

## Aplicación de los neutrinos para la detección de isótopos radioactivos naturales

### *Application of neutrinos for the detection of natural radioactive isotopes*

David Yves G. Delepine<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato  
[delepine@ugto.mx](mailto:delepine@ugto.mx)

Luis Ernesto Guerrero Garcia<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Universidad de Guanajuato  
[le.guerrero Garcia@ugto.mx](mailto:le.guerrero Garcia@ugto.mx)

Barbara Daniela Hernandez Lopez<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Universidad de Guanajuato  
[bd.hernandezlopez@ugto.mx](mailto:bd.hernandezlopez@ugto.mx)

## Resumen

En este trabajo se estudió la posibilidad de usar detectores de neutrinos para localizar fuentes radioactivas presente en el suelo. Se supone que la principal fuente de radioactividad natural es la radioactividad generada por el Uranio-238 y sus derivados. Se presentará los requisitos que tiene que cumplir esos detectores para poder servir a este propósito y los métodos para seleccionar los antineutrinos producidos por el ciclo del Uranio-238 y como el fenómeno de oscilaciones de los neutrinos puede usarse para determinar la distancia de la fuente. Para eso, se revisará las principales propiedades de los neutrinos y su aplicación en su detección. También se revisará los avances tecnológicos en los últimos experimentos como PROSPECTS o CONUS en detección de los neutrinos y sus aplicaciones tecnológicas

**Palabras clave:** neutrino; detección.

## Introducción

Los neutrinos son partículas que fueron postuladas en los años treinta por el físico Wolfgang Pauli para explicar la aparente pérdida de energía y de momento en el decaimiento  $\beta$ -(Fermi (1934), W. Pauli (1978)). Fue necesario esperar hasta los años cincuenta para su detección (Cowan,1956). El conocimiento de la física de los neutrinos ha avanzado mucho en los últimos 27 años desde el descubrimiento del fenómeno de oscilaciones de los neutrinos en 1998 gracias a los resultados experimentales de SUPERKAMIOKANDE (Fukuda, 1998). De un tema de ciencias básicas (ver Vissani,2006 y referencias incluidas para una reseña de la física de los neutrinos), hoy en día se está trabajando en cómo usar las propiedades únicas de los neutrinos y antineutrinos con fines tecnológicos y no solamente para el estudio dentro de la física fundamental. Existe varios proyectos a nivel internacional en desarrollar detectores de antineutrinos que podrían ayudar a monitorear los reactores nucleares (Lasserre,2010), a detectar los geoneutrinos (Bellini, 2022) (antineutrinos producidos por las componentes radioactivas de la tierra) y a dar nuevos métodos de verificación en los acuerdos de no proliferación de armas atómicas (Bernstein,2020). Los neutrinos tienen una ventaja muy importante comparados a los fotones. Su interacción es muy débil y por lo tanto pueden cruzar varias veces la tierra antes de ser detectado. Eso es al mismo tiempo su ventaja y su principal debilidad visto que eso significa que son difícil de detectar. Pero los avances tecnológicos apuntan que en un tiempo mas corto de lo que podemos esperar, será posible de usar los neutrinos como el nuevo mensajero del próximo siglo, jugando un papel de igual importancia que hoy juega el fotón, el mensajero de las interacciones electromagnéticas, omnipresente en los productos de alta tecnología. En este trabajo se estudiará los requisitos que tienen que cumplir los detectores de neutrinos y antineutrinos para localizar fuentes radioactivas presente en el suelo. Para eso, supondremos que la principal fuente de radioactividad natural es la radioactividad generada por el Uranio-238 y sus derivados. En una primera

sección, se mencionará las principales características de los neutrinos incluyendo su interacción responsable para su detección. En la segunda sección, se evaluará los retos en la detección de los neutrinos tomando en cuenta que no solamente necesitamos detectarlos, pero necesitamos seleccionar los eventos que corresponde a nuestra búsqueda y de donde vienen esos neutrinos o antineutrinos para poder localizar su fuente y cómo podríamos combinar los métodos de detección y la oscilación de los neutrinos para ubicar la fuente de los neutrinos o antineutrinos.

En la ultima sección, se revisará los avances realizados en unos proyectos experimentales como PROSPECTS y CONUS que nos demuestran que estamos cerca de poder contar con detectores de neutrinos mucho mas compactos que antes y que apuntan a un uso de los neutrinos y antineutrinos con fines de aplicación tecnológica como el monitoreo de los reactores nucleares, detección de geoneutrinos, etc.

## Naturaleza de los neutrinos

Qué son los neutrinos

Pues estás pequeñas partículas, sin carga eléctrica, con una masa tan diminuta que ni siquiera ha podido ser calculada y con propiedades que han desafiado al modelo estándar son los NEUTRINOS.

Los neutrinos son partículas que tienen una serie de propiedades resumidas en la tabla 1, que los vuelve únicos e interesantes de estudiar (Navas,2024).

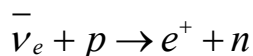
<b>Carga eléctrica</b>	<b>No poseen carga eléctrica.</b> -- Su absoluta neutralidad eléctrica es la que les da su nombre; Su "neutralidad" implica que no participan en la interacción electromagnética.
<b>Masa</b>	<b>Masa inferior a 0,8 electronvoltios o <math>1,6 \times 10^{-36}</math> kg</b> -- Poseen 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, sin embargo. se ha establecido que sus masas son más de un millón de veces inferiores a la masa del electrón.
<b>Espín</b>	<b>Tienen un espín de <math>\frac{1}{2}</math> (espín semi-entero)</b> , por lo tanto, son fermiones, lo que significa que obedecen la estadística de Fermi-Dirac (Goldhaber,1958)
<b>Fuerza de interacción</b>	<b>La Interacción Nuclear Débil</b> es su principal canal de comunicación, lo que significa que: --- interactúan con otras partículas de materia de forma extremadamente tenue. <i>Aunque también están sujetos a la interacción gravitatoria debido a que poseen masa, la fuerza de la gravedad es tan increíblemente débil que, en la práctica, es despreciable en la mayoría de los contextos experimentales de la física de los neutrinos</i>
<b>Características significativas</b>	Existen <b>Tres Tipos/Sabores de neutrinos conocidos</b> :

	<p><b>Neutrino Electrónico (<math>\nu_e</math>), Muónico (<math>\nu_\mu</math>) y Tauónico (<math>\nu_\tau</math>) que pueden oscilar entre ellos.</b></p> <p>Cada uno de estos sabores de neutrino está intrínsecamente asociado con un leptón cargado correspondiente: el <math>\nu_e</math> está emparejado con el electrón (<math>e^-</math>), el <math>\nu_\mu</math> con el muon (<math>\mu^-</math>), y el <math>\nu_\tau</math> con la partícula tau (<math>\tau^-</math>)</p>
--	--

Tabla 1. Propiedades de los neutrinos

### Sus interacciones y probabilidades de interacción

Los neutrinos interactúan con otras partículas a través de la fuerza débil. Las fuerzas gravitacionales y electromagnéticas no influyen al neutrino debido a su masa pequeña y su carga neutra. Debido a estas características del neutrino hacen que sus interacciones sean improbables, contando con una sección eficaz baja. En física nuclear, la sección eficaz es la probabilidad que tienen dos partículas y blancos para causar una reacción. Esta se mide en Barns ( $1 \text{ Barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ), en sí representa un área efectiva del blanco, es decir, el área que describe la probabilidad que ocurra la reacción. Para los neutrinos (específicamente antineutrinos electrónicos. Geoneutrinos), una de las reacciones más comunes es el decaimiento beta inverso (IBD por su sigla en inglés: Inverse Beta Decay) que solo cuenta con  $10^{-43} \text{ cm}^2$ :



Existen dos formas en la que los neutrinos interactúan: de corriente cargada: de corriente cargada (CC) y de corriente neutra (NC). Antes de adentrarnos en estos conceptos, debemos entender lo que es la fuerza débil, su proceso, y específicamente las partículas conocidas como Bosones  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ . Esos bosones son 100 veces más pesados que un protón, se diferencian porque los Bosones W tienen una carga positiva o negativa, mientras que los Bosones Z son neutros. Por eso, las interacciones generadas por un intercambio de bosón W se llamarán corriente cargada (CC) y las interacciones mediadas por el  $Z^0$ , se llamarán corriente neutral (NC) (ver figura 1 y 2)

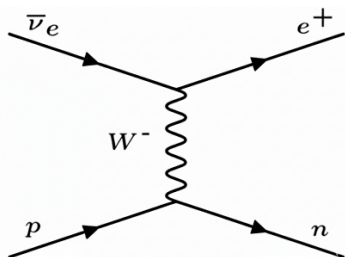


Figura 1: interacción mediada por el bosón W (CC)

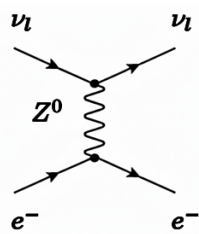


Figura 2: interacción mediada por el bosón Z⁰

La interacción CC es muy importante, es la responsable de la IBD. En la interacción CC y en la IBD, un neutrino (antineutrino) electrónico siempre estará produciendo un electrón (positrón). Un neutrino muónico será asociado a la producción de un muon y un neutrino tau será asociado a la producción de un leptón cargado tau. Las reacciones de decaimiento beta que corresponde al decaimiento de un neutrón en un protón, electrón y antineutrino electrónico pueden producirse de manera natural debido al hecho que el neutrón es ligeramente más masivo que el protón. Pero para la IBD, la ley de conservación de la energía-momento nos obliga a que el neutrino o antineutrinos debe tener una energía mínima superior a 1.8 MeV que es la diferencia de masa entre neutrón y protón. La existencia de esta energía de umbral para la IBD será muy importante para la selección de los eventos que nos interesan.

Una diferencia muy importante entre la detección de los antineutrinos por CC o NC es que por CC, se puede detectar solamente antineutrino electrónico. Los antineutrinos generados por decaimiento beta tienen energía máxima en el mejor caso de unos 10 MeV, lo que nos es suficiente para producir un leptón cargado muónico o leptónico. Al contrario, la interacción NC es igual para todos los sabores de antineutrinos. Usaremos esta propiedad en la próxima sección para poder determinar el flujo total de los antineutrinos emitidos por una fuente radioactiva.

### Fuentes naturales y no naturales de los neutrinos y antineutrinos

Desde el núcleo del Sol hasta los reactores nucleares, los neutrinos y antineutrinos se generan en entornos muy distintos y saber su origen de producción nos permite rastrear fenómenos astrofísicos, geofísicos humanos. Estas fuentes se agrupan comúnmente en dos categorías: naturales y no naturales (o artificiales) (Vissani,2006):

Fuentes	Tipo de Neutrino	Rango de energía	Categoría
<b>Sol solares)</b> (neutrinos)	Neutrinos electrónicos	~0.1 – 20 MeV	Natural
<b>Geoneutrinos</b>	Neutrinos electrónicos	~1 – 3 MeV	Natural
<b>Supernovas</b>	Neutrinos de todos los sabores	~5 – 50 MeV (pico en ~10 MeV)	Natural
<b>Rayos cósmicos (atmósfera)</b>	Neutrinos muónicos y electrónicos	~100 MeV – varios TeV	Natural
<b>Reactores nucleares</b>	Antineutrinos electrónicos	~1 – 10 MeV (pico en ~2-4 MeV)	No natural / Artificial
<b>Aceleradores de partículas</b>	Neutrinos muónicos (principalmente)	~MeV – decenas de GeV	No natural / Artificial
<b>Big Bang (neutrinos relictos)</b>	Neutrinos de todos los sabores	~10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-3</sup> eV	Natural

Tabla 2. Fuentes naturales y no naturales de los neutrinos

Excepto de los rayos cósmicos y de los aceleradores de partículas, los neutrinos o antineutrinos producidos son vía el decaimiento beta más o beta menos (ver figura 3):

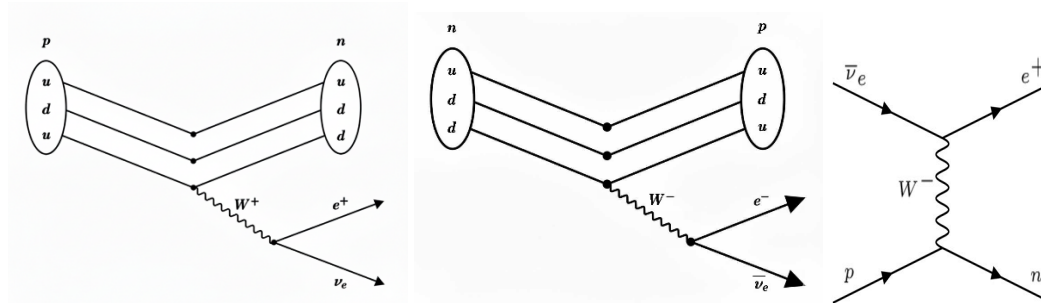


figura 3: decaimiento beta más, beta menos y decaimiento beta inverso respectivamente.

## La oscilación de neutrinos

Como mencionábamos, existen tres tipos o sabores de neutrinos: electrónico, muónico y tauónico. Eso corresponde a la manera de producir los neutrinos vía la interacción cargada. Pero esos estados de sabores mencionados no son los estados que se propagan. Los estados que se propagan son los estados que tienen una masa muy bien definida. El hecho que los tres tipos de neutrinos con masas bien definidas tienen masa ligeramente diferente, permite el fenómeno de oscilaciones entre sabores en función de la distancia recorrida por el neutrino.

Al crearse un neutrino, este no cuenta con una masa definida, es una combinación de tres estados de masa distintos ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ). **Las pequeñas diferencias de masas entre ellos son suficientes para que los componentes  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  se desfasen.** Al momento de la detección, lo que se detectan son los estados de sabores en el caso del IBD. Por lo tanto, se genera una probabilidad de cambiar el sabor en función de la distancia. Típicamente, la probabilidad para el cambio de sabor es dado por esta fórmula:

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

Donde  $\nu_l$  y  $\nu_k$  son dos neutrinos de sabor l y k respectivamente.  $\theta$  es el Angulo de mezcla que describe la diferencia entre estados de sabores y estados de masa. L es la distancia recorrida por el neutrino,  $E_\nu$  es la energía del neutrino y  $\Delta m^2$  es la diferencia de las masas al cuadrado de los estados de masa que componen a los neutrinos de sabor. Los parámetros que describen la mezcla de sabores y las diferencias de masas al cuadrado son bien conocidos hoy en día y siguen siendo estudiando para determinarlos con más precisión en experimentos internacionales como HyperKamiokande (Terranova, 2024) o DUNE por ejemplo (Goodman, 2015).

## Retos de la detección de los neutrinos

### Formas para detección de los neutrinos:

Existen tres principales formas con las que se puede detectar un neutrino: el decaimiento beta inverso, Dispersión Elástica y rebote coherente.

--- El decaimiento beta inverso es la técnica más sensible a antineutrinos electrónicos. El choque de un antineutrino con un protón emite a un positrón y un neutrón. Básicamente, gracias al antineutrino electrónico, el protón cambia un quark up a down (Los quarks componen la estructura de partículas conocidas como hadrones), la estructura del protón (uud) se convierte a la de un neutrón (udd). Esta reacción se da por la fuerza débil, por lo que durante el proceso se emite un bosón W- (partícula de fuerza) que se decae en un positrón. El producto de la reacción (Positrón y neutrón) da lugar a dos señales detectables: el positrón interactúa con el ambiente y se aniquila al encontrarse con un electrón, el neutrón es capturado por un núcleo del medio del detector (Esto sucede microsegundos después de la primera señal, por lo que se conoce como "Señal tardía"). La señal tardía genera un pulso de rayos gamma de unos 2-8 MeV. Para que este proceso se lleve a cabo es necesario que el antineutrino cuente con una energía mínima de 1.806 MeV. Su sección eficaz es de aproximadamente  $10^{-43} \text{cm}^2$ .

--- La Dispersión Elástica sucede cuando un antineutrino choca con un electrón y lo desplaza en dirección de la trayectoria del antineutrino sin cambiar el tipo de partícula. Por ejemplo, un neutrino con 1 MeV de energía hace retroceder al electrón con aproximadamente 0.8 MeV de energía. En este caso, no existe un umbral de energía mínimo para dar acción a la interacción, varios experimentos han sido capaces de detectar reacciones de hasta 200 KeV (por ejemplo, Borexino). Esta forma de detección es viable para definir la dirección del antineutrino y además todos los sabores de los neutrinos se pueden detectar con la misma sección eficaz. Por eso, la dispersión elástica nos permite medir el flujo total de los neutrinos o antineutrinos producidos por la fuente, a la diferencia de la IBD que permite medir solamente los neutrinos o antineutrinos electrónicos. El inconveniente de la ES es que su sección eficaz es un orden de magnitud más pequeña que la sección eficaz de la IBD.

--- El CEvNS (En inglés: Coherent Elastic neutrino-nucleus Scattering) se asimila a la forma de interacción anterior. El neutrino choca con un núcleo atómico, intercambiando un bosón Z. neutro y lo hace retroceder

en función de la energía de la partícula sin cambiar al núcleo ni sus nucleones; manteniendo la coherencia (Coherente significa que el neutrino choca con el núcleo como un todo). La detección de esta interacción es complicada, imagínese al neutrino como un grano de arena y al núcleo como una bola de boliche, la energía de retroceso es muy pequeña. Por ejemplo, para un neutrino de 30MeV, con un blanco de Germanio, el máximo de energía de rebote que le corresponde es de aproximadamente 25KeV. Esta interacción fue predicha en 1974 (Freedman,1974) pero tuvimos que esperar hasta 2017 para su primera observación en el experimento COHERENT (Akmedov,2017). Su sección eficaz es mucho mayor que IBD y ES por su coherencia. Cuenta con la mayor sección eficaz en comparación con los métodos mencionados, siendo del orden de  $10^{-39}\text{cm}^2$ .

### Huellas de los neutrinos: como identificar los antineutrinos producidos por el Uranio-238

Aunque no podemos ver ni sentir los neutrinos, los antineutrinos emitidos por elementos radiactivos como el Uranio-238 atraviesan constantemente nuestro planeta. Pero *¿cómo se puede saber que vienen específicamente de este elemento?* La clave está en sus huellas, es decir, el espectro en energía de los antineutrinos producidos vía decaimiento beta. Este espectro depende del átomo responsable del decaimiento beta. En este sentido, el espectro en energía de los antineutrinos producidos por una fuente radioactiva se puede considerar como la huella del átomo que se desintegra vía decaimiento beta.

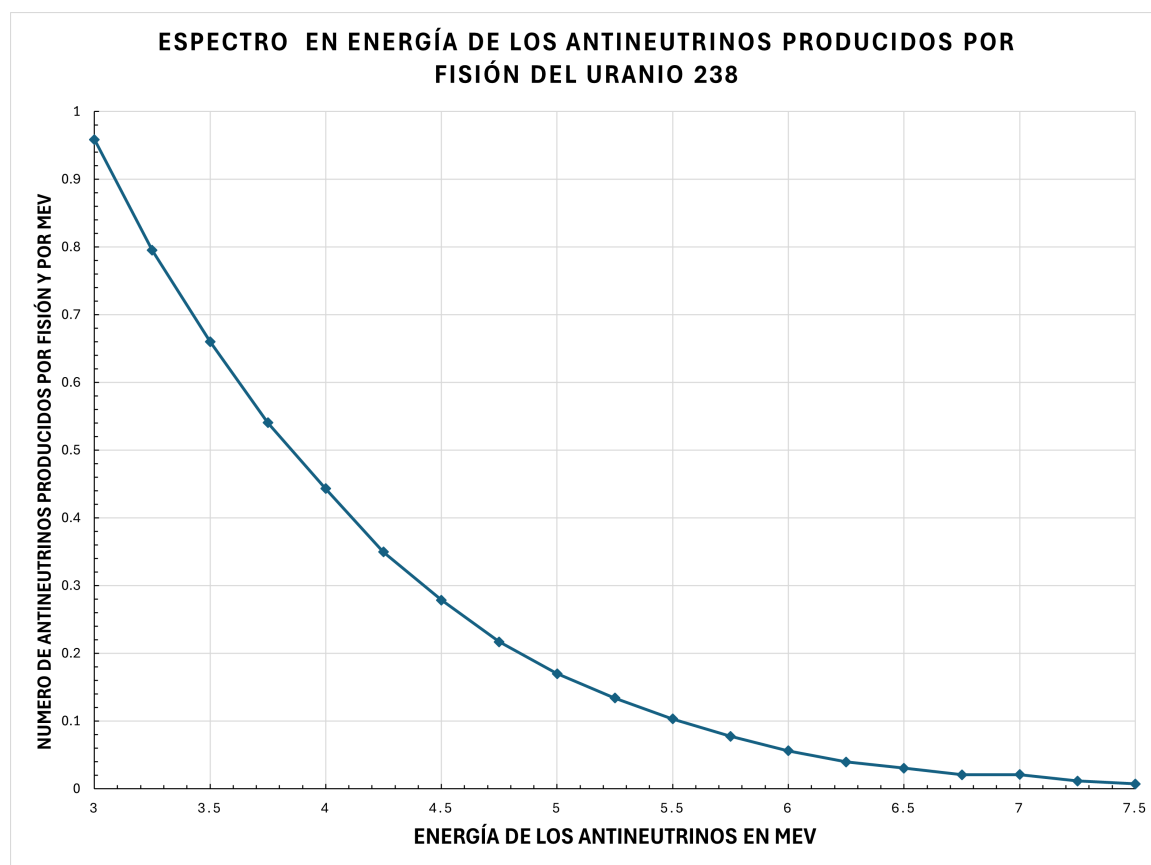


figura 4: Espectro en energía de los antineutrinos producidos por fisión del Uranio-238. Se realizó este gráfico usando los datos de la table II publicados en N. Haag et al. Phys. Rev. Lett. 112, 122501 (2014)

Profundicemos un poco más sobre lo **qué es el Espectro de energía** o también llamada la “**Huella del Neutrinos o Antineutrinos**”. La energía total de las partículas emitidas, es decir el leptón cargado y el (anti)neutrino, en la desintegración beta debe ser igual a la diferencia de energías del núcleo original respecto del resultante, lo que hace que la energía máxima depende de cual átomo se desintegra vía decaimiento beta y esta energía se repartirá entre el electrón (positrón) y el (anti)neutrinos. Con eso, ilustramos en la figura 5, el proceso que se realiza para identificar los antineutrinos del Uranio-238 de los otros antineutrinos producidos por las fuentes principales de radioactividad natural:



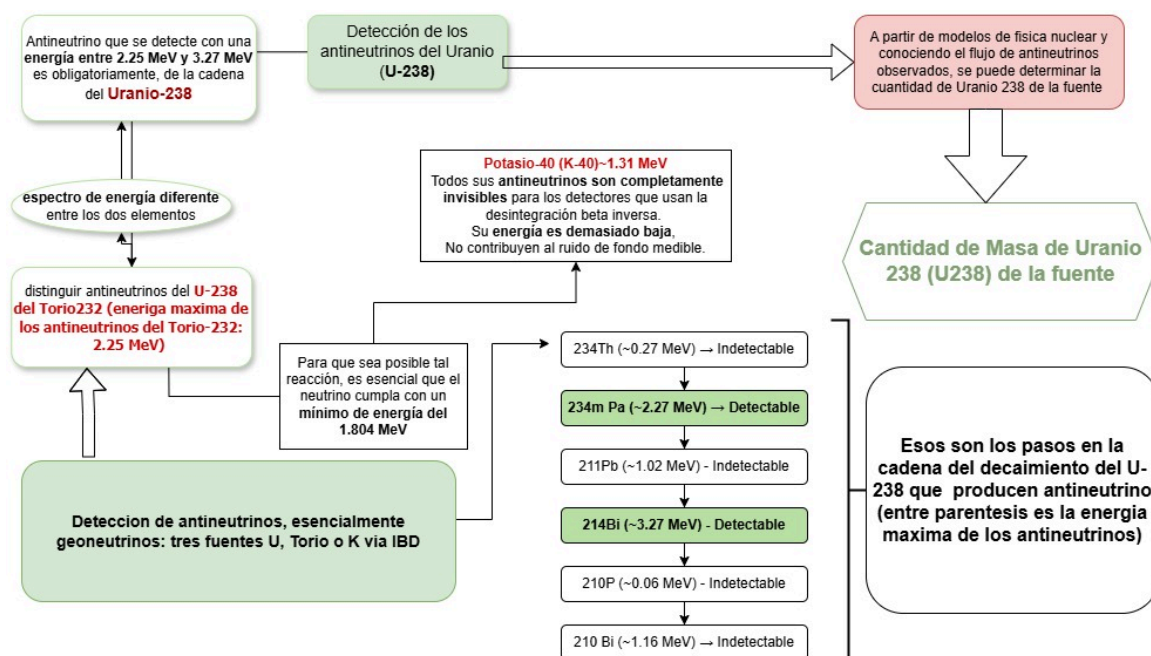


figura 5: proceso para identificar los antineutrinos producidos por el Uranio-238 y así determinar la masa de Uranio-238 que produce la señal observada en el detector.

### Mitigación del ruido de fondo

Como existe muchas fuentes naturales y artificiales de neutrinos y antineutrinos y que ellos pueden atravesar cualquier blindaje, un reto importante en la detección de los (anti)neutrinos es distinguir los (anti)neutrinos de interés de los (anti)neutrinos generados por otras fuentes. También existe señales producidos por partículas cósmicas como muones que pueden dar el mismo tipo de señal en el detector que un (anti)neutrinos. Todas esas señales que no provienen de la fuente que queremos estudiar es lo que llamamos ruido de fondo.

En la figura 6, pueden encontrar la descripción de las principales fuentes de ruidos de fondos para nuestro propósito.

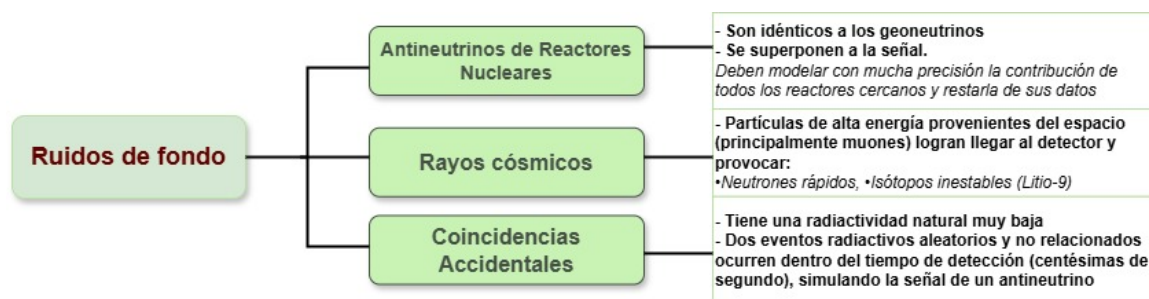


figura 6: Principales fuentes de ruidos de fondos para la detección de antineutrinos producidos por una fuente natural de Uranio-238

Por lo tanto, se tiene que elaborar una estrategia para minimizar el impacto del ruido de fondo en la señal de interés. En la figura 7, pueden ver las diferentes estrategias que se usa para minimizar los efectos del ruido de fondo en el caso de una detección basado en IBD. La reacción de IBD tiene una secuencia que facilita su identificación. En este evento se producen dos destellos de luz por dos efectos que se llevan a cabo: cuando el positrón se aniquila casi instantáneamente con un electrón (Destello rápido), y otro cuando el neutrón es capturado por un núcleo de hidrógeno (Destello tardío). Esta sucesión facilita discriminar la señal de interés con cualquier ruido de fondo.

:

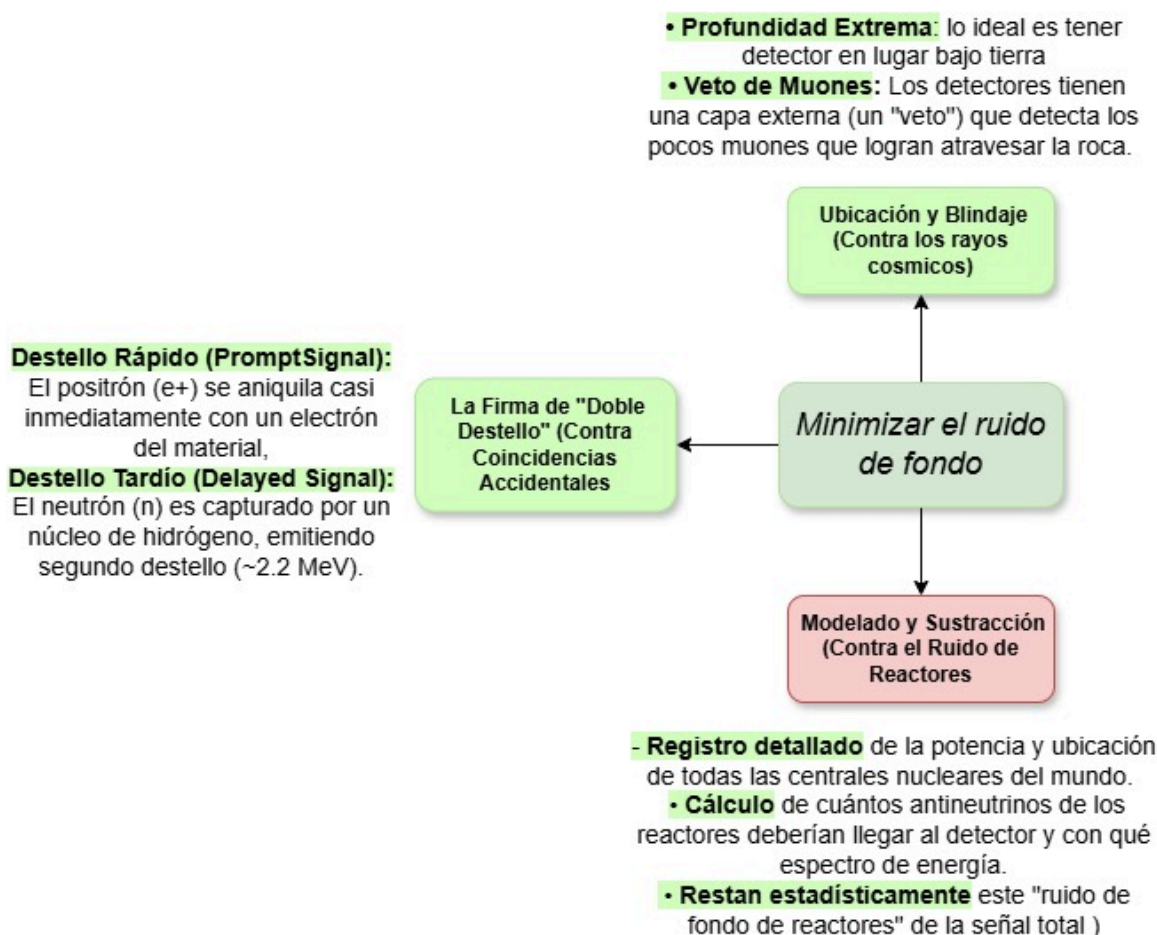


figura7: diferentes estrategias que se usa para minimizar los efectos del ruido de fondo en el caso de una detección basado en IBD.

En el caso de la Dispersión Elástica y del CEvNS, llega otra complicación debido a la pequeña señal que transmite su reacción. El ruido térmico viene del movimiento de átomos y electrones por la temperatura, vibrando con un promedio de 0.025MeV a una temperatura de 300K (26.85 Grados Celsius). El movimiento de los electrones genera un ruido que no permite la distinción de la señal de interés. Para limitar esta problemática, los detectores en particular basado en la CEvNS usan criostato que mantiene el detector a temperatura cercana al cero absoluto (Ackermann, 2024).

Por último, tener en cuenta que los mismos materiales del detector que pueden contener isotopos radioactivos y al decaerse, **tienen la probabilidad de generar una señal que simula a la de un antineutrino**. A este evento le denominaremos **"coincidencias accidentales"**. Este evento no es común, pero considerar su posibilidad es esencial. **La selección de materiales ultrapuros** previene esto por lo que se debe tener en cuenta.

### Direccionalidad de los neutrinos

Para poder localizar la fuente de los antineutrinos, el detector tiene que ser capaz de determinar la dirección de donde vienen los antineutrinos detectados. La posibilidad de determinar la dirección de los antineutrinos depende mucho de como se detecta.

En una detección basada en IBD, la señal es prácticamente isotrópica y tiene una muy pequeña anisotropía pero que individualmente no se puede distinguir del ruido térmico. Por lo tanto, la única manera para determinar la dirección de los antineutrinos es eliminando este ruido isotrópico de la señal vía con la



observación de muchos eventos. Esta metodología se llama direccionalidad estadística y es lo que usaron en el experimento PROSPECT (Andriamirado,2025).

En el caso de ES o CEvNS, es mucho más fácil determinar la dirección de los antineutrinos como aplicación directa de la conservación de la energía y momento de las partículas involucradas en la interacción y eso nos permite de determinar la dirección con una gran precisión.

### **Localización de la fuente de los antineutrinos: alternativa a la triangulación usando las oscilaciones de los neutrinos.**

El método tradicional para la localización de la fuente de una señal es la triangulación donde se ubica tres detectores en tres lugares diferentes que no sean sobre una misma línea y con la detección de la dirección de los antineutrinos en cada uno de esos detectores se podrán encontrar el origen donde se encuentran la fuente de los antineutrinos.

Pero se podría aprovechar la propiedad de oscilaciones de los neutrinos para poder localizar la fuente con un solo detector en lugar de tres. Pero para eso, se tiene que resolver el problema de tratar de conocer el flujo total de antineutrinos producidos por la fuente. Para resolver este problema, nuestro detector debería ser lo que llamaremos un detector **DUAL** es decir un detector basado en dos sistemas de detección:

- la detección de IBD que nos permitirá de determinar el flujo de antineutrinos electrónicos que llegan al detector.
- La detección de ES o CEvNS que nos permitía de determinar el flujo total de antineutrinos producidos por la fuente.

Con esos dos datos, se podrá determinar el flujo de antineutrinos electrónicos que cambiaron de sabor entre la fuente y el detector y usando la formula que describe las oscilaciones de los neutrinos se podrá determinar la distancia entre la fuente y el detector.

## **Experimentos y resultados**

Existe muchos experimentos a nivel mundial para el estudio de los neutrinos. No podemos revisar cada uno de ellos. Por eso, nos limitaremos a mencionar dos experimentos enfocados al monitoreo de reactores nucleares que ilustran los avances tecnológicos realizados en los últimos años y nos muestra que la posibilidad de contar con un detector con las características descritas en este trabajo es algo posible a corto plazo. Los dos experimentos que mencionaremos son PROSPECT (Andriamirado,2025) y CONUS (Ackermann, 2024).

El experimento PROSPECT (Precision Reactor Oscillation and Spectrum Experiment) se ubica en el *reactor HFIR (High Flux Isotope Reactor) en Oak Ridge National Laboratory, EE. UU.* y su propósito es demostrar la posibilidad de usar los neutrinos para el monitoreo de los reactores nucleares. Su detección es basada en IBD y ha demostrado la posibilidad de determinar la dirección de los antineutrinos con IBD con una precisión aceptable. Los resultados reportados al inicio de este año son prometedores:

- Se detecto 48000 eventos y pudieron determinar la dirección de la fuente de los antineutrinos con una presión del orden de 10%.

El experimento CONUS (COherent Neutrino Nucleus Scattering) tiene el propósito de detectar antineutrinos producidos por reactores nucleares via la CEvNS. La técnica de detección se base en el uso de Germanio a temperatura cerca del cero absoluto. Publico a final de 2024 sus resultados que demuestran la factibilidad de usar la CEvNS para el monitoreo de reactores nucleares con un detector de tamaño mucho más

reducido que los detectores tradicionales de neutrinos.

## **Conclusion**

En este trabajo se estudió la posibilidad de usar detectores de neutrinos para localizar fuentes radioactivas presentes en el suelo suponiendo que la principal fuente de radioactividad natural de nuestra fuente es la

radioactividad generada por el Uranio-238 y sus derivados. Hemos revisado los diferentes métodos de detección de los antineutrinos con sus ventajas e inconvenientes.

Para lograr el objetivo del trabajo, se necesitaría un detector de tipo DUAL que combina la detección basada en IBD y la detección via ES o CEvNS. Un tal detector debería permitirnos de determinar la localización de la fuente con gran precisión y la masa de la fuente. Existe todavía retos importantes para el uso de la detección de los neutrinos. El principal reto es la reducción del tamaño de los detectores de los neutrinos para llegar a un sistema de detección móvil. Los resultados de los últimos experimentos tal que PROSPECTS y CONUS son prometedores para la elaboración de detectores de neutrinos con un tamaño mucho más pequeños que los detectores usuales y para la elaboración de los mecanismos para controlar las fuentes de ruido de fondo sin la necesidad de poner el detector kilómetros bajo tierra.

## Bibliografía/Referencias

- Ackermann N. et al., CONUS collaboration, 2024, "Final CONUS results on coherent elastic neutrino-nucleus scattering at the Brokdorf reactor", *Phys. Rev. Lett.* 133, 251802. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.251802>
- Akimov D. et al., 2017, COHERENT collaboration, « Observation of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering », *Science* 357 (2017) 6356, 1123-1126, DOI: [10.1126/science.aao0990](https://doi.org/10.1126/science.aao0990)
- Andriamirado M. et al., PROSPECT collaboration, 2025, *Phys.Rev.Lett.* 134, 15, 151802. DOI: [10.1103/PhysRevLett.134.151802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.151802).
- Bellini G. et al., 2022, Geoneutrinos and geoscience: an intriguing joint-venture, *Riv.Nuovo Cim.* 45, 1, 1-105.
- Bernstein A. et al., (2020), "Colloquium: Neutrino detectors as tools for nuclear security," *Rev.Mod.Phys.* 92,011003.
- Cowan C.L. et al., 1956, *Science* 124, 103-104, DOI: [10.1126/science.124.3212.103](https://doi.org/10.1126/science.124.3212.103)
- Fermi E., 1934, *Nuovo Cim.* 11,1-19, Reprinted in "Bologna 1984, Proceedings, Fifty years of weak-interaction physics" 535-553. DOI: [10.1007/BF02959820](https://doi.org/10.1007/BF02959820)
- Fermi E., 1934, *Z.Phys.* 88, 161-177. DOI: [10.1007/BF01351864](https://doi.org/10.1007/BF01351864).
- Freedman D.Z., 1974, "Coherent Neutrino Nucleus Scattering as a Probe of the Weak Neutral Current", *Phys.Rev.D* 9, 1389-1392, DOI: [10.1103/PhysRevD.9.1389](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.9.1389)
- Fukuda Y. et al., Superkamiokande coll., 1998, *Phys.Rev.Lett.* 81, 1562-1567, e-Print: [hep-ex/9807003](https://arxiv.org/abs/hep-ex/9807003). DOI: [10.1103/PhysRevLett.81.1562](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1562)
- Goldhaber M. et al., 1958, *Phys.Rev.* 109, 1015-1017, DOI: [10.1103/PhysRev.109.1015](https://doi.org/10.1103/PhysRev.109.1015).
- Goodman M., 2015, The deep underground neutrino experiment, *Adv.High Energy Phys.*, 256351. DOI: [10.1155/2015/256351](https://doi.org/10.1155/2015/256351)
- Haag N. et al., 2014, *Phys. Rev. Lett.* 112, 122501.
- Lasserre, T. et al., (2010). Reactor Neutrino Detection for Non-Proliferation with the NUCIFER Experiment (p. 7 p.), published in Symposium on International Safeguards: Preparing for Future Verification Challenges
- Navas S. et al., 2024, Review of Particle Physics, *Phys. Rev. D* 110,3,030001.
- Pauli W., 1978, "Dear radioactive ladies and gentlemen", *Phys.Today* 31N9, 27.
- Terranova F., 2024, Future long baseline neutrino experiments, *Universe* 2024, 10(5),221; <https://doi.org/10.3390/universe10050221>

Vissani F. and Strumia A., 2006, [hep-ph/0606054](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0606054) .