

Detección y estudio de la línea de emisión en el proceso de formación del Deuterio en el sol

Omar Alejandro Lezama Gallegos¹, J. Felix¹

¹División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, León, Guanajuato, México.
E-mail: lezamago2016@licifug.ugto.mx, felix@fisica.ugto.mx

Resumen — Todo el tiempo el Sol está emitiendo radiación electromagnética. Con mucha frecuencia, un neutrón es absorbido por un núcleo de Hidrógeno, lo que resulta en la producción de un átomo de Deuterio y en la emisión de un rayo gamma con una energía muy característica de 2.22 MeV. Para estudiar este proceso construiremos un detector de rayos gamma provenientes del sol. Presentamos la planeación, el diseño, detalles técnicos de la construcción (en proceso), los resultados de la simulación -en GEANT4- y las implicaciones de esta información para mejorar esta técnica de detección.

Palabras Claves – Deuterio, rayo gamma, detección, simulación, fotones

Abstract — The sun is always emitting electromagnetic radiation. Very often, a neutron is absorbed by a Hydrogen nucleus, resulting in the production of an atom of Deuterium and in the emission of a gamma ray with a very characteristic energy - 2.22 MeV -. To study this process, we will build a sun-gamma-ray detector. We present the planning, the design, the construction technical details (in process), the results of the simulation -in GEANT4- and the implications of this information to improve this detection technique.

Keywords — Deuterium, gamma ray, detection, simulation, photons

I. INTRODUCCIÓN

El sol emite grandes cantidades de radiación al espacio mediante las llamaradas solares y las Eyecciones de Masa Coronal (CMEs) (ver Fig. 1). Entre estos tipos de radiación encontramos la radiación electromagnética, la cual es emitida en todas las longitudes de onda, abarcando el espectro desde los rayos gamma hasta las longitudes de onda en el rango visible. Los rayos gamma son la forma de radiación electromagnética de mayor energía, dado que son eléctricamente neutros resulta imposible desviarlos con campos eléctricos o magnéticos. Además, debido a su energía, el universo es esencialmente transparente a la propagación de los rayos gamma. Las fuentes de producción de rayos gamma van desde fuentes galácticas, que en nuestro sistema solar es el sol, hasta fuentes extragalácticas a millones de años luz [1].

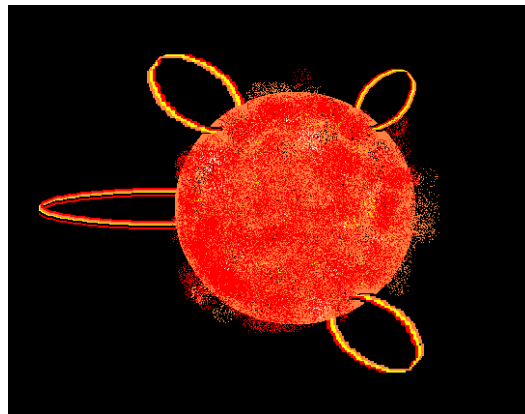


Fig. 1. EMCS y llamaradas solares en la superficie solar.

Durante las llamaradas solares se producen neutrones debido a la interacción de núcleos energéticos con la atmósfera solar, si un neutrino es capturado por Hidrógeno produce el Deuterio junto con un rayo gamma de energía característica: 2.22 MeV. La detección de esta línea de emisión en la Tierra implicaría, bajo las condiciones adecuadas, que este rayo gamma se originó en la superficie solar debido a la producción del Deuterio [2].

Los rayos gamma, al igual que muchas otras partículas energéticas, los detectamos observando los efectos que producen en la materia [3].

Las formas de interacción de los rayos gamma con la materia son el Efecto Fotoeléctrico (para energías del orden de keV), el Efecto Compton (para energías del orden de MeV) y la producción a pares (para energías del orden de GeV). La forma de interacción dependerá directamente de la energía de la partícula incidente, para el caso del rayo gamma emitido durante la producción del Deuterio, el efecto Compton será la forma de interacción dominante [4].

Cuando se produce el efecto Compton, el rayo gamma incidente colisiona con un electrón que originalmente se encontraba en reposo, este electrón sale disparado con una energía que es igual a la energía que el rayo gamma depositó durante la colisión, con lo que el rayo gamma es desviado y ahora tiene menor energía. Si este electrón liberado viaja con

una energía mayor que la velocidad de la luz en el medio se producen fotones del tipo Cherenkov [4].

Otras formas de producción de fotones pueden ser por centelleo debido a la excitación-desexcitación de los electrones en el medio detector. Sabemos que se producirá una mayor cantidad de fotones por efecto Cherenkov que por cualquier otra forma de producción (ver Resultados).

II. METODOLOGÍA

En esta sección presentamos la planeación, el diseño y detalles técnicos de la construcción del sistema experimental de laboratorio.

A. Planeación

El objetivo que tenemos es detectar el Deuterio en nuestro sistema experimental mediante la detección de rayos gamma de 2.22 MeV de energía. Necesitamos implementar el método de coincidencias con el cual podremos identificar las partículas detectadas como muones o rayos gamma. También es necesario pensar y evaluar qué otras condiciones serían de utilidad para discriminar los fotones producidos por ambas partículas primarias.

Tendremos un total de 3 detectores: un detector de agua y dos detectores de veto. El principio de funcionamiento es muy simple: los rayos gamma producen señal en el detector de agua, pero no en los vetos, mientras que las partículas cargadas producen señal tanto en el detector de agua como en los vetos.

Usamos el Software de simulación Geant4 para simular los componentes del sistema experimental para poder obtener información acerca de la forma en que las partículas interactúan con la materia para poder así detectarlas de manera apropiada.

El sistema experimental consiste en un cascarón esférico metálico lleno con agua (que será el medio detector) y dos detectores de veto, los cuales usarán un material centellador para emitir fotones cuando una partícula los atraviese. Si como resultado de las interacciones de las partículas con el agua se dispara un electrón que viaje más rápido que la velocidad de la luz en el medio se producirán fotones por medio del efecto Cherenkov.

Cada detector tendrá acoplado al menos un tubo fotomultiplicador (PMT) Hamamatsu como el de la Fig. 2. Este PMT tiene un rango de detección de fotones entre 185 nm y 850 nm, teniendo su pico máximo de detección en los 420 nm (color azul).



Fig. 2. Tubo fotomultiplicador que usaremos en el sistema experimental [5].

En la simulación es importante definir bien cada una de las características ópticas y eléctricas de los materiales usados, por ejemplo, índice de refracción, acabado del material, densidad, tasa de centelleo, etc. La definición incompleta de estos materiales puede resultar en una mala ejecución de las bibliotecas físicas, con lo que lo observado en la simulación no necesariamente tendría que corresponder a las observaciones dentro del laboratorio.

También usamos el Software de Diseño SketchUp para dibujar cada una de las componentes del sistema experimental con sus dimensiones correspondientes.

B. Diseño

Los elementos del sistema experimental son los siguientes:

- Detector de agua
 - Esfera de acero
 - Agua
 - 2 válvulas
 - Al menos 1 tubo fotomultiplicador (PMT)
- Detector de veto
 - Caja de aluminio
 - Material centellador
 - PMT
- Estructura de aluminio

Usaremos los detectores de veto para discriminar las señales producidas por el paso de partículas cargadas (como los muones) de las señales producidas por partículas de carga neutra (como los rayos gamma). Tendremos en total dos detectores de veto, uno arriba y otro abajo del detector de agua.

Cada caja para detector de veto se conforma de una tapa, una base y 4 piezas que conforman las paredes del detector. La estructura de aluminio tendrá 50 centímetros de alto para garantizar tener el espacio suficiente para la colocación de los dos detectores de veto y el detector de agua con sus respectivos PMTs. El diseño del sistema experimental lo mostramos en la Fig. 3.

La esfera detectora mide 30 centímetros de diámetro. Los detectores de veto ya construidos miden 34 cm x 34 cm x 0.5 cm de alto. La sección transversal de los PMTs usados es una circunferencia de 35 mm de diámetro.

Además, necesitaremos una tarjeta electrónica para la digitalización de las señales producidas en los 3 detectores así como soportes para cada uno de los PMTs en sus respectivos detectores.

En la simulación ya hemos incluido todos los elementos del sistema experimental actual, cada material usado como medio detector ya cuenta con sus propiedades ópticas y eléctricas bien definidas para garantizar que se produzcan las correspondientes interacciones en la interfaz de los materiales y dentro de cada uno de estos materiales.

En la Fig. 4 apreciamos el sistema experimental simulado en Geant 4, es posible identificar la esfera detectora, así como los 3 detectores de veto.

C. Construcción

En la simulación disparamos rayos gamma de 2.22 MeV de energía y Muones (con carga negativa) de 4 GeV de energía, que es la energía media de los muones al nivel del mar en la Tierra. Con lo anterior podemos observar la interacción de las partículas con el sistema experimental para posteriormente medir las características de los fotones producidos, por ejemplo, distribución angular, distribución espacial, energía, longitud de onda, polarización, etc.

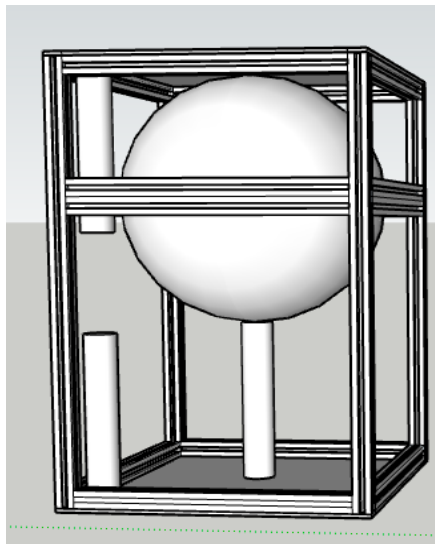


Fig. 3. Diseño del sistema experimental.

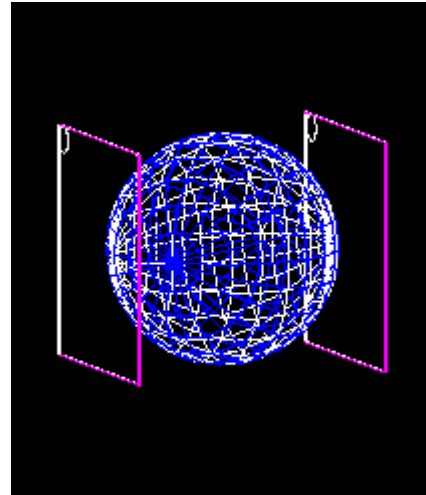


Fig. 4. Sistema experimental en Geant 4

En las simulaciones rotamos la posición del PMT del detector de agua a cierto ángulo con respecto del eje vertical para contar el número de fotones detectados en cada posición y determinar así en qué región es más probable que lleguen los fotones producidos por la incidencia de los rayos gamma. En el diagrama de la Fig. 5 observamos la forma en la que medimos el ángulo de inclinación del PMT respecto al centro geométrico de la esfera.

Dado que los muones, o las partículas cargadas en general, también producen señal en el detector de agua debido a que la energía con la que inciden es suficiente para excitar al medio detector de tal forma que produzca fotones ya sea por efecto Cherenkov o por centelleo. Por ello es necesaria la incorporación de los detectores de veto. La condición es la siguiente: si se produce señal en los detectores de veto y en el detector de agua de manera simultánea, podemos decir que ese evento corresponde al paso de una partícula cargada, que por el momento asumimos que se tratan de muones. Pero si en un evento se produce solamente señal en el detector de agua, pero no en ninguno de los detectores de veto, entonces podemos decir con cierta probabilidad que ese evento fue debido al paso de un rayo gamma.

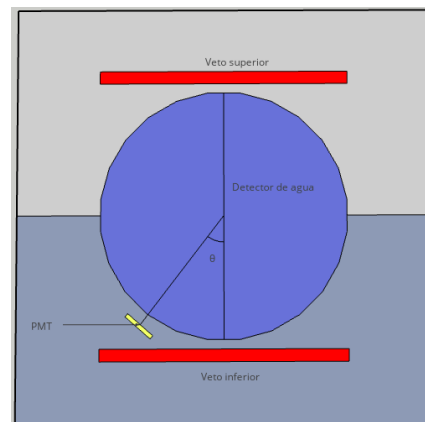


Fig. 5. Vista frontal del sistema experimental.

Lo anterior es debido a que una partícula cargada produce rápidamente fotones por efecto Cherenkov si se cumple la condición de la velocidad de la partícula en el medio, pero en el caso de los rayos gamma debe producirse primero el efecto Compton para que haya la liberación de un electrón que viaje más rápido que la velocidad de la luz en el medio con lo que se producen fotones por efecto Cherenkov. La ocurrencia de un evento del tipo Compton es directamente proporcional al tiempo de interacción del rayo gamma con el medio, si el rayo gamma atraviesa un medio grande aumenta la probabilidad de que interactúe con éste produciendo fotones de diferente manera. Debido a que los detectores de veto tienen un espesor pequeño comparado con la sección transversal del detector de agua, es por ello que entonces la probabilidad de que los rayos gamma produzcan fotones en los vetos es mucho menor que la probabilidad de que produzcan fotones en el detector de agua.

Aplicamos diferentes condiciones de veto para poder estudiar la respuesta del sistema experimental ante la interacción de las partículas primarias con los medios detectores.

El método de coincidencias es un método utilizado para la identificación de rayos cósmicos con carga, la existencia de una señal simultánea en un arreglo de detectores es un indicador de que estas señales fueron producidas por el paso de estas partículas. En la Tabla I mostramos el criterio de evaluación del método de coincidencias.

Usando el Software de diseño AutoCAD realizamos los planos para que se realizaran los cortes de las piezas necesarias para la construcción de los vetos. También tenemos ya las 2 semiesferas que ensamblaremos para la construcción de la esfera detectora, observamos una de las semiesferas en la Fig. 6. Estas piezas son de aluminio y serán ensambladas usando tornillos, también será necesaria la limpieza del material para incrementar o disminuir la reflectancia, según convenga.

III. RESULTADOS

Con la simulación hemos podido medir diferentes propiedades de los fotones ópticos producidos por la interacción de las partículas con el medio detector:

Tabla I. Método de coincidencias.

Detector 1	Veto 1	Veto 2	Salida
1	1	1	1
1	1	0	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	0



Fig. 6. Semiesfera.

distribución angular, energía, longitud de onda, polarización, distribución espacial, etc.

Medir la distribución angular y espacial es de utilidad para determinar la mejor posición del PMT en el detector de agua para garantizar que detectaremos la mayor cantidad de fotones posibles.

En los detectores de veto no hay tanta libertad para colocar los PMTs debido a que estamos restringidos por las dimensiones del sistema experimental.

En la simulación podemos definir y modificar las propiedades reflejantes de los materiales que recubren los medios detectores, con ello podemos determinar qué tan conveniente resulta pulir el interior de los cascarones metálicos para que llegue una mayor cantidad de fotones a los PMTs o si es más conveniente colocar una superficie absorbente para que el proceso de detección sea más rápido.

El estudio de la energía y las longitudes de onda de los fotones detectados sirve para asegurarnos de que los fotones están dentro del rango de detección de los PMTs.

Otra de las principales utilidades de la simulación ha sido para medir la eficiencia de detección para diferentes condiciones de veto, para cada una de las dos partículas diferentes que estamos considerando hasta el momento y para cada una de las posiciones del PMT respecto al eje vertical.

En las siguientes tablas mostramos los resultados más significativos de aplicar el método de coincidencias, la condición anti-veto y los resultados de la medición de la eficiencia de detección. Todos estos resultados los obtuvimos mediante la simulación en Geant4.

A. Método de coincidencias

Primero presentamos los resultados de las pruebas con las condiciones de veto. Para cada prueba disparamos en total 100 partículas (muones o rayos gamma) y contamos por cada disparo el número total de coincidencias para cada condición de veto.

Nos interesa medir si el método de coincidencias funciona para discriminar entre los fotones producidos por rayos gamma y los producidos por muones. El resultado (ver Tabla II) fue que de los 100 rayos gamma disparados en ninguno de esos eventos hubo una señal simultánea en los 3 detectores para ninguna de las diferentes posiciones del PMT del detector de agua. Para el caso de los muones, sí hubo coincidencias sólo en 4 de los 5 casos considerados. Podemos observar que la posición del PMT óptima para detectar fotones producidos por muones es cuando lo colocamos a 45° respecto a la vertical.

El siguiente caso para considerar es la condición anti-veto, en la cual tenemos solamente señal en el detector de agua, pero no ninguno en los vetos. En la Tabla III observamos que esta condición es óptima para detectar gamma si colocamos el PMT de la esfera en un ángulo de 20° o 45°. El problema es que también tenemos una eficiencia muy alta de detección de muones con esta condición, por lo que es necesario usar otras condiciones en conjunto para garantizar que los fotones detectados corresponden con el paso de los rayos gamma y no por la incidencia de una partícula cósmica cargada.

B. Eficiencia de Detección

Ahora presentamos los resultados de las pruebas de la medición de la eficiencia de detección del detector de agua. Disparo 100 partículas primarias (muones o rayos gamma), estas partículas interactúan con el agua dentro de la espera y producen fotones, pero debido a las dimensiones del PMT usado no podemos detectar todos los fotones que se producen, sólo algunos. Es así como medimos la eficiencia de detección, comparando el número de fotones detectado en el PMT con el número total de fotones producidos en todos los eventos.

El primero de los resultados, en la Tabla IV, corresponde a cuando el interior de la esfera está pulido, de tal forma que los fotones son reflejados en el interior, esto provoca que una mayor cantidad de fotones alcancen el PMT e incrementa la eficiencia de detección. En el caso de los rayos gamma, tenemos una mayor eficiencia de detección cuando colocamos el PMT a 20° y 45°, resultado que es análogo al de la condición anti-veto. De manera análoga, la eficiencia de detección de los fotones producidos por muones es máxima en 45°, resultado análogo a los anteriores.

Ahora, en la Tabla V presentamos la eficiencia de detección cuando el interior de la esfera no está pulido. Este resultado nos interesa conocerlo debido a que queremos

Tabla II. Método de coincidencias para rayos gamma y muones incidentes.

Ángulo PMT	Gamma	Muón
0°	0	5
20°	0	3
45°	0	6
90°	0	1
135°	0	0

Tabla III. Condición anti-veto para rayos gamma y muones incidentes.

Ángulo PMT	Gamma	Muón
0°	1.71%	1.69%
20°	1.86%	1.78%
45°	1.91%	1.86%
90°	1.64%	1.68%
135°	1.72%	1.71%

detectar la trayectoria de los fotones producidos, si éstos se reflejan en el interior de la esfera perdemos esta información, pues los fotones podrían estar incidiendo básicamente en cualquier dirección.

La eficiencia en este caso sí disminuye considerablemente en ambos casos, aun así, la eficiencia de detección es mayor en los rayos gamma que la de los muones cuando colocamos el PMT a 0°, a 20° o a 135°.

Esta información es indispensable antes de comenzar el proceso de construcción, pues así podemos verificar si las consideraciones que hemos realizado hasta el momento han sido apropiadas para garantizar el funcionamiento del detector.

Necesitamos pensar en otras condiciones que podemos aplicar para distinguir los fotones que son producidos por diferentes tipos de partículas primarias, aunque de entrada ya tenemos una estimación de en qué dirección se propagan preferentemente los fotones producidos por cada una de estas partículas.

C. Planos de detección

Para conocer la distribución espacial de los fotones producidos por la incidencia de partículas primarias colocamos un plano de detección por debajo de la esfera de agua. En simulaciones preliminares determinamos que la colocación del plano de detección tendría que ser en esta región ya que es donde detectamos una mayor cantidad de fotones comparada con los lados de la esfera.

Queremos determinar si es posible identificar entre los fotones producidos por rayos gamma y los que se producen por la incidencia de muones. En la Fig. 7 mostramos la distribución espacial de los fotones producidos por la incidencia de rayos gamma de 2.22 MeV.

Tabla IV. Eficiencia de detección de fotones con interior de esfera pulido.

Ángulo PMT	Gamma	Muón
0°	7%	50%
20°	10%	54%
45°	10%	46%
90°	2%	34%
135°	7%	32%

Tabla V. Eficiencia de detección con interior de esfera absorbente.

Ángulo PMT	Gamma	Muón
0°	0.063%	0.047%
20°	0.158%	0.166%
45°	0.071%	0.223%
90°	0.029%	0.018%
135°	0.083%	0.017%

Observamos que, si bien no observamos una distribución espacial definida, es posible notar que en la región cercana al centro existe una mayor concentración de fotones. Conforme nos alejamos del centro del plano de detección la cantidad de fotones detectados disminuye. Podemos entonces pensar que para el caso en que incide un rayo gamma es conveniente colocar el PMT en el centro del plano de detección o cerca de este plano para poder detectar una mayor cantidad de fotones.

En la Fig. 8 mostramos la distribución espacial de los fotones producidos por la incidencia de muones de 4 GeV de energía.

En este caso sí tenemos una distribución espacial bien definida, hay un círculo con centro en el centro geométrico del plano de detección y cuyo diámetro coincide con el lado del plano de detección. No sólo la cantidad de fotones producidos por la incidencia de muones es mayor, sino que también tiene una distribución uniforme dentro de la circunferencia formada, es decir, sólo en las esquinas del plano de detección es donde nosotros tendríamos una poca detección de fotones en este caso.

D. Distribución angular

La colocación del PMT en el detector esférico será con un ángulo de inclinación respecto al centro geométrico de la esfera, este ángulo dependerá de la región donde se concentren más fotones producidos por la incidencia de rayos gamma. En las siguientes gráficas mostramos la frecuencia de los fotones como función del ángulo cenital medido respecto del eje vertical.

En la Fig. 9 mostramos la distribución angular de los fotones detectados en el plano de detección por la incidencia de rayos gamma. Observamos que los picos donde detectamos más partículas se encuentran en

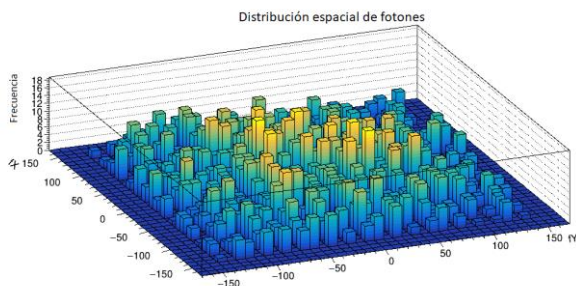


Fig. 7. Distribución espacial de fotones producidos por la incidencia de 100 rayos gamma.

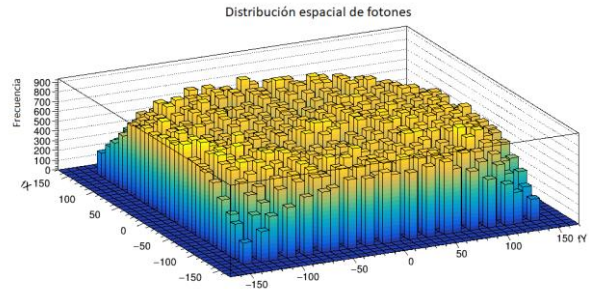


Fig. 8. Distribución espacial de fotones producidos por la incidencia de 100 muones.

ángulos pequeños, también hay una mayor concentración de fotones en ángulos entre 30° y 45°.

En la Fig. 10 mostramos la distribución angular de los fotones detectados en el plano de detección por la incidencia de muones. Es evidente que, tanto por la cantidad de fotones como por la ubicación del pico máximo de detección (aproximadamente 45°) es conveniente evitar esta región de ángulos de colocación del PMT debido a que detectaríamos mayormente fotones producidos por muones y no por rayos gamma.

E. Distribución de longitudes de onda

Otro de los criterios considerados para la distinción entre los fotones producidos es la distribución de longitudes de onda.

En la Fig. 11 y Fig. 12 mostramos la distribución de las longitudes de onda de los fotones producidos por la incidencia de rayos gamma y muones, respectivamente.

Observamos que la única diferencia en ambas gráficas es la cantidad de fotones detectados, de ahí en más el rango de longitudes de onda y la distribución de las gráficas es básicamente la misma. Tenemos un mayor número de fotones detectado en 300 nm y conforme incrementa la longitud de onda detectamos cada vez menos fotones, teniendo un corte en 620 nm.

Por lo anterior, no podemos usar la propiedad de la longitud de onda de los fotones producidos debido a que ambas partículas primarias producen fotones con las mismas propiedades.

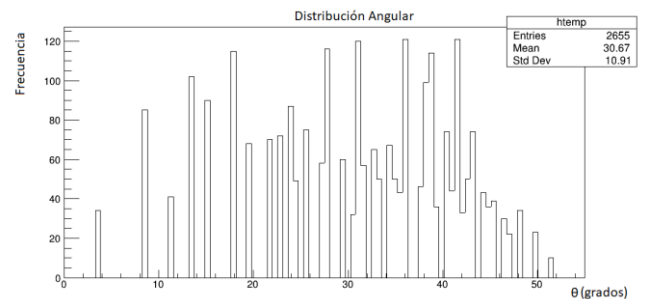


Fig. 9. Distribución angular de fotones producidos por la incidencia de 100 rayos gamma.

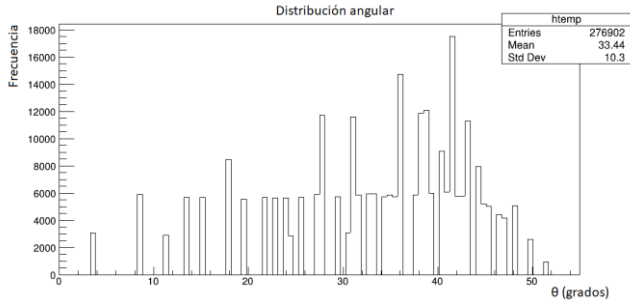


Fig. 10. Distribución angular de fotones producidos por la incidencia de 100 muones.

IV. DISCUSIÓN

Con los resultados de la simulación hemos notado los siguientes puntos importantes a considerar.

La producción de fotones ópticos se lleva a cabo por dos procesos: o por centelleo o por radiación Cherenkov, independientemente de la partícula primaria disparada.

La producción de fotones por Cherenkov es dominante, del 100% de fotones producidos aproximadamente dos terceras partes son por Cherenkov.

El total de fotones producidos por muones es mucho mayor que el total de fotones producidos por rayos gamma. Si bien, la condición anti-veto aplica para muones y rayos gamma, un resultado fundamental obtenido es que en ninguno de los eventos obtuvimos señal simultánea en los 3 detectores, por lo que si se cumple esta condición es evidencia suficiente para decir que ese evento fue producido por el paso de una partícula cargada.

La detección de fotones producidos por rayos gamma en el detector de agua se ve mejorada si colocamos el PMT a ángulos pequeños respecto a la vertical, resultado que observamos directamente.

El aire no es un buen medio de detección. Reemplazando en la simulación el agua dentro de la esfera por aire concluimos que puede funcionar para detectar partículas cargadas, pero con mucha menor eficiencia. Sin embargo, el aire no sirvió en ninguno de los casos para detectar rayos gamma, con lo que determinamos que es necesario usar

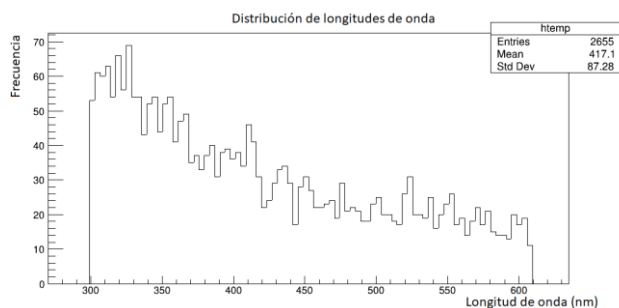


Fig. 11. Longitudes de onda de fotones producidos por la incidencia de 100 rayos gamma.

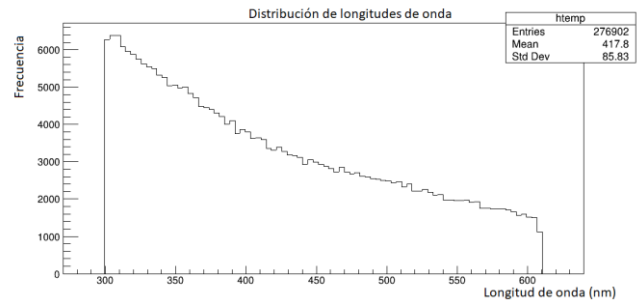


Fig. 12. Longitudes de onda de fotones producidos por la incidencia de 100 muones.

siempre materiales de detección que tengan como mínimo el índice de refracción del agua y su densidad.

Es posible identificar fotones producidos por Cherenkov y por Centelleo cuando la partícula primaria es un muon, pero cuando disparamos rayos gamma no hay distinción entre ambas formas de producción. De cualquier forma, la identificación de la forma de producción en el medio detector no es un buen criterio para determinar si los fotones fueron producidos por rayos gamma o por muones, ya que la distribución espacial de estos fotones se traslapa aun si las partículas primarias incidentes son diferentes.

Los rayos gamma de 2.22 MeV de energía producen fotones ópticos con una mayor concentración en el centro del plano de detección.

Rayos gamma con energías del orden de keV o inferiores no producen fotones ópticos.

Rayos gamma con energías del orden de GeV producen muchos fotones ópticos, pero no están dirigidos al centro del plano de detección.

Además, no existe distinción entre los fotones producidos por la incidencia de muones con carga negativa y los muones con carga positiva, ambas partículas primarias producen fotones con las mismas características.

V. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos sabemos que, si nosotros colocamos el PMT en el centro o cerca del centro del plano de detección, no sólo vamos a detectar fotones producidos por rayos gamma, sino que serán los fotones producidos por los rayos gamma en el rango de energía que a nosotros nos interesa.

Debido a que no podemos resolver de forma analítica la manera en que las partículas cósmicas interactúan con la materia, la simulación es una herramienta poderosa para poder comprobar si las consideraciones que estamos tomando en nuestro sistema experimental serán suficientes para la detección del Deuterio. Debemos seguir mejorando la simulación conforme el trabajo avanza para poder afinarla y obtener resultados comparables a las mediciones que realicemos en el laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Partículas Elementales, a la DAIP, Universidad de Guanajuato, y a CONACYT, por el apoyo brindado para realizar la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Nasa, “Manchas solares y llamaradas solares”, Estados Unidos, 2019.
Página Web: <https://spaceplace.nasa.gov/solar-activity/sp/>
- [2] T.A. Price; D.J. Forrest; E.L. Chupp; G. KanbachG and G.H Share, “The Time History of 2.22 MeV Line Emission in Solar Flares”, California Institute of Technology, University of New Hampshire, Max Planck Institute for extraterrestrial Physics in Germany and Naval Research Laboratory in Washington, DC, 1983.
- [3] Alan Smale, “Gamma-ray Detectors Introduction”, Estados Unidos, 2018.
Available:
https://imagine.gsfc.nasa.gov/observatories/technology/gammaray_detectors1.html
- [4] J. G. Stacy and W. T. Vestrand, “Gamma-Ray Astronomy”. Encyclopedia of Physical Science and Thechnology (Third Edition), United States, 2003.
- [5] Photosensor Modules H10493 Series. Hamamatsu.
Available: www.hamamatsu.com