

Uso de detectores de neutrinos para el monitoreo de reactores nucleares

David Delepine*, Edgar Casimiro Linares*, José-Antonio Hernández Valencia*, Gerardo Moreno*

RESUMEN

Se estudia la factibilidad del uso de los detectores de antineutrinos para el monitoreo de reactores nucleares. Usando un modelo sencillo de cascada de fisión a dos componentes, se ilustra la dependencia del número de antineutrinos detectados a una distancia L del reactor según la composición nuclear del combustible. Se explica el principio de detección de neutrinos de reactores en base al decaimiento beta inverso y se describe como los detectores de neutrinos pueden emplearse para el monitoreo de la producción de materiales fisibles en el reactor. Se comenta como generalizar este análisis al caso real de un reactor nuclear in situ y uno de los principales experimentos internacionales dedicados a este propósito.

ABSTRACT

We study the feasibility to use antineutrinos detectors for monitoring of nuclear reactors. Using a simple model of fission shower with two components, we illustrate how the numbers of antineutrinos detected at a distance L from the reactor depend on the composition of the nuclear combustible. We explain the principles of reactor neutrino detection using inverse beta decays and we describe how neutrinos detectors can be used for monitoring the production of fissile materials within the reactors. We comment how to generalize this analysis to the realistic case of a nuclear reactor in situ and one of the main international experiments dedicated to study the use of neutrinos detectors as nuclear safeguards.

Recibido: 15 de Junio de 2009
Aceptado: 10 de Diciembre de 2009

INTRODUCCIÓN

Desde la primera detección de los antineutrinos en los años 50 usando un reactor nuclear como fuente de antineutrinos (Cowan, 1956), el uso de los reactores nucleares como fuentes de antineutrinos ha jugado un papel fundamental en un gran número de experimentos de neutrinos, como son KamLand (Japón), Palo Verde (EUA), Chooz (Francia), etc., que permitieron determinar las propiedades fundamentales de los anti-neutrinos. Desde hace tiempo, la comunidad científica se percató que las técnicas y los métodos desarrollados para el estudio de los neutrinos en física de altas energías podría aplicarse a la física nuclear, particularmente al monitoreo de los reactores nucleares (Mikaelian, 1977) en el marco de las medidas de seguridad nucleares que la Agencia Internacional para la Energía Atómica (AIEA) desea implementar para evitar el uso de materiales fisibles producidos en los reactores nucleares civiles para producir armas nucleares. Varios experimentos pioneros demostraron su factibilidad (Klimov, 1994), (Declais, 1995). En los últimos años, la madurez del campo de investigación relacionado a los neutrinos y su detección ha sido suficiente para imaginar la elaboración y construcción de "mini"-detectores de antineutrinos dedicados al monitoreo de los reactores nucleares (Bernstein, 2002). Otro uso importante de estos mini-detectores podría ser evitar el contrabando de materiales fisibles entre las fronteras de los países.

Palabras clave:

Neutrinos; Reactor nuclear; AIEA (Agencia Internacional de la Energía Atómica); Salvaguardas nucleares; Decaimiento beta inverso.

Keywords:

Neutrinos; Nuclear reactor; IAEA; Nuclear safeguards; Inverse beta decay.

Las agencias de monitoreo de las actividades nucleares, como la AIEA, utilizan un conjunto de procedimientos y tecnologías para detectar el desvío de materiales fisibles de las plantas nucleares generadores de electricidad a fin de prevenir el armamentismo nuclear, ya que los reactores nucleares generan cada año varios cientos de kilogramos de plutonio. La vigilancia de los reactores nucleares se realiza haciendo un balance entre lo que se entrega como combustible

A nombre de la Colaboración Angra

* Departamento de Física, División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato. Loma del Bosque 103, Colonia Loma del campestre, C.P. 37150 León, Gto, Tel: (477) 7 88 51 00.

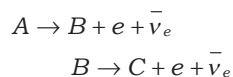
al reactor nuclear y lo que se declara al final de la vida útil de las pilas de combustible nuclear. Generalmente, las medidas de vigilancia de la AIEA no incluyen mediciones directas de los materiales fisibles debido a su elevado costo y a que requieren también de mucho tiempo del personal de la AIEA y de la planta nuclear que la opera. El uso de detectores de antineutrinos podría facilitar la vigilancia de los reactores dado que esta técnica proporciona información directa sobre la composición de los materiales fisibles que se encuentran en el núcleo de la planta nuclear, sin necesidad de entrar en contacto con ellos.

En este artículo, se describen cuales son los principios en los cuales se basa el uso de los detectores de neutrinos para el monitoreo de reactores nucleares. Usando un modelo sencillo, determinaremos explícitamente la dependencia del número de eventos que podrían ser detectados dada la composición isotópica del combustible del reactor mismo. En la segunda parte, se comentará como se puede generalizar este modelo al caso de un reactor nuclear real y se mencionarán las técnicas de detección que podrían usarse.

Principios básicos del monitoreo de reactores nucleares con neutrinos

En esta sección, vamos a estudiar un modelo simple que nos permitirá demostrar los principios básicos que fundamentan el uso de los detectores de neutrinos para el monitoreo de los reactores nucleares.

La idea básica es establecer una correlación entre el número de eventos registrados en el detector de neutrinos y la composición en materiales fisibles de las pilas de combustible del reactor nuclear. Para ello consideraremos el modelo de una cadena de decaimiento en dos etapas:



Donde A y B son átomos radioactivos, cada uno caracterizado respectivamente por un tiempo de vida $\tau_{A,B}$, y C es un material estable. Podemos ver que tenemos dos fuentes de anti-neutrinos. Una fuente que viene del decaimiento del A y otra fuente que proviene del decaimiento del B. Es fácil obtener la variación temporal de la densidad de átomos A y B suponiendo que al tiempo inicial la pila de combustible contiene solamente átomos A:

$$\begin{aligned} N_A(t) &= N_{A0} e^{-t/\tau_A}; \\ N_B(t) &= N_{A0} \left(\frac{\tau_B}{\tau_A - \tau_B} \right) \left(e^{-t/\tau_A} - e^{-t/\tau_B} \right). \end{aligned}$$

Donde N_{A0} es el número de átomos A en el tiempo inicial ($t=0$). Como cada decaimiento de A (B) produce un anti-neutrino, el número de antineutrinos producidos por el decaimiento del átomo A (B) por unidad de tiempo está dado por

$$\begin{aligned} N_v^A(t) &= \frac{N_A(t)}{\tau_A}; \\ N_v^B(t) &= \frac{N_B(t)}{\tau_B}; \end{aligned}$$

El detector de anti-neutrino se encuentra usualmente a una distancia L del reactor nuclear. Dado que el decaimiento de los átomos A y B no tiene una dirección privilegiada, el flujo de neutrino que llega al detector proviniendo respectivamente de los átomos A y B es igual a

$$\Phi_v^{A,B}(t) = \frac{N_v^{A,B}(t)}{4\pi L^2}$$

El punto clave en el uso de los neutrinos para el monitoreo de los reactores nucleares es que la distribución en energía de los antineutrinos que provienen de los átomos A o de los átomos B es diferente. Por eso es importante recordar que el espectro en energía de los anti-neutrino producido por el decaimiento beta está dado por

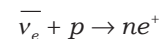
$$\frac{d\Gamma_{A,B}}{dE_\nu} \propto E_\nu^2 (E_0^{A,B} - E_\nu)^2$$

Donde $E_0^{A,B} = Q_{A,B} + m_e$ y $Q_{A,B}$ es la energía disponible de la diferencia de masa entre el átomo que se desintegra y las partículas producidas como resultado del decaimiento beta. Esta cantidad depende intrínsecamente del átomo que se desintegra (P.Vogel, 1989) (V I Kopeikin, 1997).

Usando este resultado se puede establecer la distribución en energía del flujo de los antineutrinos que llegan al detector por unidad de tiempo:

$$\Phi_v^{total}(E_\nu) = \frac{1}{\Gamma_A} \frac{d\Gamma_A}{dE_\nu} \frac{N_v^A(t)}{4\pi L^2} + \frac{1}{\Gamma_B} \frac{d\Gamma_B}{dE_\nu} \frac{N_v^B(t)}{4\pi L^2};$$

La reacción típica de detección es el decaimiento beta inverso, es decir



Esta reacción tiene una energía de umbral de $E_{th} = 1.8$ MeV y su sección eficaz es igual a

$$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow ne^+) \approx 9.30 \cdot 10^{-42} \left(\frac{E_\nu}{10 \text{ MeV}} \right)^2 \text{ cm}^2 \equiv \sigma(E_\nu)$$

En conclusión, suponiendo una eficiencia perfecta del detector, el número de eventos registrados en el detector por los antineutrinos que provienen del reactor por unidad de tiempo es igual a

$$N_{event}(t) = N_p \left(\frac{N_\nu^A(t)}{4\pi L^2} \int_{E_{th}}^{E_0^A} \sigma(E_\nu) \frac{1}{\Gamma_A} \frac{d\Gamma_A}{dE_\nu} dE_\nu + \frac{N_\nu^B(t)}{4\pi L^2} \int_{E_{th}}^{E_0^B} \sigma(E_\nu) \frac{1}{\Gamma_B} \frac{d\Gamma_B}{dE_\nu} dE_\nu \right)$$

Donde N_p es el número de blancos en el detector (en este caso, corresponde al número de protones del detector). De esta fórmula, la dependencia del número de eventos en función de la composición del reactor nuclear está determinada por el hecho de que la distribución en energía de los neutrinos producidos por A o B sea muy diferente. Entre mayor es la diferencia, será más fácil obtener una correlación entre el número de eventos y la composición del reactor.

Los dos elementos fisibles más importantes en la operación del reactor son el Pu-239 y el U-235. Puesto que los flujos y el espectro de energía de los antineutrinos emitidos por estos dos isotopos es diferente, la razón de neutrinos detectados, y sus características espectrales presentara una variación temporal a lo largo del ciclo de operación del reactor, aun si el reactor opera a potencia constante.

Una desviación del comportamiento esperado podría ser indicación de una alteración en la operación del reactor con el propósito de producir de manera no declarada mayores cantidades de plutonio. Existen varias posibles estrategias que se podrían seguir para conseguir la producción extra y extracción de plutonio en un reactor nuclear. Pero la puesta en operación de cualquiera de estas estrategias es detectable en cierta medida con un detector de neutrinos suficientemente sensible. Sin embargo para poder ser suficientemente sensible a una producción anormal de unos cuantos kilogramos de plutonio en un reactor de potencia, el detector de neutrinos debe ser considerablemente eficiente. De ahí el trabajo de investigación y desarrollo necesario para poder mejorar la técnica de detección.

Técnicas de detección y proyecto ANGRA

El Proyecto Angra (Anjos, 2006) (Casimiro, 2008) es un experimento en el complejo nuclear de Angra dos Reis, Brasil, para explorar la utilidad de los detectores de neutrinos como monitores de reactores nucleares para ayudar a evitar la proliferación de armas nucleares, y mejorar la medición de la potencia térmica de los reactores. El proyecto podría también constituir la primera etapa de un experimento mucho más ambicioso para medir uno de los principales parámetros del Modelo Estándar de las Partículas Fundamentales: el ángulo de mezcla θ_{13} .

El diseño del detector de antineutrinos a utilizarse no está congelado aun. Hay parámetros de diseño que aún se están estudiando, por medio de trabajo de simulación y teórico-fenomenológico.

El diseño base del detector contempla una configuración típica de tres volúmenes concéntricos. Cada capa con una función diferente. Este diseño

permite incrementar la sensibilidad al decaimiento beta inverso y reducir la sensibilidad al ruido de fondo.

1) El volumen más interno provee el blanco para que los antineutrinos interactuen. Inicialmente se contemplaba usar como blanco (detector central) líquido centellador ligeramente dopado con gadolinio. Sin embargo, debido a restricciones impuestas por la compañía que opera el reactor se decidió finalmente utilizar como elemento central un detector Cherenkov de agua ligeramente dopada con sales de gadolinio, en un volumen tipo paralelepípedo que permita incluir una masa del blanco de exactamente una tonelada. 2) El volumen intermedio contiene solamente centellador, para incrementar la probabilidad de detección de los fotones emitidos en la aniquilación del positrón y captura del neutrón. 3) El volumen externo se llena con aceite mineral sin centellador, para acoplamiento óptico y para disminuir el ruido que pudiera llegar al detector central como consecuencia de la radioactividad del exterior y de los fototubos mismos, esta última debida al Potasio-40 presente en pequeñas cantidades en el vidrio con el que están fabricados. Varias decenas de tubos fotomultiplicadores (entre 40 y 74) de ocho pulgadas de fotocátodo observan los pulsos de luz provenientes de las interacciones en las diferentes regiones. Con la finalidad de evitar disparos por muones cósmicos que atraviesen el detector o pasen cerca del detector generando por espalación otras partículas que puedan generar señales que se confundan con las de eventos de neutrinos, se coloca una pared quasi-hermética de muones (Veto), con tiras de plástico centellador, en toda la parte externa del detector. El detector se colocará en un contenedor de transporte comercial, en la superficie terrestre, justo en la parte externa del muro de seguridad del reactor, a aproximadamente 30 metros del núcleo del reactor.

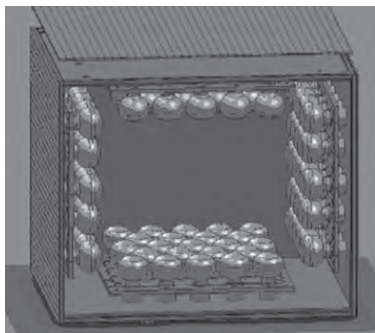


Figura 1. Esquema simplificado del detector de neutrinos y del sistema de veto para el proyecto ANGRA

La señal característica del evento se determina mediante la detección simultánea, dentro de una ventana temporal Δt , de las partículas secundarias provenientes del decaimiento beta inverso: e^+ , n . El positrón e^+ genera una primera señal, extremadamente rápida, que se usa para abrir esa ventana temporal Δt , la cual será cerrada por la presencia de los fotones que indican la captura nuclear del neutrón. La cantidad de luz registrada en los fotomultiplicadores provee una medida de la energía del antineutrino que provocó la reacción, permitiendo con ello caracterizar la correlación del número de eventos como función de la energía y la composición del reactor.

La Universidad de Guanajuato colabora en el proyecto Angra, por medio de estudios teóricos de detección de antineutrinos, de estudios de ruido de fondos cosmogénicos, útiles para el diseño del detector y de sus sistemas asociados (veto, blindajes) y de apoyo general en la construcción del detector (Casimiro, 2008).

Varios grupos experimentales en diferentes países han desarrollado en años recientes, o se encuentran actualmente trabajando en esta línea de investigación. Por ejemplo en Francia, E.U.A. (San Onofre, California), Suiza, y Rusia.

CONCLUSIÓN

La detección de neutrinos para monitorear reactores nucleares aparece como una técnica prometedora, que se debería poder aplicar, en una amplia variedad de tipos de reactores, en cuanto se mejore la sensibilidad y características de los detectores.

Esta técnica de monitoreo, no intrusiva, y en cierta medida autónoma, adquiere nueva relevancia hoy día, como consecuencia de nuestra mejor comprensión de la física de neutrinos, adquirida en los últimos años, así como a los nuevos desarrollos en técnicas de detección (particularmente al desarrollo de nuevos centelladores dopados con Gd con propiedades ópticas mucho más estables). En este trabajo, se ha mostrado con un modelo sencillo de decaimiento en dos etapas la posibilidad de utilizar un detector de neutrinos para monitorear el gasto de combustible en los reactores nucleares.

REFERENCIAS

- J.C. Anjos, A.F. Barbosa, A. Bernstein, N.S. Bowden, W. Fulgione, E. Kemp, J. Magnin, H. Nunokawa, O.L.G. Peres, D. Reyna, A. Schillithz, R.C. Shellard, R. Zukanovich Funchal, (2006). Angra dos Reis: reactor neutrino oscillation experiment. *Brazilian Journal of Physics*, vol 36, no 4A.
- Adam Bernstein, Yi-fang Wang, Giorgio Gratta, Todd West, (2002). Nuclear reactor safeguards and monitoring with anti-neutrino detectors. *J.Appl. Phys.*91, 4672. nucl-ex/0108001.
- E. Casimiro, J.C. Anjos, (2008). Cosmic muon background and reactor neutrino detectors: The Angra experiment. *J.Phys.Conf.Ser.*116:012003. E. Casimiro and J.C. Anjos (2008). The Angra Neutrino Project: precise measurement of θ_{13} and safeguards applications of neutrino detectors, published in the *Proceedings of the XIII Mexican School of Particles and Fields of the Sociedad Mexicana de Física*, 11 Oct 2008. San Carlos, Sonora, Mexico.
- C.L. Cowan, F. Reines, F.B. Harrison, H.W. Kruse, A.D. McGuire, (1956). Detection of the free neutrino: A Confirmation. *Science* 124, 103.
- Y. Declais, J. Favier, A. Metref, H. Pessard, B. Achkar, M. Avenier, G. Bagieu, R. Brissot, J.F. Cavaignac, Johann Collot, D.H. Koang, A. Stutz, M.C. Cousinou, F. Garciaz, E. Kajfasz, E. Nagy, J.P. Cussonneau, Y. Dufour, H. de Kerret, B. Lefevre, M. Obolensky, J.P. Wuthrick, R. Aleksan, J. Bouchez, E. Lesquoy, J. Mallet, F. Pierre (1995). Search for neutrino oscillations at 15-meters, 40-meters, and 95-meters from a nuclear power reactor at Bugey. *Nucl.Phys.* B434, 503.
- Yu. V. Klimov, V. I. Kopeikin, L. A. Mikaelyan, K. V. Ozerov and V. V. Sinev (1994). Neutrino method remote measurement of reactor power and power output, *Atomic Energy* 76,123.
- V I Kopeikin, L A Mikaelyan, V V Sinev (1997). Spectrum of electronic reactor anti-neutrinos. *Phys Atom. Nuclei* 60, 172.
- L.A. Mikaelian, (1977). Neutrino laboratory in the atomic plant. *Proc.Int. Conference Neutrino 77*, v.2, pg 383-387.
- P. Vogel, J. Engel (1989). Neutrino Electromagnetic Form-Factors. *Phys Rev D*39 3378