

Neutrino, ¿el fotón del futuro? o “De la importancia de la ciencia básica en el desarrollo tecnológico”

Neutrino, ¿the photon of the future? or “Regarding the importance of basic science for technological innovation”.

Diego Alamilla Pérez

David Yves Ghislain Delepine

Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías, Departamento de Física.
d.alamillaperez@ugto.mx

Resumen

En este artículo se aborda la importancia de la ciencia básica como parte integrante del proceso de desarrollo tecnológico y de su aplicación en la sociedad moderna. Para esto, se servirá de ejemplo cómo la comprensión y medición de las propiedades características de los neutrinos, así como de fenómenos que ocurren en la naturaleza para su aplicación en el monitoreo y control de reactores nucleares.

Palabras clave: Neutrino; física de partículas; interacción débil; decaimiento beta; detección de neutrinos; reactores nucleares; monitoreo de reactores nucleares; aplicaciones tecnológicas.

Introducción

En el contexto de física de partículas, los neutrinos son partículas elementales que presentan características tan particulares, que su investigación ha sido tan relevante para la física moderna como desafiante. Por poseer carga eléctrica neutra y por su masa tan insignificante cuando se compara con otras partículas del modelo, no resulta sorprendente que desde la predicción teórica de su existencia por el físico Wolfgang Pauli 1930, su observación experimental haya demorado más de 20 años hasta su observación por Reines y Cowan en 1956.

El desarrollo de la teoría y la observación de los neutrinos no solo ha ampliado nuestro entendimiento del mundo subatómico, sino que también abre la puerta a avances tecnológicos con potencial revolucionario. Así como las ecuaciones de Maxwell sobre el electromagnetismo desencadenaron una era de innovaciones tecnológicas que transformaron la sociedad moderna, el avance en el estudio de los neutrinos promete desencadenar descubrimientos y aplicaciones que podrían igualar, e incluso superar, este impacto. La investigación reciente ha revelado propiedades fascinantes de los neutrinos, como su capacidad para oscilar entre diferentes sabores y su masa sorprendentemente pequeña, lo que ha llevado a un renovado interés en explorar posibles aplicaciones tecnológicas de estos resultados. La capacidad de detectar y analizar neutrinos puede ofrecer nuevas herramientas para el monitoreo de reactores nucleares, la observación de fenómenos astrofísicos, localización de depósitos de isótopos radiactivos y hasta combatir la proliferación del armamento nuclear.

Este artículo se enfoca en examinar cómo el entendimiento de los neutrinos podría traducirse en avances tecnológicos concretos. Así como nuestra sociedad ha transformado su comprensión del fotón y la luz en aplicaciones prácticas que van desde la comunicación hasta la medicina, es posible que los neutrinos también posean un potencial revolucionario similar. La detección y manipulación de neutrinos podrían ofrecer nuevas formas de observación y control en áreas que van desde la energía nuclear hasta la astrofísica y más allá.

En este artículo se plantea explorar las propiedades elementales del neutrino, así como algunos medios de detección y cómo el entendimiento de la naturaleza de estas partículas puede ayudar en aplicaciones de la física en la modernidad, con enfoque en el monitoreo y control de reactores nucleares. Así, brindando una motivación en la investigación en la física teórica en relación con el desarrollo tecnológico y sus aplicaciones.

El neutrino.

El neutrino, cuyo nombre significa *pequeño neutrón* y representado por el símbolo la letra griega ν (para el antineutrino $\bar{\nu}$), es una de las partículas fundamentales del modelo estándar: es un leptón, tan ligero que por muchos años se creyó que no tenía masa y posee carga eléctrica neutra, lo que significa que en esencia interactúa solamente por medio de la fuerza débil, complicando su detección experimental. La naturaleza tan evasiva del neutrino ha inspirado ser descrito en ocasiones por su comportamiento “fantasmal”; sin embargo, esta partícula ha sido fundamental en el entendimiento de muchas preguntas de la física, como los procesos ocurridos durante los primeros instantes del universo, la fuente de la materia oscura, la asimetría materia-antimateria en el universo, entre otros.

A pesar de su comportamiento tan esquivo, el neutrino es una partícula relativamente abundante, con una densidad de $n_\nu = 112 \text{ cm}^{-3}$ por especie de neutrino, es la segunda partícula más abundante del universo (Rich, 2010), y se producen en una diversidad de procesos, que por su origen se clasifican en naturales y artificiales. Los primeros incluyen neutrinos liberados por los procesos de fusión en el núcleo del Sol; aquellos creados en la atmósfera al ser esta impactada por rayos cósmicos; los geoneutrinos provenientes de decaimiento beta de isótopos radiactivos en el interior de la Tierra y aquellos provenientes del Big Bang y fenómenos astrofísicos, incluyendo supernovas. En cuanto a los neutrinos originados por fuentes artificiales, se consideran aquellos producidos en aceleradores de partículas y reactores nucleares.

Aunque se ha hablado del neutrino como una sola partícula, en realidad es una familia de tres leptones, distinguidos entre ellos por *sabor* y son representados por ν_e , ν_μ y ν_τ (neutrino electrón, neutrino muón y neutrino tau). Cada uno está asociado a un leptón cargado: e , μ y τ (electrón, muón y tau) con los cuales interactúan a través de corrientes cargadas, mediadas por el bosón W^\pm (Baldoncini, y otros, 2015).

Leptón	Masa
ν_e	$m < 0.8 \text{ eV}$
ν_μ	$m < 0.19 \text{ MeV}$
ν_τ	$m < 18.2 \text{ MeV}$

Tabla 1. Masa de los neutrinos por especie (Navas & et al, 2024).

Como se ha mencionado, estas partículas interactúan a través de la fuerza débil. Esto significa que participan en procesos mediados por el intercambio de bosones Z^0 o W^\pm , para corrientes neutras y corrientes cargadas, respectivamente. Un proceso de particular importancia para este trabajo es el del decaimiento beta. La interacción débil transforma protones a neutrones (o viceversa), así como el número de leptones cargados y número de neutrinos.

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 1)e^\pm \nu_e(\bar{\nu}_e)$$

Esto se produce, por ejemplo, cuando un núcleo inestable emite una partícula beta (electrón o positrón), esencialmente,

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

donde cada fórmula representa el decaimiento beta menos (β^-) y beta más (β^+), respectivamente (Spiro, Basdevant, & Rich, 2005).

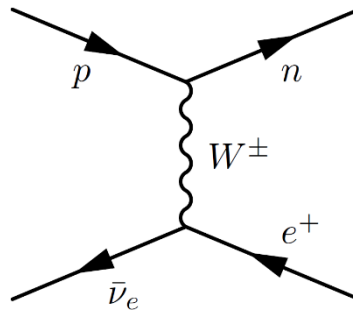


Figura 1. Diagrama de Feynman del proceso de decaimiento beta inverso.

Sin embargo, existe el proceso inverso, llamado propiamente, decaimiento beta inverso, donde un protón interactúa por dispersión con un antineutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$), produciendo un positrón (e^+) y un neutrón (n). Formalmente,



La Figura 1 ilustra el diagrama de Feynman para este procedimiento. Esta es aún el método principal para detección de antineutrinos. Tiene una sección eficaz del orden de $10^{-44} E_e p_e \text{ cm}^2$ con un umbral de 1.8 MeV (Spiro, Basdevant, & Rich, 2005).

DetECCIÓN EXPERIMENTAL.

En 1956, se realizó la primera observación experimental por Reines y Cowan en 1956. El experimento se basó en la reacción del decaimiento beta inverso (Ecuación ((1)). Realizado consistió en un centelleador que emite luz con el paso de radiación ionizante, en este caso de los positrones creados en la interacción de los antineutrinos. Una fracción de esta luz es detectada por fotomultiplicadores. El neutrón producido interacciona con los protones del centelleador produciendo fotones e interactuando con el material a través de efecto Compton, producción de pares electrón-positrón y efector fotoeléctrico. Estos procesos crean electrones y su efecto total es el de producir un segundo pulso de luz. Este doble pulso de luz ayuda a distinguir eventos producidos por neutrinos de aquellos debidos a radiación natural (Spiro, Basdevant, & Rich, 2005).

La sección eficaz del antineutrino en este proceso es relativamente baja, los detectores deben ser muy extensos y contar con un número muy denso de protones con el propósito de alcanzar un número razonable de interacciones.

Actualmente existen distintas formas de detección de neutrinos, sin embargo, puesto que el proceso de interés es el de decaimiento beta, los experimentos que dominan en la detección de antineutrinos son los detectores de Cherenkov y los detectores con centelleadores.

Detectores de Cherenkov.

Los detectores de Cherenkov aprovechan el efecto Cherenkov para detectar partículas cargadas. La radiación de Cherenkov es el fenómeno electromagnético que se produce por una partícula cargada que viaja a una mayor rapidez que la velocidad de fase de la luz en un medio. Al viajar esta partícula, la radiación electromagnética que emite forma un frente de onda esférico de interferencia constructiva a lo largo del recorrido de la partícula, lo que resulta en un cono de luz azul. Para producir este efecto, se toma en cuenta que la velocidad relativa de la partícula es mayor al inverso multiplicativo del coeficiente de refracción del medio (para el agua es 1.33):

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (2)$$

Entonces, para electrones o positrones que viajan en el agua, la energía mínima requerida para pasar el umbral de Cherenkov es

$$E = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - 1/n^2}} = 0.8 \text{ MeV} \quad (3)$$

Estos detectores se construyen con grandes volúmenes de agua, equipados con fotodetectores. Un ejemplo de este tipo de detectores es el Super-Kamiokande.

Centelleadores líquidos.

El tipo de detectores que se utilizó en la primera detección de neutrino por Cowan y Reines, estos son construidos de forma similar a los detectores de agua de Cherenkov. Los centelleadores líquidos se construyen con grandes tanques de líquido equipado con fotodetectores para observar los eventos lumínicos procedentes de las interacciones de neutrinos. La diferencia radica esencialmente en que se usa un material orgánico centelleante cuando una partícula cargada ioniza el medio.

Los centelleadores líquidos producen muchos más fotones por unidad de energía en comparación al efecto Cherenkov. En el caso de los detectores de neutrinos, ayuda a la reconstrucción de energía y posición, lo que resulta en una mejor resolución. Además, presentan otra ventaja al no haber un mínimo de energía de una partícula cargada para producir el efecto centelleante (Foster, 2024).

Un reto latente en la física moderna es la construcción de detectores de neutrinos prácticos, debido a la débil interacción de los neutrinos con la materia. Para tener el auge tecnológico que se tuvo, por ejemplo, con el fotón, estos detectores deben ser extremadamente sensibles para capturar las raras interacciones de los neutrinos, así como ser capaces de reconstruir su trayectoria y, especialmente, que sean prácticos y fáciles de construir.

Aplicaciones.

La tecnología basada en detección de antineutrinos provenientes de desintegración beta inversa tiene una amplia aplicación. Un buen ejemplo es prevención en la proliferación de armamento nuclear, puesto que en los reactores se produce Plutonio-239 y este es el material principal de estas armas. Es vital asegurarse de que el operador de un reactor nuclear no está desviando el material fisionable que se produce en todo el ciclo del reactor durante el proceso de recarga de combustible, ya que este material podría usarse en la creación de un arma. Además, la detección de antineutrinos ayuda localizar depósitos de isótopos radiactivos en el interior de la Tierra, los llamados geo neutrinos, que puede dar indicios de la composición, formación y evolución de nuestro planeta.

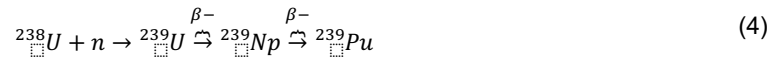
Sin embargo, el enfoque de este trabajo se centra en el uso de esta tecnología para monitoreo de centrales nucleares. El monitoreo de reactores mediante la detección de neutrinos ofrece varias ventajas, como la posibilidad de realizar observaciones continuas y no intrusivas, mejorando así la seguridad y el control de las operaciones. Además, este método puede contribuir a la verificación del cumplimiento de normativas y la detección temprana de posibles anomalías en el reactor.

Reactores nucleares.

Un reactor nuclear funciona bajo el principio de que isótopos ricos en neutrones sufren un proceso de fisión cuando absorben un neutrón, causando que el isótopo se divida en fragmentos de fisión más pequeños, lo que provoca una liberación de energía. Este proceso libera neutrones que más tarde producirán más fisión al resto del material, lo que provoca una reacción en cadena que libera grandes cantidades de energía. Esta

energía se usa para hervir agua hasta producir vapor que gira una turbina, resultando en la generación de electricidad.

Para que un neutrón sea absorbido por un núcleo y causar fisión, este deberá alcanzar energías térmicas, por medio de una sustancia conocida como moderador. Usualmente son construidos de agua o grafito y su función es hacer que el neutrón en el proceso de fisión colisione elásticamente hasta que se pierda suficiente energía y así pueda ser capturado con el núcleo de un isótopo.



Los fragmentos de fisión producidos pasan por decaimiento β^- tres veces en promedio, hasta alcanzar a convertirse en un núcleo estable. Así, produciendo 6 antineutrinos electrónicos por fisión.



En un reactor, la mayor parte de la energía producida en un reactor se logra con la fisión del Uranio-238, que compone el 96.5% del material fisionable, con el resto siendo Uranio-235 (Foster, 2024).

Antineutrinos de reactores.

Ahora es pertinente preguntarnos en qué favorece el uso de detección de antineutrinos en reactores y cuáles son las implicaciones de medir el flujo de neutrinos en la comprensión de la física de los reactores nucleares.

La medición del flujo de antineutrinos a través de un detector puede brindar información acerca del estado de operación del reactor, de la producción de energía y el contenido del núcleo. Puesto que los antineutrinos son fruto de las fisiones que se encargan de producir energía, la producción de antineutrinos en un reactor ayuda a determinar si el reactor está produciendo energía; entre mayor conteo de neutrinos, mayor cantidad de energía está produciendo. Además, la composición de la composición del núcleo tiene un efecto importante, pues cada uno de los isótopos principales que se encuentran en un núcleo producen una cantidad distinta de fragmentos de fisión; como cada especie fragmento tiene ratios de decaimiento beta distintos, cada uno tendrá un número distinto de antineutrinos producidos.

Es decir, en un reactor compuesto principalmente por ${}^{235}_{92}\text{U}$, la concentración del isótopo reduce a medida que se produce ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ aumenta; sin embargo, la fracción de isótopo ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ presenta un flujo de antineutrinos mucho menor por fisión para el mismo nivel de producción de energía (Christensen, Huber, & Jaffke, 2013).

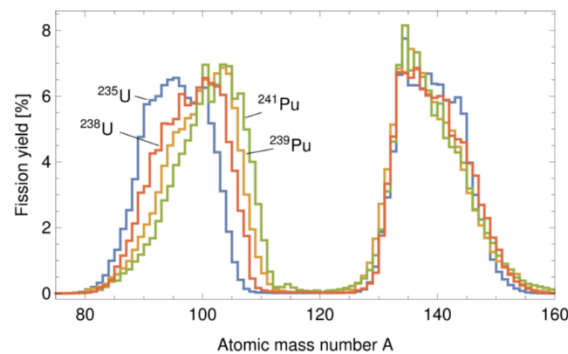


Figura 2. Producción de fragmentos de fisión por cada uno de los isótopos de fisión principales (Bernstein, 2019).

Aunque el flujo exacto de antineutrinos producido en un reactor nuclear es complejo y depende de muchos parámetros, un estimado del espectro de emisión de antineutrinos por fisión está estimado por

$$\lambda(E_{\bar{\nu}}) = \exp\left(\sum_{j=0}^5 a_j E_{\bar{\nu}}^j\right) \quad (6)$$

donde a_j son parámetros de ajuste predichas por Huber y Mueller (Huber, 2011) (Mueller & et al, 2011). La Figura 3 muestra el espectro estimado de los principales isótopos de fisión. Conociendo el promedio de emisión de antineutrinos, se puede calcular el promedio de energía térmica por fisión, Q_i . Así, la contribución al espectro de energía de antineutrinos provenientes del reactor del i -ésimo isótopo de fisión está dado por

$$\phi_{\bar{\nu},i}(E_{\bar{\nu}}) = P_t \frac{p_i \lambda_i(E_{\bar{\nu}})}{Q_i} \quad (7)$$

donde P_t es la potencia térmica del reactor, p_i es la fracción de potencia térmica producida por el i -ésimo isótopo.

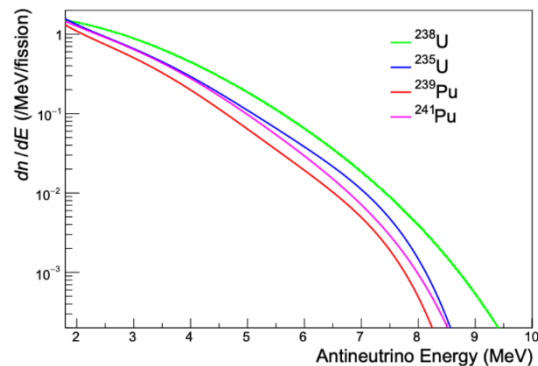


Figura 3. Espectro de Energía por isótopo de fisión (Dye & Barna, 2015)

Ahora, para que un neutrino sea detectado, debe ser considerada su sección eficaz. Para interacciones de decaimiento beta inverso, el espectro de antineutrinos detectables a una distancia d del reactor por cada isótopo de fisión puede ser descrito por

$$R_i(E_{\bar{\nu},i}) = \frac{N\sigma(E_{\bar{\nu}})}{4\pi d^2} \phi_{\bar{\nu},i}(E_{\bar{\nu},i}) \quad (8)$$

donde N es el número de partículas y $\sigma(E_{\bar{\nu}})$ es la sección eficaz de interacción del antineutrino (ver Figura 4) (Bernstein, 2019).

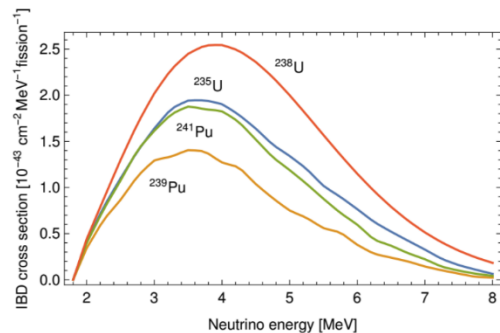


Figura 4. Sección eficaz en detección de antineutrinos por isótopos de fisión principales.

El espectro de energía de antineutrino observada será la combinación de las contribuciones individuales de cada isótopo de fisión, pesadas por su fracción de isótopo asociada. Se puede observar de la figura 4 que si podemos medir la energía del (anti)neutrino con suficiente precisión, es posible identificar de cual fisión proviene y por lo tanto, se podría reconstruir la composición del reactor en esos isótopos sin tener que acceder físicamente a la parte central del reactor donde se generan las fisiones de los isótopos.

Esto es importante de conocer la probabilidad de un neutrino para sobrevivir, así como su probabilidad de detección depende de la distancia recorrida por este, y entonces predecir el flujo de antineutrinos detectable a cualquier distancia del reactor requiere predicciones del espectro de energía en el reactor.

Conclusión

El estudio de los neutrinos ha revelado una nueva perspectiva de la física de partículas, destacando la importancia de la investigación fundamental en el avance de la ciencia, la tecnología y su aplicación. Desde su predicción teórica por Wolfgang Pauli hasta su confirmación experimental por Reines y Cowan, los neutrinos han demostrado ser una pieza clave en nuestra comprensión del universo. Así como las ecuaciones de Maxwell transformaron la tecnología del electromagnetismo, los avances en la física de neutrinos tienen el potencial de provocar innovaciones comparables.

La investigación sobre neutrinos no solo profundiza nuestro conocimiento de las interacciones subatómicas, sino que también abre la puerta a nuevas aplicaciones tecnológicas. En particular, la capacidad para detectar neutrinos ofrece oportunidades únicas para mejorar el monitoreo de reactores nucleares. A través de la detección precisa y no intrusiva de neutrinos generados en estos reactores, es posible obtener información crítica sobre su operación y seguridad, así como para la verificación del cumplimiento de normativas y la detección de anomalías.

El desarrollo de detectores de neutrinos eficientes sigue siendo un desafío considerable debido a la naturaleza débil de su interacción con la materia. No obstante, los avances recientes en la tecnología de detección, como las técnicas de luz Cherenkov y fluorescencia, son prometedores. Este artículo ha explorado cómo estos avances pueden ser aplicados para favorecer el monitoreo de centrales nucleares, subrayando la importancia del conocimiento fundamental para la innovación tecnológica.

En conclusión, este es un gran ejemplo de cómo la aplicación de avances tecnológicos de la investigación dirigida a un sector específico está precedido y fundamentado en la generación del entendimiento básico de la naturaleza a través de la investigación libre y fundamental.

Bibliografía

- Baldoncini, M., Callegari, I., Fiorentini, G., Mantovani, F., Ricci, B., Virginia, S., & Xhixha, G. (2015). Reference worldwide model for antineutrinos from reactors. *Phys. Rev. D*, *91*(6):065002.
- Bernstein, A. (2019). Neutrino detectors as tools for nuclear security. *Rev. Mod. Phys.* *92* (2020) no.1, 011003, 10.1103/RevModPhys.92.011003.
- Christensen, E., Huber, P., & Jaffke, P. (2013). Antineutrino reactor safeguards - a case study.
- Dye, S., & Barna, A. (2015). Global antineutrino modeling for a web application.
- Foster, R. (2024). Novel Technologies for future applications of nuclear reactor monitoring using antineutrinos. *University of Sheffield*.
- Huber, P. (2011). Determination of antineutrino spectra from nuclear reactors. *Physical Review C* *84*, 024617.
- Mueller, T. A., & et al. (2011). Improved predictions of reactor antineutrino spectra. *Physical Review C* *83*, 054615.
- Navas, S., & et al. (2024). Particle Data Group. *Phys. Rev. D* *110*, 030001.
- Rich, J. (2010). *Fundamentals of Cosmology*. Springer.
- Spiro, M., Basdevant, J., & Rich, J. (2005). *Fundamentals in Nuclear Physics*. Springer.