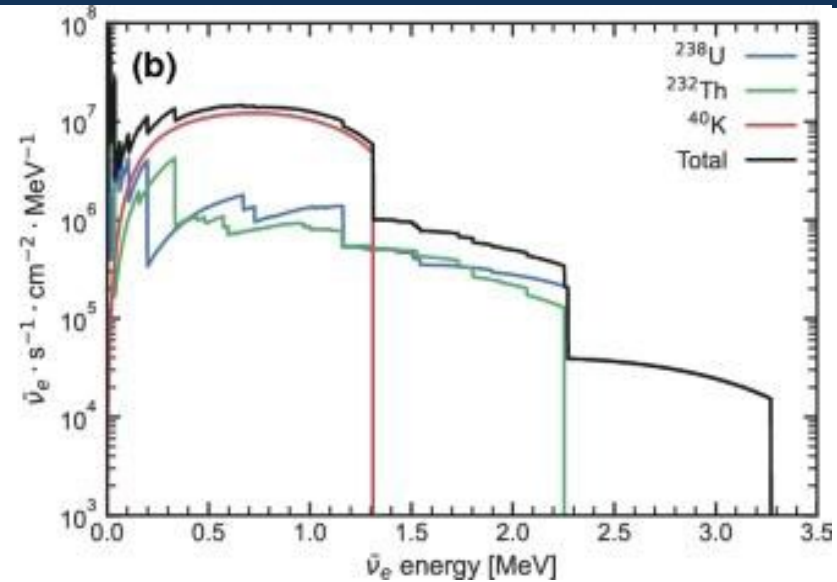
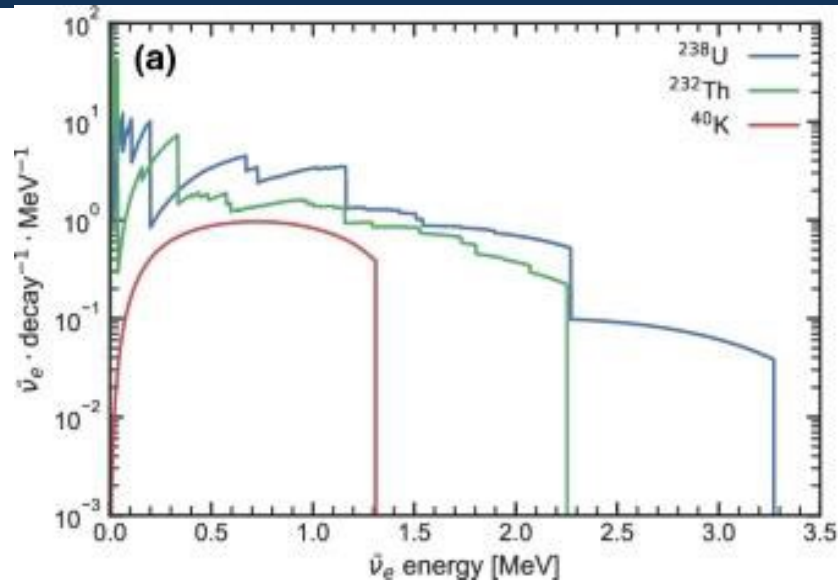
Tomando en cuenta el decaimiento beta menos. La partícula de exceso es el neutrón. Su composición de quarks es “**UDD**” (Un quark up y dos Down), mientras que para el protón es “**UUD**”. El cambio de quark down a up permite el cambio de partícula.



La interacción se da por la fuerza débil. La emisión de un **bosón W** (+ o - dependiendo del tipo de decaimiento) es propia de este tipo de fuerza. **Este bosón se desintegrará en un antineutrino electrónico y un electrón** (esto para Decaimiento Beta-), otro elemento también es producto del decaimiento, véase las figuras.

Existe Decaimiento beta + y -. Se definen por la partícula de exceso que presentan. Se diferencian por sus productos.

Isótopos radioactivos



Los isótopos radioactivos que esperamos estudiar son:

Uranio 238, Torio 232, Uranio 235 y Potasio 40.

La cadena de decaimiento del ^{238}U tiene 6 pasos de desintegración beta, y cada uno emite un antineutrino:

1. $^{234}\text{Th} \rightarrow ^{234m}\text{Pa} + e^- + \bar{\nu}_e$ (Energía máxima ~ 0.27 MeV)
2. $^{234m}\text{Pa} \rightarrow ^{234}\text{U} + e^- + \bar{\nu}_e$ (Energía máxima ~ 2.27 MeV)
3. $^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi} + e^- + \bar{\nu}_e$ (Energía máxima ~ 1.02 MeV)
4. $^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} + e^- + \bar{\nu}_e$ (Energía máxima ~ 3.27 MeV)
5. $^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi} + e^- + \bar{\nu}_e$ (Energía máxima ~ 0.06 MeV)
6. $^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po} + e^- + \bar{\nu}_e$ (Energía máxima ~ 1.16 MeV)

Estos elementos tienen series, es decir se desintegran en más de un momento

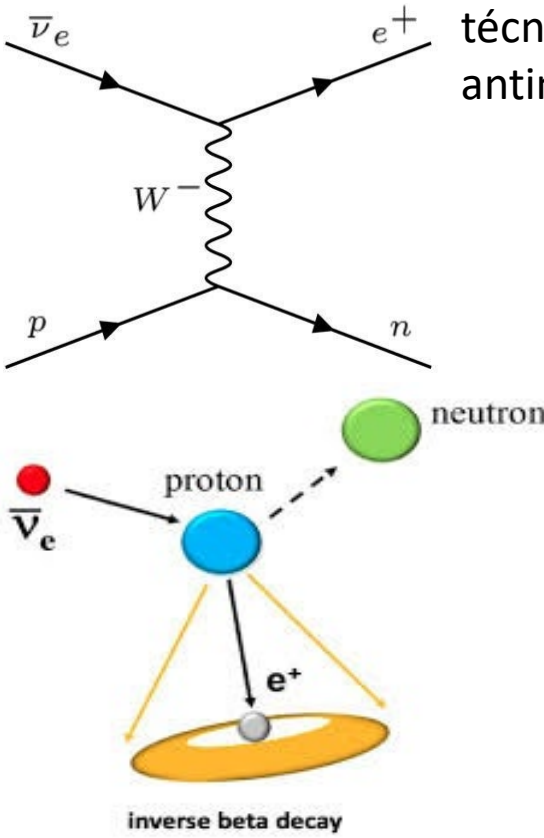
Inverse Beta Decay

El decaimiento beta inverso es la técnica más sensible a antineutrinos electrónicos.

Decaimiento Beta Inverso

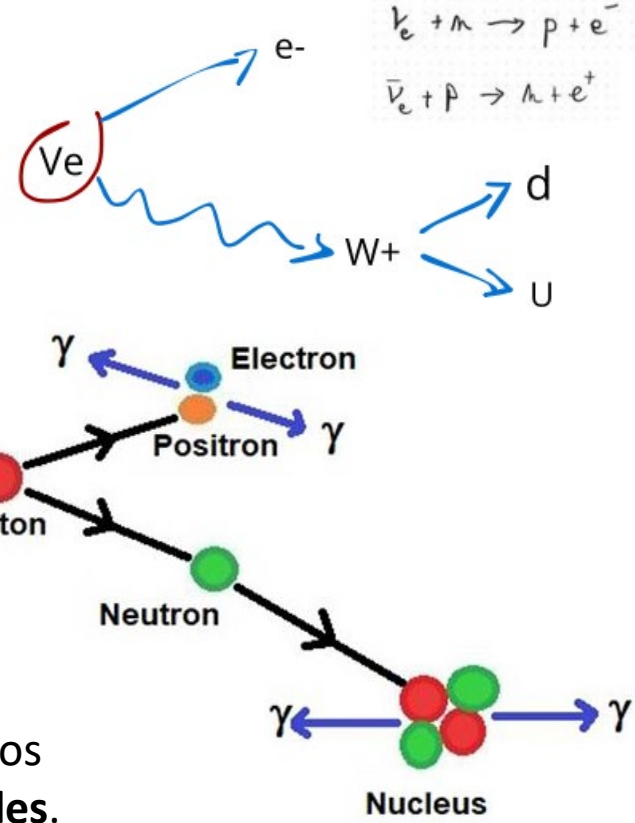
$$\bar{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$$

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$



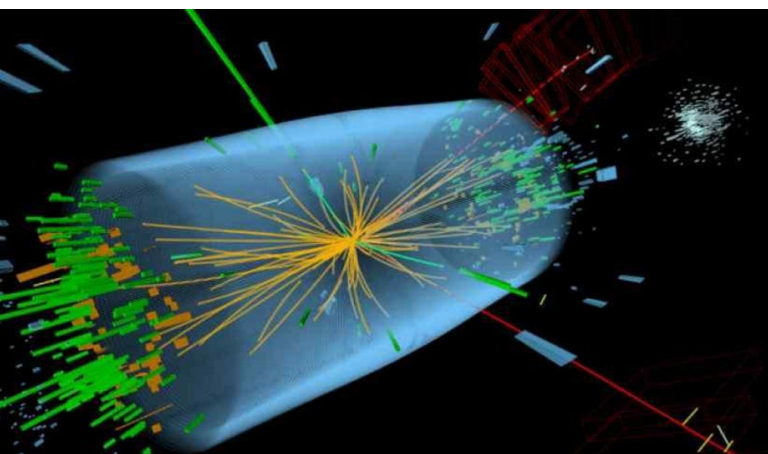
Como la interacción se da por fuerza débil, se debe intercambiar una **partícula de fuerza**, es decir, un **bosón W**.

Ocurre cuando un antineutrino electrónico choca con un protón y emite un **neutrón** y un **positrón**.

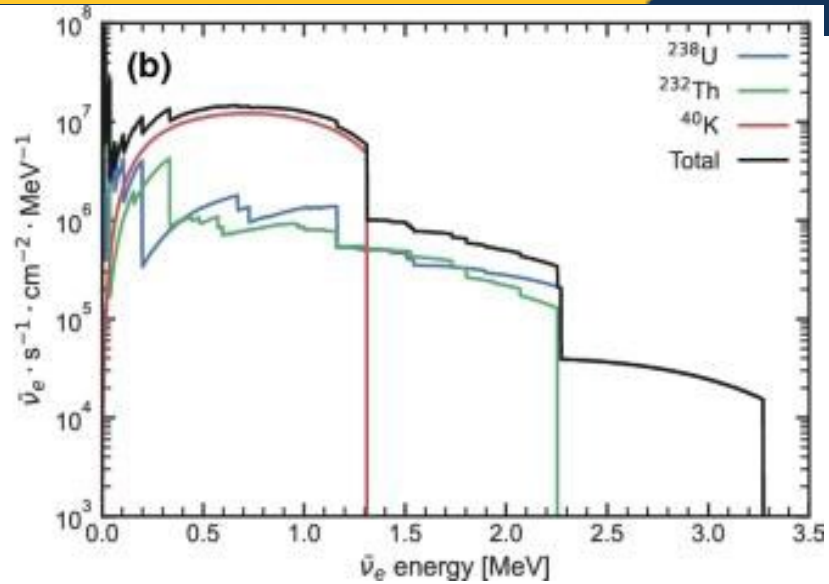
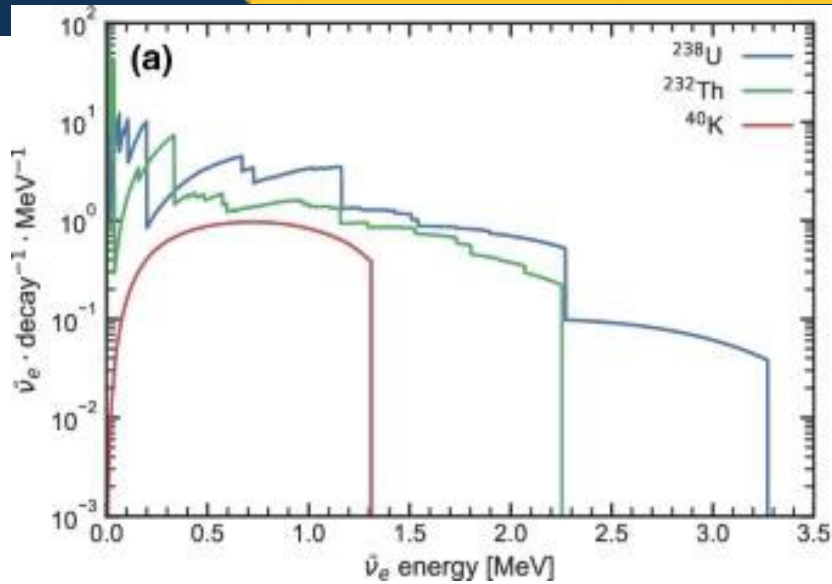


En el detector, los dos productos generan **dos señales detectables**.
Una señal rápida y una tardía:

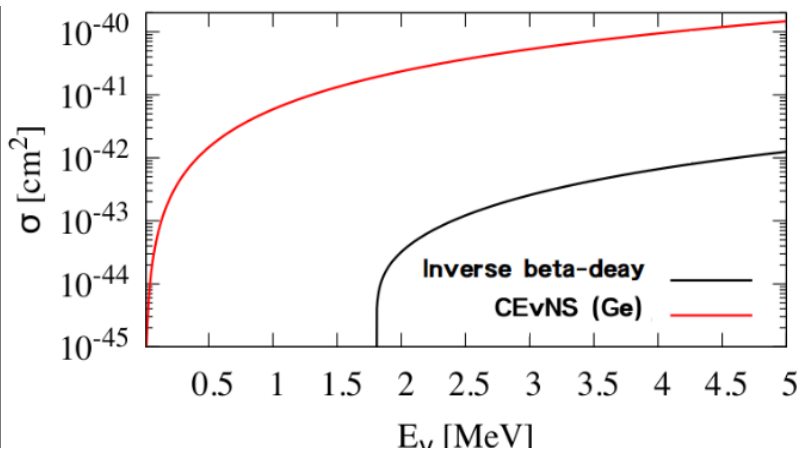
- El positrón se aniquila al llegar con un electrón (**Señal rápida**).
- El neutrón es capturado, tras microsegundos, por un núcleo de hidrógeno (**Señal tardía**).



Inverse Beta Decay

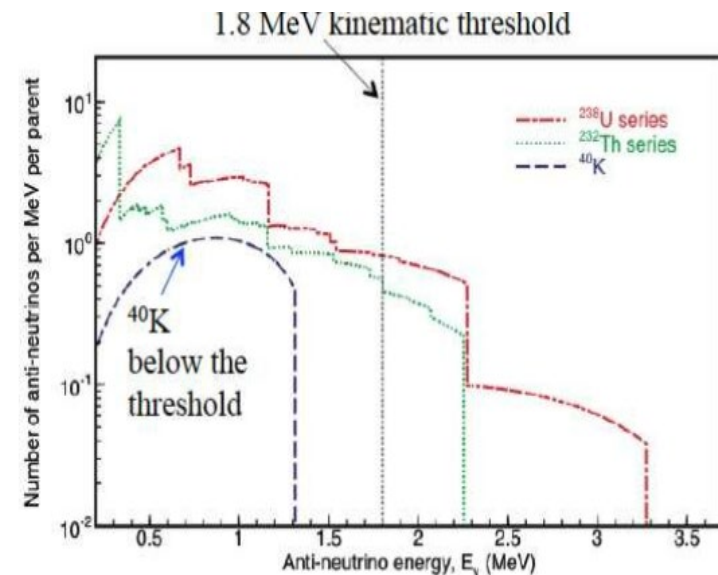
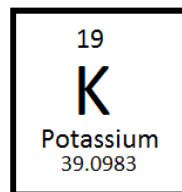


Para poder ser detectados por el método IBD, se requiere que el neutrino tenga un mínimo de energía de **1.806 MeV**.



Su sección eficaz es de **10^{-43}cm^2**

El **Potasio-40**
NO cumplen con
este mínimo.



Identificación de la fuente: U238

Mediante Inverse Beta Decay,
se es posible identificar antineutrinos
electrónicos del Uranio 238 y Torio 232.

"Ventana Exclusiva de Uranio":

Esta diferencia de energía máxima es la herramienta más poderosa que tienen los científicos.

Cualquier antineutrino que se detecte con una **energía entre 2.25 MeV y 3.27 MeV** tiene que ser, **obligatoriamente, de la cadena del Uranio-238.**

La cadena del Torio simplemente no tiene la energía para producirlo

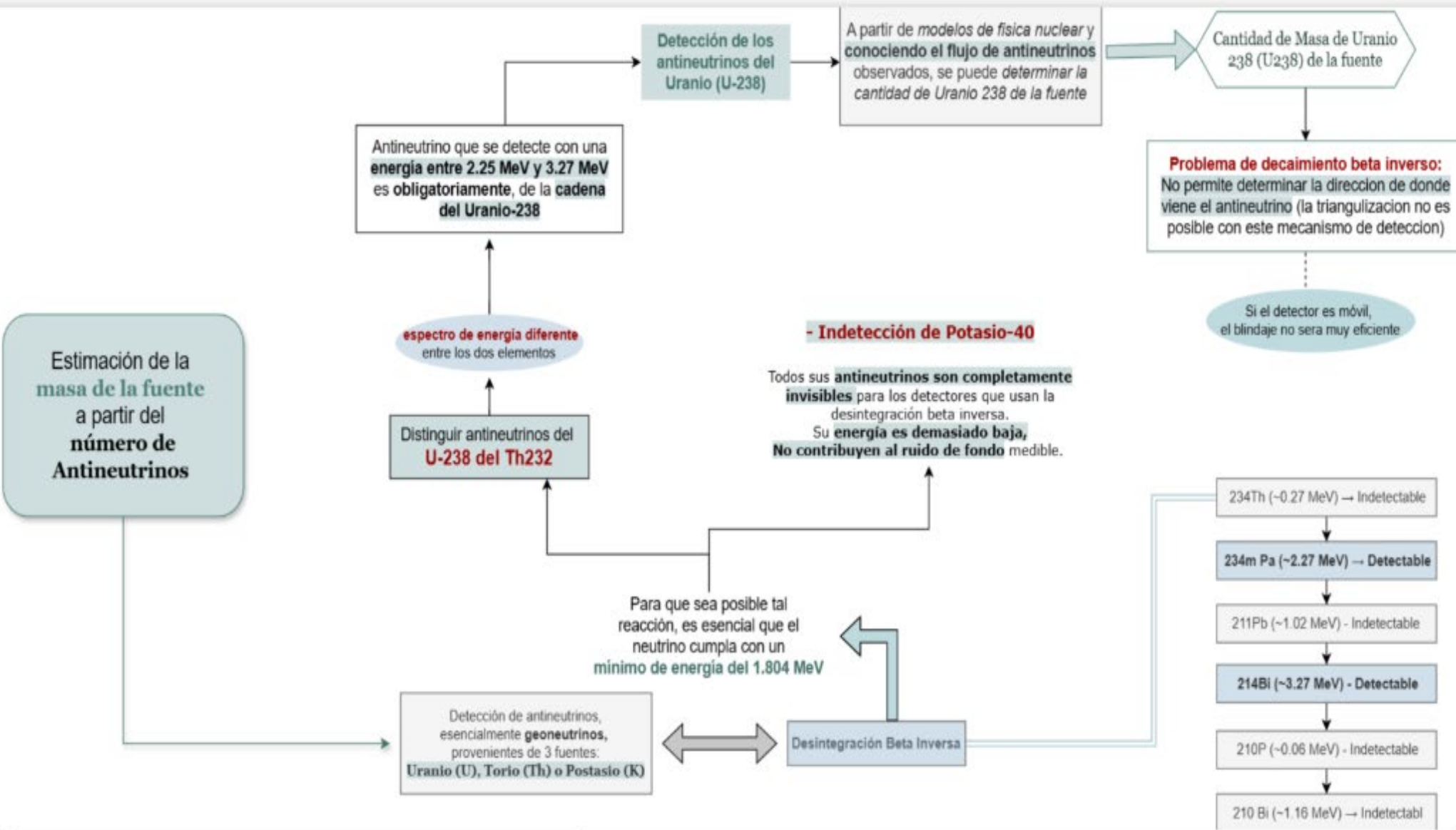
• Herramienta: Espectros de energía diferente entre los elementos:

Cada cadena de decaimiento tiene un límite de energía

- **Uranio-238:** Produce antineutrinos con una energía máxima de **~3.27 MeV**
- **Torio-232:** Su energía máxima de solo **~2.25 MeV.**
- **Potasio-40:** Energía Máxima: **~1.31 MeV**

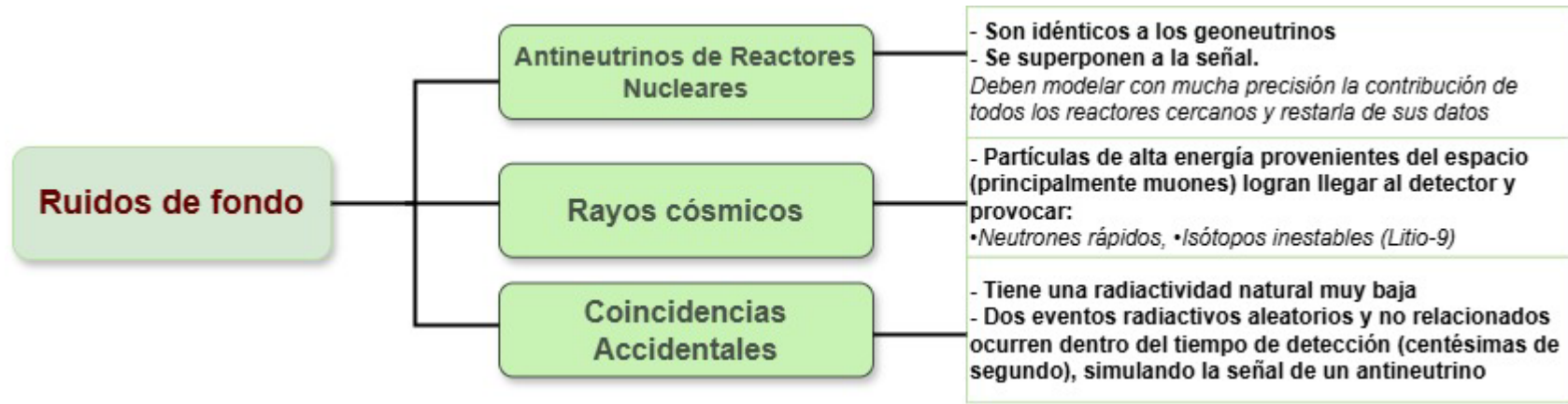
(Todos los antineutrinos del Potasio-40 son completamente invisibles para los detectores que usan la desintegración beta inversa por su energía demasiado baja, entonces no contribuyen al ruido de fondo medible)

Identificación de la fuente: U238



Ruido de fondo

La detección de señales puede dificultarse por partículas o eventos que **simulan o bloquean la señal esperada**. Esto es el ruido de fondo.



Es importante conocer nuestros alrededores en busca de **reactores que puedan contaminar nuestro detector con un flujo** de antineutrinos. **Reconocer la dirección, energía y número de antineutrinos de este flujo es importante para reconocerlo.**

El método IBD es fácil de diferenciar por su doble señal, pero CEvNS y Dispersión Elástica deben tener en cuenta la **actividad térmica** (Vibraciones de partículas) pues bloquean la pequeña señal que se produce. Por esto, se utilizan **criostato** en detectores dedicados a estos métodos.

Los muones tienen la posibilidad de atravesar la roca y llegar al detector. Un veto de muones podrá **detectar la llegada de esta partícula, alertará al sistema e ignorará toda señal que le siga.**

Mitigación de ruido de fondo

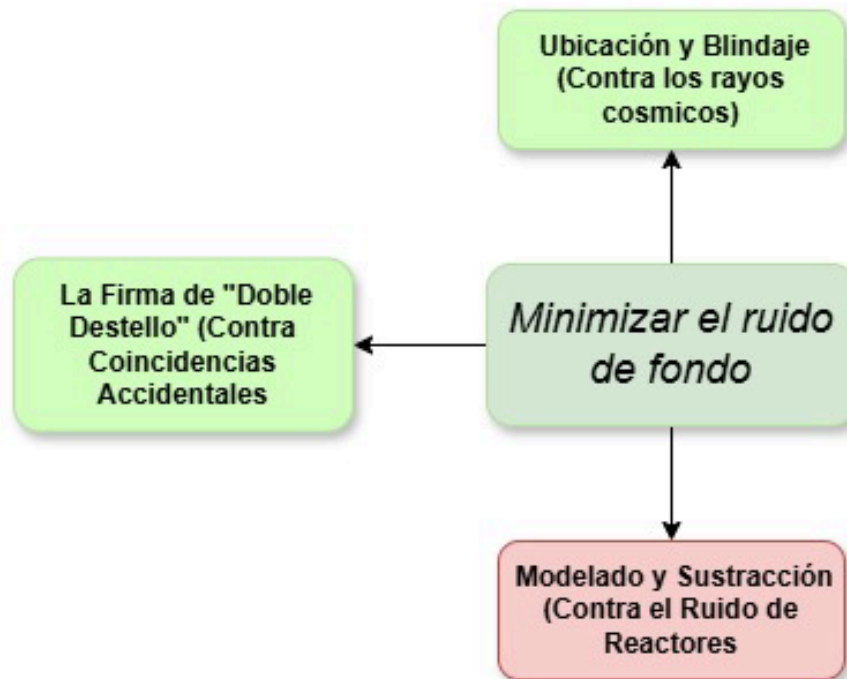
- **Profundidad Extrema:** lo ideal es tener detector en lugar bajo tierra
- **Veto de Muones:** Los detectores tienen una capa externa (un "veto") que detecta los pocos muones que logran atravesar la roca.

Destello Rápido (PromptSignal):

El positrón (e^+) se aniquila casi inmediatamente con un electrón del material,

Destello Tardío (Delayed Signal):

El neutrón (n) es capturado por un núcleo de hidrógeno, emitiendo segundo destello (~ 2.2 MeV).



- **Registro detallado** de la potencia y ubicación de todas las centrales nucleares del mundo.
- **Cálculo** de cuántos antineutrinos de los reactores deberían llegar al detector y con qué espectro de energía.
- **Restan estadísticamente** este "ruido de fondo de reactores" de la señal total)

Dispersión Elástica

Cuando un neutrino choca con un electrón, es capaz de **hacerlo retroceder** en dirección a la trayectoria del neutrino.

Su detección es complicada, la energía con la que retrocede el electrón es baja. Por ejemplo, un neutrino de **1MeV** hace retroceder al electrón con energía de **0.797MeV**.

Esta interacción **no requiere de un mínimo de energía para llevarse a cabo**, pero no se es capaz de detectar energías infinitamente bajas. Por ejemplo, Borexino ha sido capaz de detectar energías de hasta **200KeV**.

“Elástico” se refiere a que en una interacción las partículas que interactúan **no sufren cambios**.

Su sección eficaz es de **10^{-44}cm^2** .

La interacción se da por **fuerza débil**, por lo que un bosón se emite. En este caso, un bosón Z. Como el **bosón Z es neutro**, todo tipo de neutrino puede accionar esta reacción.

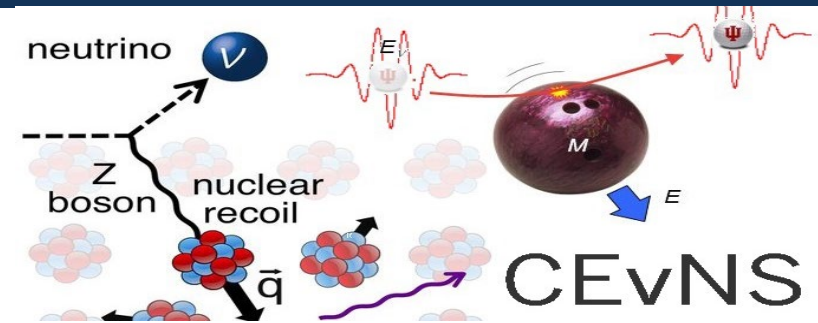
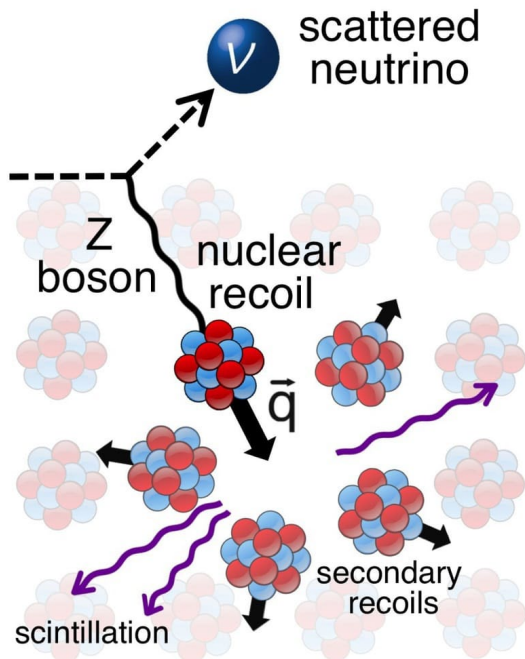


Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering

“**Coherente**” se refiere a que el neutrino interactúa con el núcleo como un todo

Imagínesse al neutrino como un grano de arena y al núcleo como una bola de boliche.

La coherencia se mantiene hasta energías de **50MeV**.



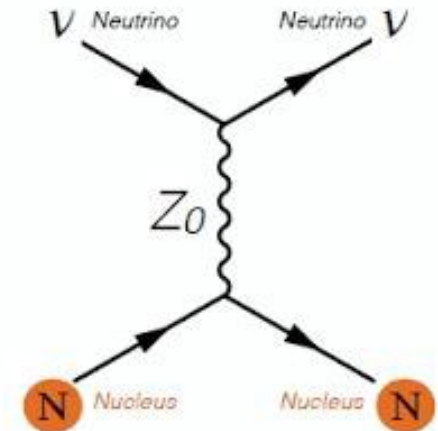
Esta interacción se asimila a la anterior. El neutrino **choca con un núcleo atómico** e igualmente lo hace retroceder en dirección de la trayectoria del neutrino, pero con **muy poca energía**.

Un neutrino de **30MeV**, con un **blanco de Germanio**, le energía de rebote sería de aproximadamente **25KeV**.

Como su energía es tan baja, su detección es complicada.

La interacción se da por **fuerza débil**, por lo que un bosón se emite. En este caso, un bosón Z . Como el **bosón Z es neutro**, todo tipo de neutrino puede accionar esta reacción.

Su sección eficaz es de **10-39cm²**.



Direccionalidad de los neutrinos

Localizar la fuente de los antineutrinos:

el detector tiene que ser capaz de determinar la dirección de dónde vienen los antineutrinos detectados.

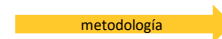


La posibilidad de determinar la dirección de los antineutrinos depende mucho de cómo se detecta.

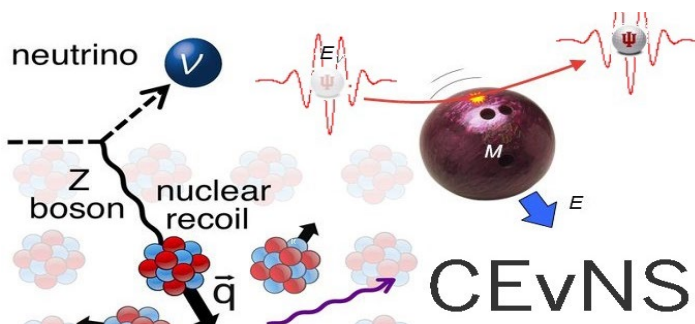
En una detección basada en IBD, la señal:

- Es isotrópica
- Tiene una pequeña anisotropía
- Individualmente no se puede distinguir del ruido térmico.

La única manera para determinar la dirección de los antineutrinos es eliminando este ruido isotrópico de la señal mediante la observación de muchos eventos.



Direccionalidad estadística
(se usó en el experimento PROSPECTS.)

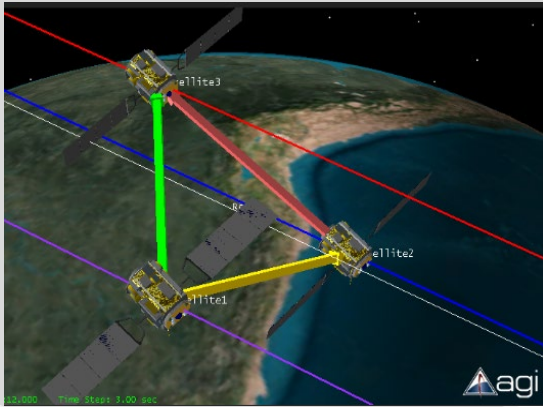


En el caso de **ES** o **CEvNs**

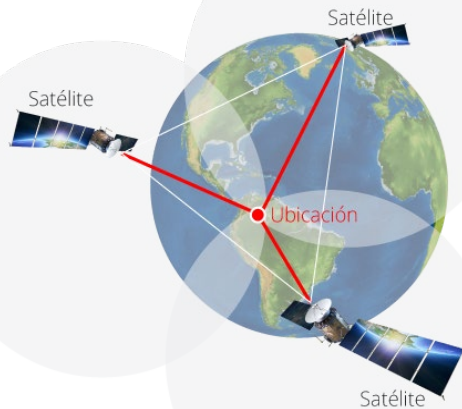
Existe mayor facilidad para determinar la dirección de los antineutrinos. Aplicando la **conservación de la energía y momento de las partículas** involucradas en la interacción; lo cual **permite determinar la dirección del antineutrino con una gran precisión.**

Localización de la fuente de neutrinos

1. Triangulación (satélites GPS)



Triangulación



2. Alternativa usando oscilaciones de neutrino:

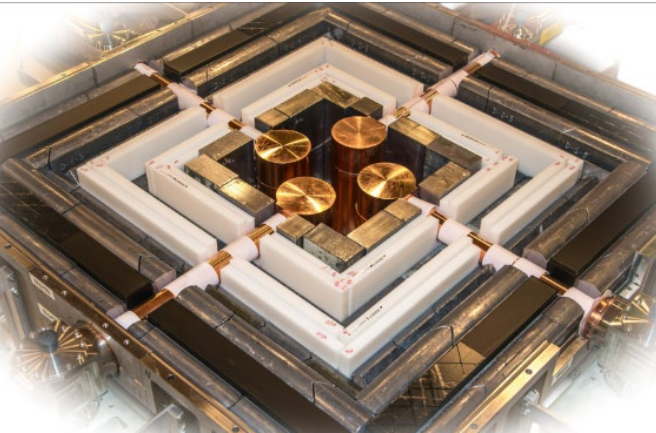
- **Detector dual:** detector IBD y ES (o CEvNS): uno para **detectar el flujo de neutrinos electronicos** y otro por **determinar el flujo total de antineutrinos emitidos por la fuente.**

fórmula de oscilaciones

$$P(\nu_l \rightarrow \nu_k) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu}\right)$$

- *Con esos datos, se podrá **determinar la cantidad de antineutrinos electronicos que se transformaron en otros sabores (que oscilaron)** y usando *la fórmula de oscilaciones* de neutrinos, se podrá **determinar la distancia a la cual se encuentra la fuente.***

CONUS



Coherent scattering of neutrinos on atomic nuclei

Propósito:

Este detector es el análisis e investigación del método CEvNS (Coherent Elastic neutrino-nucleus Scattering).

Propiedades

- **Acero inoxidable;** salvaguardar la integridad del detector

objetivo de reducir el ruido de fondo:

- **Capas de plomo:** reducen el impacto de radiación gamma externa
- **Poliestireno y Poliestireno:** estimulado con Boro moderaran la captura de neutrones emitidos por el reactor.
- **Placas de plástico centellante equipado con foto-multiplicadores:** eliminan el ruido de fondo producido por muones cósmicos
- **Refrigeradores:** para eliminar las vibraciones provocadas por la actividad térmica .

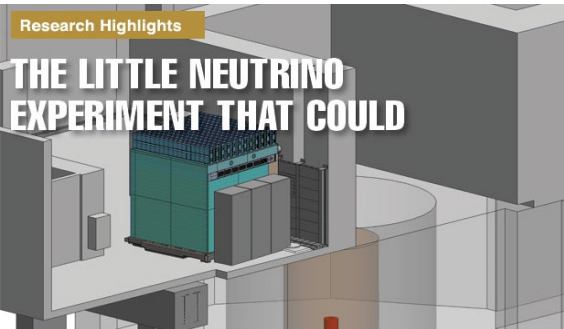


Características

- La reacción requiere de materiales sensibles y una fuente potente de neutrinos.
- El experimento está a solo 21 metros de la fuente del flujo de antineutrinos (reactor nuclear emite un flujo de 14 trillones de neutrinos hacia el experimento).
- Detectores de Germanio ultrapuro son usados para recibir la señal.

Los núcleos atómicos cargados de electrones del Germanio permiten captar la reacción y aumentan la probabilidad de que suceda (la pureza del material evita cualquier coincidencia accidental que pueda ocurrir).

PROSPECTS



- El **método IBD**, no es sencillo, es un medio para definir la **dirección de un flujo definido de neutrinos mediante la graficación, experimentación y observación**. Tras 96 días reactor-on se **obtuvieron aproximadamente 48000 eventos de IBD** lo que permitió llegar a unas coordenadas polares precisas (Precisión del orden del 10%).

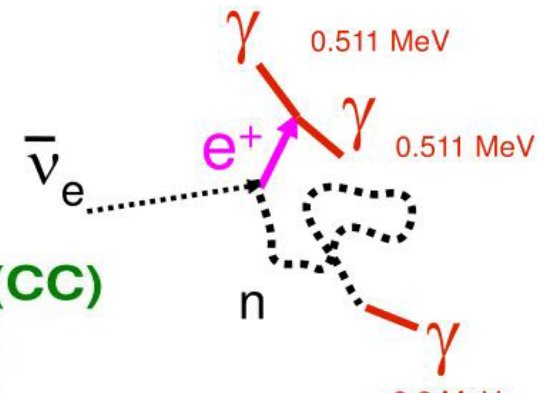
- El **método IBD** es más sencillo de detectar con una sección eficaz probable, pero **la forma en que se concluye la dirección es tardía, complicada y teórica**, por lo que, aunque es viable **no es el mejor método en función de la direccionalidad**.

- Ubicado en el **reactor HFIR**, **Prospect** ha *utilizado los neutrinos como un medio para el monitoreo de reactores nucleares*. Este detector se centra en reacciones IBD.

Propiedades

- Compuesto por 154 celdas segmentadas (**14.5cm×14.5cm×117.6cm**)
- Organizado en una matriz de 14 filas y 11 columnas, cada celda equipada con 2 foto multiplicadores que reciben la señal de interacción IBD.
- Se usa centellador líquido, para captar la señal, dopado con litio-6 para la detección eficiente del neutrón producido por la interacción.

Inverse Beta Decay (CC)



Conclusión

Objetivo: Estudio de la posibilidad de usar detectores de neutrinos para localizar fuentes radioactivas presente en el suelo.

Hipótesis: supondremos que la principal fuente de radioactividad natural de nuestra fuente es el Uranio-238

Resultados:

- Se reviso la estrategia para distinguir los antineutrinos producidos por la cadena de decaimiento del Uranio-238 de las otros fuentes de antineutrinos.
- Se reviso los principales experimentos dedicadas al monitoreo de reactores nucleares como PROSPECT y CONUS.
- Se propone de usar un detector de antineutrinos que llamamos **DUAL** y que combina la detección vía decaimiento beta inverso y la detección de corriente neutral como dispersión elástica o dispersión elástica coherente de los neutrinos sobre Núcleos y usar la propiedad de oscilaciones de los neutrinos para localizar la fuente.