

Estudio de la producción de fotones por incidencia de partículas relativistas eléctricamente cargadas en diferentes materiales

Noemí L. Moreno¹, J. Félix¹

¹División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, León, México

E-mail: nl.morenolopez@ugto.mx, felix@fisica.ugto.mx

Resumen — A la fecha no se ha reportado la emisión de fotones en metales por incidencia de partículas con carga eléctrica. Para estudiar este efecto, simulamos en Geant4 un sistema experimental que consta de un bloque de Aluminio de 10 cm x 10 cm x 10 cm y seis detectores de 10 cm x 10 cm x 1 mm unidos a las caras del bloque de Aluminio, y estudiamos la producción de fotones por centelleo, Cerenkov y transición en Aluminio por la incidencia de partículas relativistas eléctricamente cargadas. Presentamos detalles de la simulación, de los resultados obtenidos, y el uso de esta información.

Palabras Claves – Aluminio, Centelleo, Cerenkov, Fotón, Partículas con carga eléctrica, Transición.

Abstract — To date the emission of photons in metals due to the incidence of electrically charged particles has not been reported. To study this phenomenon, we simulate in Geant4 an experimental system consisting of a 10 cm x 10 cm x 10 cm Aluminum block and six 10cm x 10cm x 1 mm detectors attached to the faces of the Aluminum block, with which we observe the production of photons by scintillation, Cerenkov and transition in Aluminum by the incidence of electrically charged relativistic particles. We present details of the simulation, of the obtained results, and the use of this information.

Keywords — Aluminum, Cerenkov, electrically charged particles, Photon, Scintillation, Transition

I. INTRODUCCIÓN

La forma de medir las propiedades físicas de una partícula ha sido a través de las *técnicas de detección* de las partículas. Para este efecto, son necesarias una *fente de partículas* y una *forma de detección de las partículas*; las fuentes pueden ser de origen nuclear, radioactivo, óptico o cósmico [1, 2] y las formas de detección son variadas.

Un *detector de partículas* es un instrumento para medir propiedades de una partícula [3]. Detectamos partículas elementales a través de su interacción con el medio de detección. En la interacción, la partícula deja un rastro de energía. El resultado de la interacción partícula incidente y medio de detección es la emisión de fotones, la producción de iones o ambas. Amplificamos el pequeño rastro de energía hasta un nivel de medición donde podemos usar instrumentos convencionales.

Podemos clasificar las interacciones de partículas incidentes con el medio de detección dependiendo de las propiedades de la partícula incidente. También podemos clasificar las interacciones por el tipo de interacción: electromagnética, interacción fuerte, interacción débil [4]. Algunas de estas interacciones son las siguientes:

- Detección de partículas con carga eléctrica (interacciones electromagnéticas: Ionización, Bremsstrahlung, Cerenkov, ...).
- Detección de rayos gamma (interacciones electromagnéticas: efecto Compton, producción de pares).
- Detección de neutrones (interacciones fuertes).
- Detección de neutrinos (interacciones débiles).

A. Interacciones electromagnéticas

En interacciones electromagnéticas, la pérdida de energía de la partícula incidente es debido a la producción de iones, a la emisión de fotones, o ambas. Una forma de clasificar las interacciones electromagnéticas de acuerdo al tipo de interacciones es la siguiente [5]:

- *Producción de iones*: interacciones con los electrones atómicos. Pérdida de energía de la partícula incidente por ionización, excitación de los átomos del material.
- *Emisión de fotones*: debido a
 - Interacciones con los núcleos atómicos. Partícula incidente es dispersada, puede haber fotones por Bremsstrahlung.
 - Cuando $v > c/n(\lambda)$, donde v es la velocidad de la partícula incidente, c la velocidad de la luz en el vacío, n el índice de refracción del medio de detección y λ la longitud de onda, se manifiesta radiación Cerenkov.
 - Cuando la partícula cruza una interface entre dos medios con distintas permitividades $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$, se produce radiación de transición.

B. Interacciones electromagnéticas, pérdida de energía de la partícula incidente por la emisión de fotones

Cada forma de producción de fotones es caracterizada por una serie de variables, mostramos algunas de estas

variables en la Tabla I. Las formas de producción de fotones por interacciones partícula incidente eléctricamente cargada con el medio de detección reconocidas en la actualidad son radiación tipo *Bremsstrahlung*, *fotones producidos por la excitación-des-excitación de los átomos del material de detección denominado Centelleo*, *Cerenkov* y *transición*.

TABLA I.
PROPIEDADES DE LOS FOTONES PRODUCIDOS POR LA INTERACCIÓN
PARTÍCULA INCIDENTE ELÉCTRICAMENTE CARGADA – MEDIO DE
DETECCIÓN.

Propiedad de fotones por forma de producción	Bremsstrahlung	Centelleo	Cerenkov	Transición
Distribución angular	-	Uniforme	Pico de emisión	Pico de emisión
Polarización	Sí	No	Sí	Sí
Espectro de emisión	Rayos X	UV - Visible	UV - Visible	Rayos X - Visible
dE/dx	Sí	Sí	Sí	No

C. Simulación de detectores

En Física de Altas Energías (HEP, por sus siglas en inglés), las simulaciones nos sirven para imitar -simular- lo que sucede en los sistemas experimentales [6].

Comparar la simulación con lo que los científicos miden durante las observaciones les permite comprender las condiciones y el rendimiento experimental, también les sirve para interpretar los resultados.

Monte Carlo

Monte Carlo es un enfoque matemático que utiliza una secuencia de números aleatorios para resolver un problema [7].

Monte Carlo está presente desde la planeación de un sistema experimental. Su implementación puede deberse a lo siguiente:

- Estudiar rendimiento de detectores.
- Estudiar la eficiencia y selección de la muestra para el análisis.
- Buscar efectos innecesarios, de fondo, o ruido.
- Comparar los resultados de varios modelos, la teoría no es bien conocida.

Geant4 (GEometry And Transport) es un paquete de software libre basado en C++ compuesto de herramientas que se pueden utilizar para simular con precisión el paso de partículas a través de la materia [8].

La arquitectura de Geant4 inicia con el “núcleo”, al que ingresa información como la *implementación de la geometría*, *acciones del usuario*, *modelos físicos* y *generadores primarios*. La salida consta de *depósito de energía*, *generación de secundarios (resultados de Monte Carlo)* y *visualización*.

II. METODOLOGÍA

La *motivación* de este trabajo surge cuando detectamos fotones en el rango visible con foto-detectores unidos a un bloque de Aluminio. Nuestras primeras preguntas fueron "¿Hay fotones producidos en el seno del Aluminio?", "¿Cómo comprobamos que son efectivamente fotones, y que provienen del Aluminio?", "¿Cuáles son las características de estos fotones?", "¿Estos fotones se producen por la incidencia de partículas relativistas con carga eléctrica en el Aluminio?", luego "¿Cuál forma de producción que produce estos fotones?".

A. Objetivo general

En la Referencia [9] se estudia un sistema experimental con el que se comprueba la producción de fotones en Aluminio, algunas de sus características, y se valida su producción por la incidencia de rayos cósmicos.

Nuestro *objetivo general* es tratar de mostrar por cuál forma de producción se producen fotones en el Aluminio cuando partículas relativistas con carga eléctrica inciden en él. Algunos objetivos específicos son:

- Producir una simulación de un sistema experimental en el que podamos observar la producción de fotones en metales.
- En la simulación, extraer información de los fotones que se producen en el metal (propiedades de los fotones como las mostradas en la Tabla I), por diferentes formas de producción para comparar sus características. El objetivo es encontrar variables que nos sirvan para aceptar o descartar formas de producción de fotones en metales por incidencia de partículas relativistas con carga eléctrica.

B. Planeación

Planeamos simular un sistema experimental que consta de una geometría hecha de metal acompañada de detectores en una atmósfera de aire. Producimos diferentes procesos físicos en el metal que resultan en la emisión de fotones, luego los detectamos con los detectores y posteriormente estudiamos las características de los fotones que logran escapar de la geometría hecha de metal.

C. Simulación en Geant4

La simulación en Geant4 consta de tres partes principales: *descripción de los detectores*, *selección de procesos físicos* y

generación de eventos primarios. Describimos brevemente cada parte, además de las tareas adicionales que desarrollamos en la simulación.

Descripción de detectores

Seleccionamos como metal de prueba al Aluminio y como geometría un cubo de 10 cm de arista. El cubo de Aluminio (CA) está rodeado por detectores, un detector por cada cara del cubo de 10 cm x 10 cm x 0.1 cm. Todos estos elementos del sistema experimental los posicionamos en una atmósfera de aire a una atmósfera de presión.

El procedimiento consta en lanzar partículas -electrones o muones, a diferentes energías- al CA, la dirección del momento de las partículas coincide con el eje z del sistema coordinado mostrado en la Fig. 1. Las partículas provienen desde -z, hasta +z, atravesando el Aluminio en su camino, como mostramos en la Fig. 2.

Los volúmenes detectores los identificamos como Detector 1 y Detector 3 (perpendiculares a la dirección de la partícula incidente y al eje z, por donde sale y entra la partícula incidente, respectivamente), Detector 2 y Detector 4 (perpendiculares al eje x, paralelos a la dirección de la partícula incidente), y Detector 5 y Detector 6 (perpendiculares al eje y, paralelos a la dirección de la partícula incidente). En la Fig. 3 mostramos el posicionamiento de los volúmenes detectores.

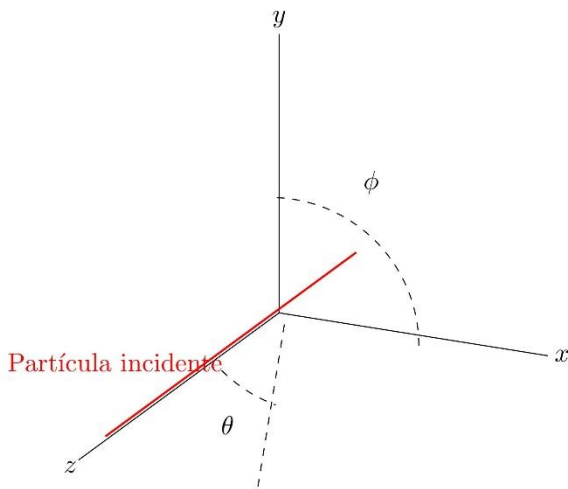


Figura 1. Sistema coordinado y dirección de la partícula incidente en la simulación.

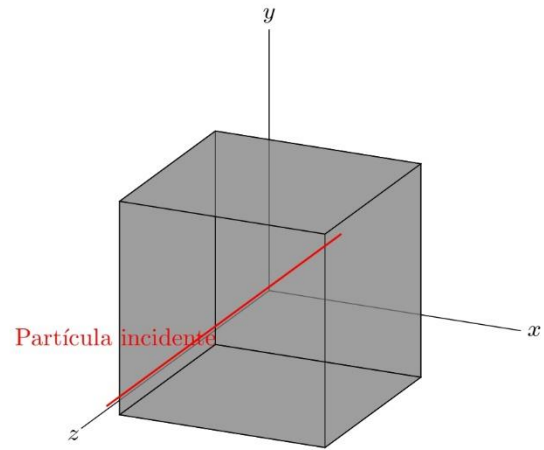


Figura 2. Posicionamiento del cubo de Aluminio de 10 cm de arista con centro geométrico en el origen del sistema coordinado de la simulación.

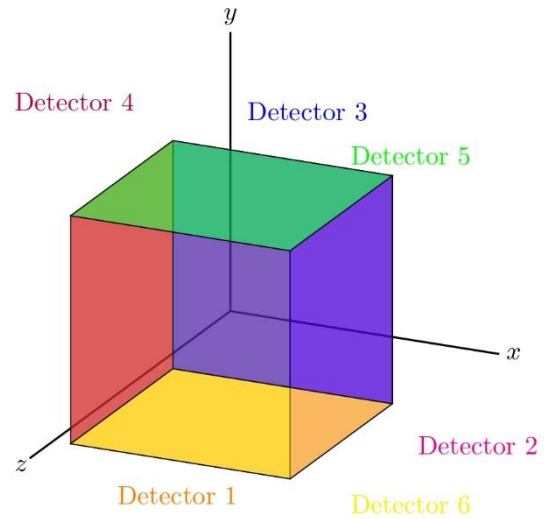


Figura 3. Posicionamiento de los volúmenes detectores (Detector 1, Detector 2, Detector 3, Detector 4, Detector 5 y Detector 6) en la simulación.

Generación de eventos primarios

Consideramos un evento el lanzamiento de un muon μ^+ de 4 GeV. El muon se mueve desde $-z$ hasta $+z$ por la cara del CA unida al Detector 3 y sale por la cara del CA unida al Detector 1 en una región de 5 mm x 5 mm en el centro de las caras del CA mencionadas. Mostramos la entrada y salida de los μ^+ en el CA en la Fig. 4.

Cada corrida/ejecución de la simulación se compone de 100 eventos.

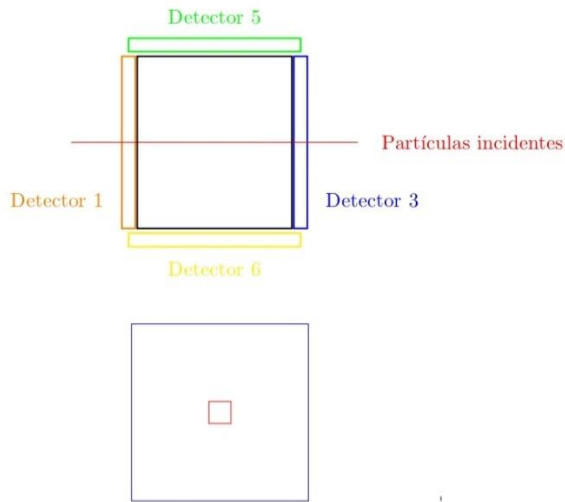


Figura 4. Dirección de los μ^+ que inciden por la cara del CA unida al Detector 3 en una región de 5 mm x 5 mm.

Selección de procesos físicos

La emisión de fotones en la región visible del espectro electromagnético (región donde detectan los foto-detectores comerciales actualmente) debida a la interacción partícula con carga eléctrica – medio de detección está tipificada como *Centelleo, radiación tipo Cerenkov y radiación de transición*.

Incluimos estos procesos en nuestra simulación, para observarlos estamos condicionados a características que dependen del tipo de generador primario y a los materiales definidos.

Algunas condiciones por el tipo de generador primario, por proceso son los siguientes:

- Centelleo: la partícula incidente no debe ser un fotón óptico, y no debe ser una partícula de vida corta.
- Cerenkov: la partícula incidente debe tener carga eléctrica diferente de cero, no debe tener una vida corta, no debe ser un geantino, y se debe superar la condición de Cerenkov.
- Transición: la partícula incidente debe tener carga eléctrica diferente de cero, y no debe tener una vida corta.

Algunas condiciones por el tipo de materiales definidos con los que el generador primario interactúa, por proceso son los siguientes:

- Centelleo: índice de refracción y espectro de emisión del material definido, fotones por energía incidente, número de fotones por paso de partícula primaria, tiempo de caída, etc.

- Cerenkov: de la condición de Cerenkov tenemos que $v > c/n$, o $n > c/v > 1$, donde n es el índice de refracción, c la velocidad de la luz en el vacío y v la velocidad de la partícula incidente [5], longitud de absorción.
- Transición: índice de refracción definido en todos los materiales donde existan interfaces.

Colección de información procedente de la interacción μ^+ -Aluminio

Del restante de clases definidas en la simulación de Geant4, filtramos de todas las partículas detectadas (iones, fotones), los fotones que se producen y escapan del Aluminio, que además logran ser detectados por los detectores. De éstos extrajimos la siguiente información: proceso de creación, posición en la que son detectados por los detectores, momento, energía, punto de creación, además de la polarización por proceso de creación.

III. RESULTADOS

Comparamos algunas variables físicas observables extraídas de las características de los fotones producidos en medios detectores, por diferentes formas de producción de fotones. Las variables con las que comparamos las características de los fotones por proceso de creación son los siguientes:

- Distribución angular de los fotones detectados (por proceso de creación de los fotones).
- Distribución espacial de los fotones detectados (por proceso de creación de los fotones).
- Espectro de emisión de los fotones detectados (por proceso de creación de los fotones).
- Polarización.

Observamos primero las características de los fotones cuando son emitidos por materiales prediseñados de Geant4 (centellador inorgánico NaI que emite fotones por Centelleo, aerogel $-\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{C}-$ que emite fotones tipo Cerenkov, láminas de Aluminio en las que se emite radiación de transición), posteriormente observamos las características de los fotones producidos en el Aluminio para comprobar que las características de los fotones emitidos por un proceso específico en un material donde sabemos que se produce dicho proceso, sean las mismas características que tienen los fotones emitidos por el mismo proceso, pero en Aluminio.

A. Materiales prediseñados en Geant4

Observamos Centelleo en un material centellador inorgánico NaI (μ^+ de 4 GeV como generador primario), observamos Cerenkov en un aerogel (μ^+ de 4 GeV como generador primario), y observamos radiación de transición en la interface de 220 láminas de radiadores y aire (p^+ de 100 GeV como generador primario). Las variables que comparamos entre procesos: distribución angular y espacial, espectro de

emisión y polarización las mostramos en las subsecciones siguientes.

En 1 evento observamos 554 fotones producidos por Centelleo en el NaI que lograron ser detectados, en 1 evento observamos 3,111 fotones producidos por Cerenkov en el aerogel que lograron ser detectados, en 5,000 eventos observamos 13,709 fotones producidos por transición en la transición de láminas de radiador y aire que lograron ser detectados.

Espectro de emisión de los fotones producidos en materiales prediseñados de Geant4

En las Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7 mostramos el espectro de emisión de los fotones emitidos de materiales prediseñados en Geant4. Los fotones son producidos por Centelleo, Cerenkov y transición, respectivamente. Notamos en las Fig. 5 y Fig. 6 (eje horizontal es la longitud de onda de los fotones detectados, eje vertical el número de fotones contados por bin) que los fotones emitidos por Centelleo y Cerenkov se encuentran en la región ultravioleta y visible del espectro electromagnético. De acuerdo a la Fig. 7 (eje horizontal es energía de los fotones detectados en MeV, eje vertical el número de fotones contados por bin), el espectro de emisión de los fotones por transición se encuentra en la región de Rayos-X.

El espectro de emisión es una variable que nos permite distinguir entre radiación tipo Centelleo, Cerenkov y de transición. Aunque las dos primeras se producen en la región del visible, la cantidad de radiación en cada rango de longitudes de onda es diferente, i.e., podríamos encontrar rangos de la longitud de onda λ en los que haya radiación tipo Centelleo y no Cerenkov, o viceversa. La probabilidad de que se produzcan fotones en el visible por transición vemos que es muy pequeña, prácticamente cero, aun cuando tenemos una cantidad considerable de interfaces.

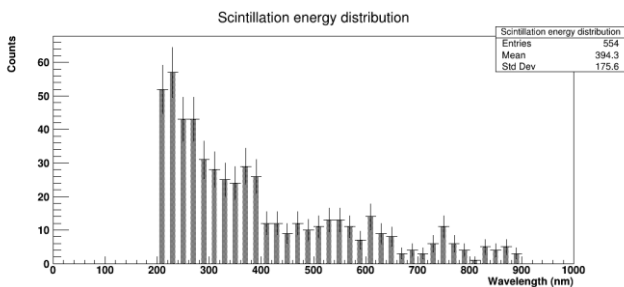


Figura 5. Espectro de emisión de los fotones producidos por Centelleo en NaI por la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV.

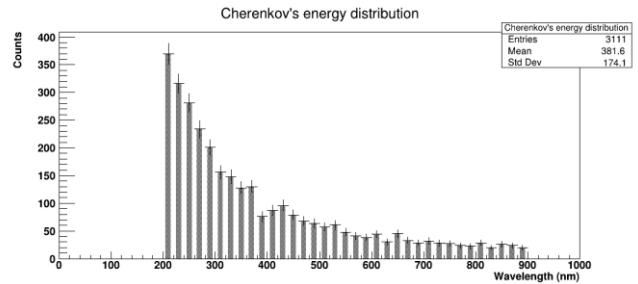


Figura 6. Espectro de emisión de los fotones tipo radiación Cerenkov en un aerogel por la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV.

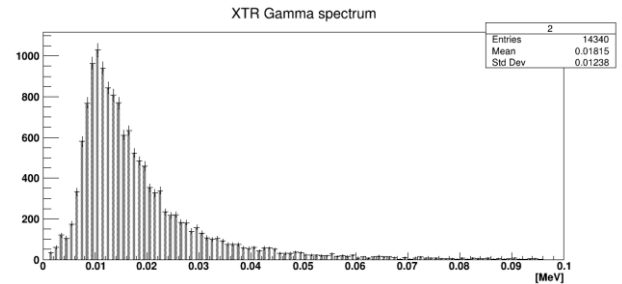


Figura 7. Espectro de emisión de los fotones producidos por radiación de transición en la interface de un radiador y aire, por la incidencia de partículas p^+ de 4 GeV.

Distribución angular de los fotones producidos por diferentes formas de producción en materiales prediseñados de Geant4

En las Fig. 8 y Fig. 9 mostramos la distribución angular de los fotones producidos por Centelleo en el centellador inorgánico que lograron ser detectados por alguno de los detectores Detector 1, o Detector 2, o Detector 3, o Detector 4, o Detector 5, o Detector 6. El eje horizontal representa el ángulo en radianes, el eje vertical el número de cuentas.

Observamos que estos fotones producidos por Centelleo tienen una distribución uniforme en las dos direcciones angulares $\theta \in [0, \pi], \phi \in [0, 2\pi]$, i.e., los fotones se producen en el centellador, y se trasladan en todas las direcciones.

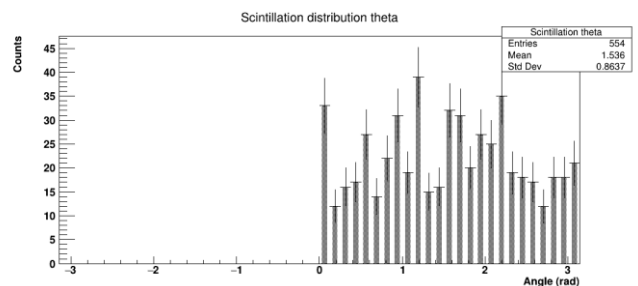


Figura 8. Distribución angular en θ de los fotones producidos por Centelleo debido a la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV en un plástico centellador.

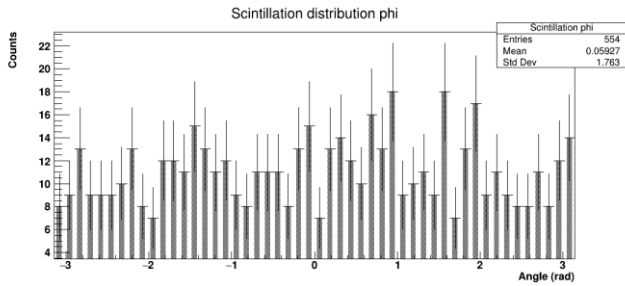


Figura 9. Distribución angular en ϕ de los fotones producidos por Centelleo debido a la incidencia de partículas μ^+ de 4GeV en un plástico centellador.

En el caso de la radiación Cerenkov en el aerogel, mostramos la distribución angular en las Fig. 10 y Fig. 11. La radiación tiene una dirección bien definida en θ , y se produce uniformemente en todos los valores $\phi \in [0, 2\pi)$. En el caso de la radiación tipo Cerenkov observamos que para este material el 100% de los fotones detectados se trasladan en la dirección en la que se mueve la partícula incidente, i. e., hacia adelante.

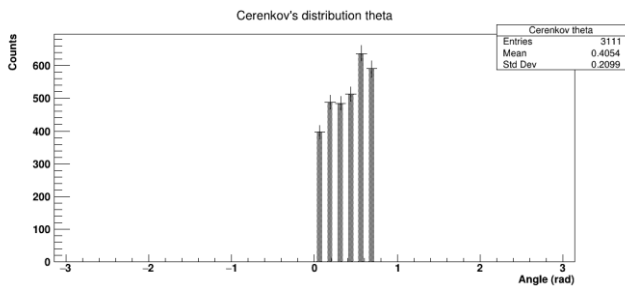


Figura 10. Distribución angular en θ de los fotones tipo Cerenkov debido a la incidencia de partículas μ^+ de 4GeV en un aerogel.

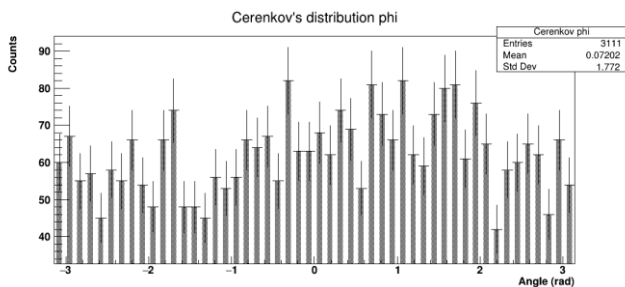


Figura 11. Distribución angular en ϕ de los fotones tipo Cerenkov debido a la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV en un aerogel.

En el caso de la radiación de transición, mostramos la distribución angular en las Fig. 12 y Fig. 13. Observamos una dirección bien definida de los fotones producidos en las láminas de radiador en la dirección θ , con un $\theta \approx 0$, en cuanto a la dirección de ϕ , los fotones se producen uniformemente en el rango donde está definido ϕ . La apertura con respecto a la dirección de la partícula incidente y la dirección de los fotones detectados es muy pequeña.

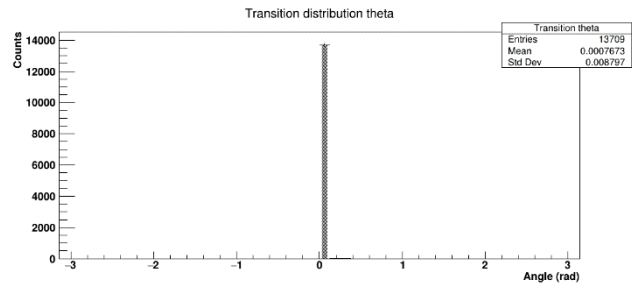


Figura 12. Distribución angular en θ de los fotones producidos por transición en la interface de radiador y aire, debido a la incidencia de partículas p^+ de 100 GeV.

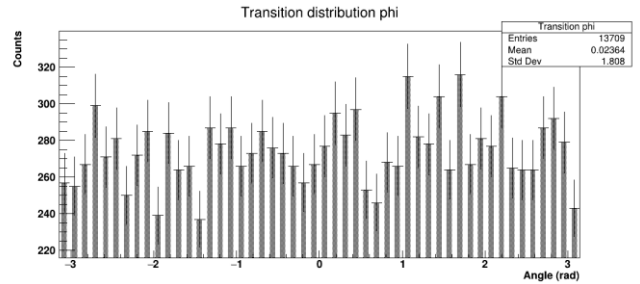


Figura 13. Distribución angular en ϕ de los fotones producidos por transición en la interface de radiador y aire, debido a la incidencia de partículas p^+ de 100GeV.

Las variables angulares son una forma de identificar la radiación tipo Centelleo, Cerenkov y de transición, debido a que observamos, la radiación tipo Centelleo tiene la distribución más uniforme, los fotones se pueden propagar hacia atrás y hacia adelante casi con la misma probabilidad. La radiación tipo Cerenkov se produce mayormente hacia adelante, con una probabilidad muy pequeña de que los fotones producidos se propaguen hacia atrás. La radiación tipo transición tiene una dirección de propagación bastante similar a la dirección de la partícula incidente, con un pico cercano a $\theta \approx 1/\gamma$ [5].

Distribución espacial de los fotones producidos por diferentes formas de producción en materiales prediseñados de Geant4

La distribución espacial sirve para definir la posición de los detectores en un sistema experimental en el laboratorio. Es necesario saber la forma de producción de fotones en metales, y el posicionamiento de los detectores sirve para descartar formas de producción, o para elegir una en particular.

En las Fig. 14 mostramos las posiciones donde se detectaron los fotones producidos en el seno de un centellador inorgánico por Centelleo. Los ejes representan los ejes coordenados cartesianos. Los detectores paralelos a la dirección de la partícula incidente (Detector 2, Detector 4, Detector 5 y Detector 6) muestran detecciones uniformes en toda el área de detección, i.e., el detector en el laboratorio

puede posicionarse en cualquier parte de las caras laterales de la geometría cúbica, y observaríamos cuentas similares.

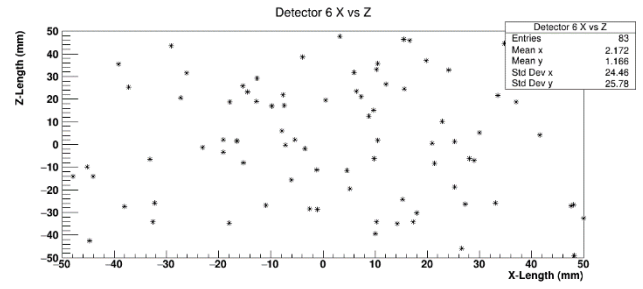
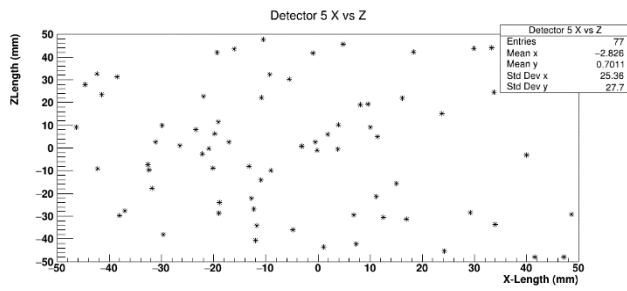
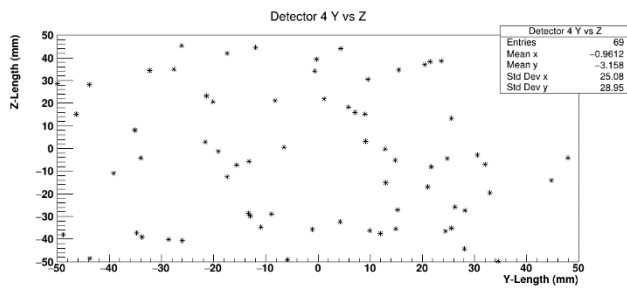
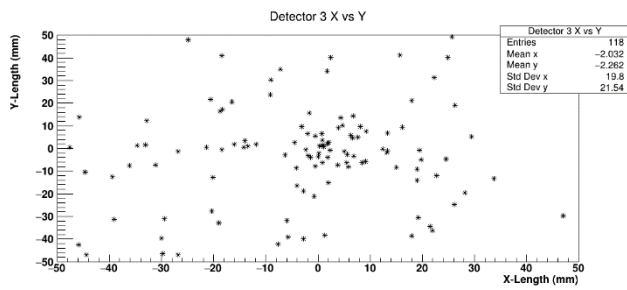
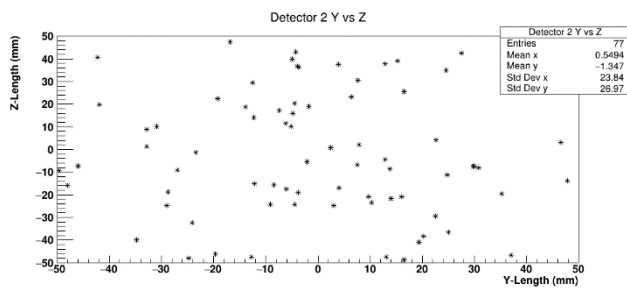
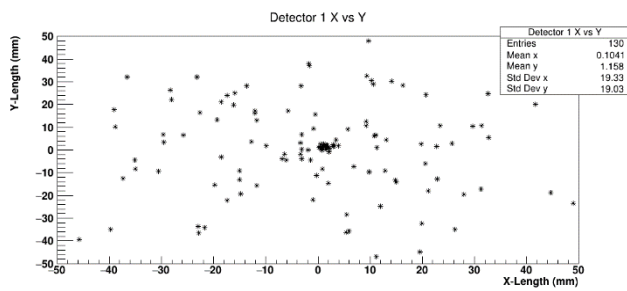


Figura 14. Distribución espacial de los fotones detectados, producidos por Centelleo en el centellador inorgánico.

En la Fig. 15 mostramos sólo las posiciones de las detecciones en el Detector 1, debido a que todas las detecciones se llevaron a cabo en este detector, en los demás detectores no hubo ninguna detección.

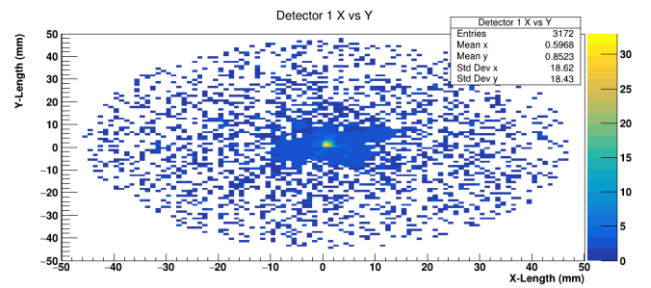


Figura 15. Distribución espacial de los fotones detectados, producidos por Cerenkov en el aerogel.

En la Fig. 16 observamos las detecciones de los fotones producidos por transición. En este caso todas las detecciones se realizaron hacia adelante (por donde sale la partícula incidente).

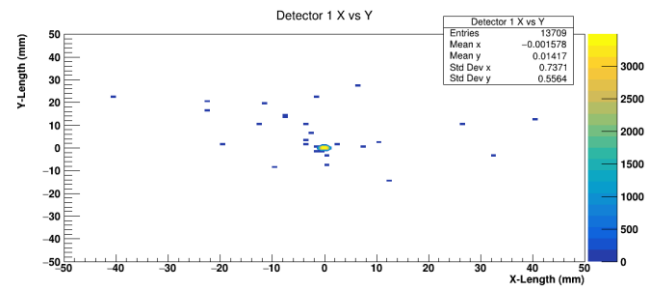


Figura 16. Distribución espacial de los fotones detectados, producidos por transición en la transición de las láminas del radiador y aire.

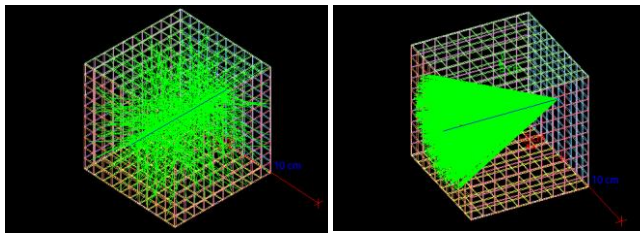
La distribución espacial de las detecciones es una forma de identificar la radiación tipo Centelleo, Cerenkov y de transición, porque la concentración de fotones es diferente en todas. El número de fotones emitidos por Centelleo y Cerenkov incrementa a medida que incrementamos el espesor del material, pero la concentración de éstos en cada forma de producción es diferente. Mientras que podemos detectar prácticamente la misma cantidad de fotones en cualquier

posición de los detectores en las caras laterales en el caso de la radiación por Centelleo, en el caso de Cerenkov, cuando colocamos los detectores a mayores espesores obtenemos mayor cantidad de fotones detectados. La cantidad de fotones por transición no es función del espesor del material.

Polarización de los fotones producidos por diferentes formas de producción

Otra forma de identificar un tipo específico de radiación es por su vector de polarización. La radiación Cerenkov y la radiación de transición están polarizadas, la radiación por Centelleo no [5]. Podemos determinar el vector de polarización de la radiación emitida por un medio detector interponiendo un polarizador entre el medio detector y el foto-detector.

En la Fig. 17 mostramos una visualización en Geant4 de nuestro sistema experimental con los diferentes tipos de radiación. En el caso de transición sólo mostramos el sistema experimental.



(a) Radiación por Centelleo en el centellador inorgánico. (b) Radiación por Cerenkov en el aerogel.

(c) Radiación por transición en la transición de radiador y aire.

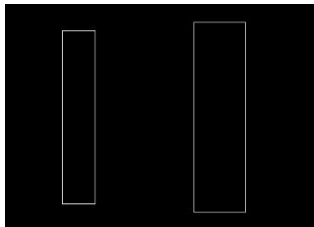


Figura 17. Visualización de diferentes procesos físicos en diferentes materiales prediseñados en Geant4.

B. Aluminio

Observamos procesos de Centelleo, Cerenkov y transición en un cubo de Aluminio de 10 cm de arista. Las variables que comparamos entre procesos: distribución angular y espacial, espectro de emisión y polarización las mostramos en las subsecciones siguientes.

En 100 eventos (1 evento es el lanzamiento de un μ^+ de 4 GeV) observamos 164,271 fotones producidos por Centelleo que lograron ser detectados, en 100 eventos (1 evento es el lanzamiento de un μ^+ de 4 GeV) observamos 43,519 fotones

producidos por Cerenkov que lograron ser detectados, en 100 eventos (1 evento es el lanzamiento de un μ^+ de 200 GeV) no observamos fotones producidos por transición que lograron ser detectados.

Espectro de emisión de los fotones producidos en Aluminio

En la Fig. 18 (eje horizontal es la longitud de onda de los fotones detectados, eje vertical el número de fotones contados por bin) mostramos el espectro de emisión de los fotones producidos por Centelleo en el Aluminio. El espectro de emisión se encuentra entre el ultravioleta y el visible, corresponde a las líneas de emisión del Aluminio ionizado [10].

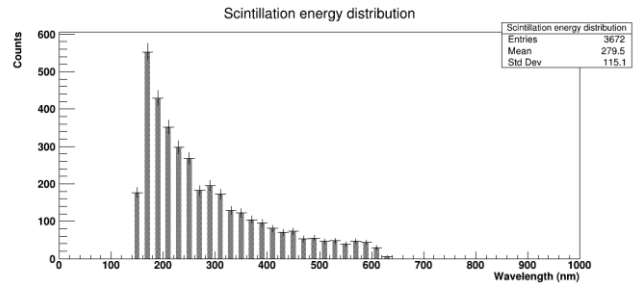


Figura 18. Espectro de emisión de los fotones producidos por Centelleo en Aluminio por la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV.

En la Fig. 19 mostramos el espectro de emisión de los fotones producidos por Cerenkov en Aluminio. El espectro de emisión se encuentra en la región del visible, en el rango de longitudes de onda para las cuales el índice de refracción supera la condición de Cerenkov [11].

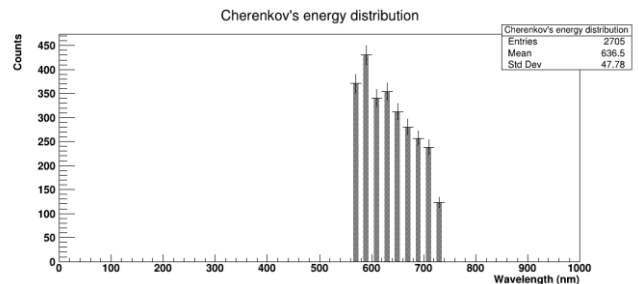


Figura 19. Espectro de emisión de los fotones producidos por Cerenkov en Aluminio por la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV.

No mostramos el espectro de emisión de los fotones producidos por transición, debido a que con nuestra configuración experimental y con la energía de la partícula incidente, no se produjo ningún fotón por esta forma de producción.

El espectro de emisión es una variable que nos permite distinguir entre radiación tipo Centelleo y Cerenkov en el Aluminio. Al comparar las Fig. 18 y Fig. 19 notamos que existen rangos en longitudes de onda para los cuales se produce radiación tipo Centelleo en el visible y no se produce

radiación tipo Cerenkov, y viceversa. Si se produce radiación tipo Centelleo en el Aluminio, entonces debemos observar con filtros que, en mayoría, los fotones se encuentran efectivamente en longitudes de onda $\lambda < 630$ nm, aproximadamente. En cambio, si se produce radiación tipo Cerenkov en el Aluminio, con filtros debemos observar que los fotones se encuentran en mayoría, en las regiones $\lambda > 570$ nm.

Distribución angular de los fotones producidos por diferentes formas de producción en Aluminio.

En las Fig. 20 y Fig. 21 mostramos la distribución angular de los fotones producidos por Centelleo en Aluminio que lograron ser detectados por alguno de los detectores: Detector 1, o Detector 2, o Detector 3, o Detector 4, o Detector 5, o Detector 6. El eje horizontal representa el ángulo en radianes, el eje vertical el número de cuentas.

Observamos que estos fotones producidos por Centelleo tienen una distribución uniforme en las dos direcciones angulares $\theta \in [0, \pi], \varphi \in [0, 2\pi)$, i.e., se produce una cantidad similar de fotones en todas las direcciones del espacio, con un poco mayor de concentración en la dirección en la que se mueve el generador primario (partícula incidente), que corresponde a la dirección $\theta = 0$. Si los fotones detectados que van “hacia adelante” (N_f) los consideramos como aquellos que fueron detectados en una dirección $\theta \leq \pi/2$, y los fotones detectados que van “hacia atrás” (N_b) que corresponden a los fotones con dirección $\theta > \pi/2$, la relación que obtenemos entre los que van “hacia atrás” comparados con los que van “hacia adelante” es $N_b/N_f = 0.523709$. Un poco más del doble de los fotones se trasladan en la dirección en la que avanza la partícula incidente.

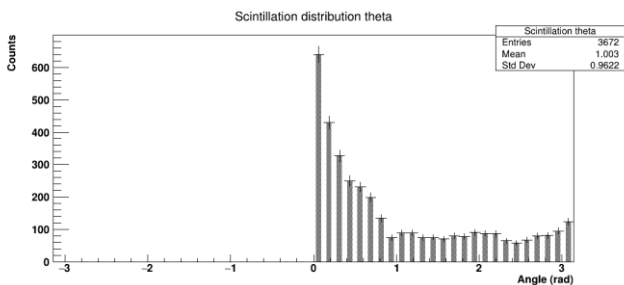


Figura 20. Distribución angular en θ de los fotones producidos por Centelleo debido a la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV en Aluminio.

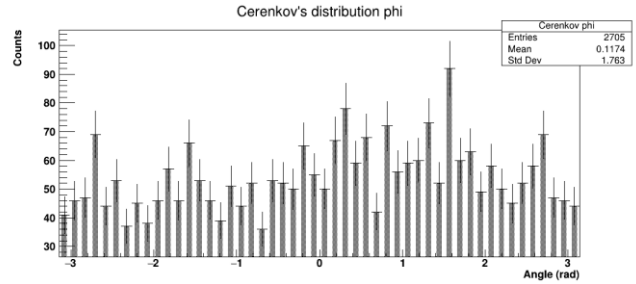


Figura 21. Distribución angular en φ de los fotones producidos por Centelleo debido a la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV en Aluminio.

En las Fig. 22 y Fig. 23 mostramos la distribución angular de la radiación Cerenkov producida en Aluminio. La radiación tiene una dirección bien definida en θ , i.e., hay ángulos en los cuales los fotones se propagan con mayor probabilidad. La radiación se produce uniformemente en todos los valores $\varphi \in [0, 2\pi)$. Observamos que un gran porcentaje de los fotones producidos en el seno del Aluminio, que son detectados por alguno de los detectores, se trasladan en la dirección en la que se mueve la partícula incidente. El coeficiente $N_b/N_f = 0.0239874$. Más del 99% de los fotones se traslada “hacia adelante”.

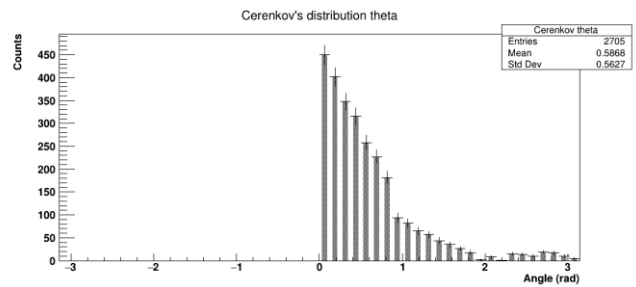


Figura 22. Distribución angular en θ de los fotones producidos por Cerenkov debido a la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV en Aluminio.

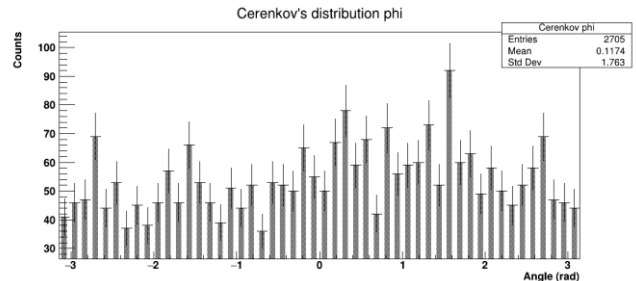


Figura 23. Distribución angular en φ de los fotones producidos por Cerenkov debido a la incidencia de partículas μ^+ de 4 GeV en Aluminio.

Las variables angulares son una forma de identificar la radiación tipo Centelleo y Cerenkov. Si la radiación producida en el seno del Aluminio es radiación tipo Centelleo, entonces esta radiación tiene una distribución uniforme, los fotones se pueden propagar hacia atrás y hacia

adelante casi con la misma probabilidad. Si la radiación producida en el seno del Aluminio es radiación tipo Cerenkov, entonces esta radiación se produce mayormente hacia adelante, con mayor concentración en ángulos definidos, con una probabilidad muy pequeña de que los fotones producidos se propaguen hacia atrás.

Distribución espacial de los fotones producidos por diferentes formas de producción en Aluminio

Como mencionamos previamente, la distribución espacial nos sirve para definir la posición de los detectores en un sistema experimental en el laboratorio. Requerimos saber la forma de producción de fotones en metales, y el posicionamiento de los detectores nos ayuda a descartar formas de producción, o nos ayuda a aceptar una.

En la Fig. 24 mostramos las posiciones donde se detectaron los fotones producidos en el seno del Aluminio por Centelleo. Los ejes representan los ejes coordenados cartesianos. Al igual que en el centellador inorgánico, los detectores paralelos a la dirección de la partícula incidente (Detector 2, Detector 4, Detector 5 y Detector 6) muestran detecciones uniformes en toda el área de detección y con mayor densidad de fotones detectados, comprobamos la uniformidad como propiedad de la radiación por Centelleo. El detector en el laboratorio puede posicionarse en cualquier parte de las caras laterales de la geometría cúbica, y observaríamos cuentas similares.

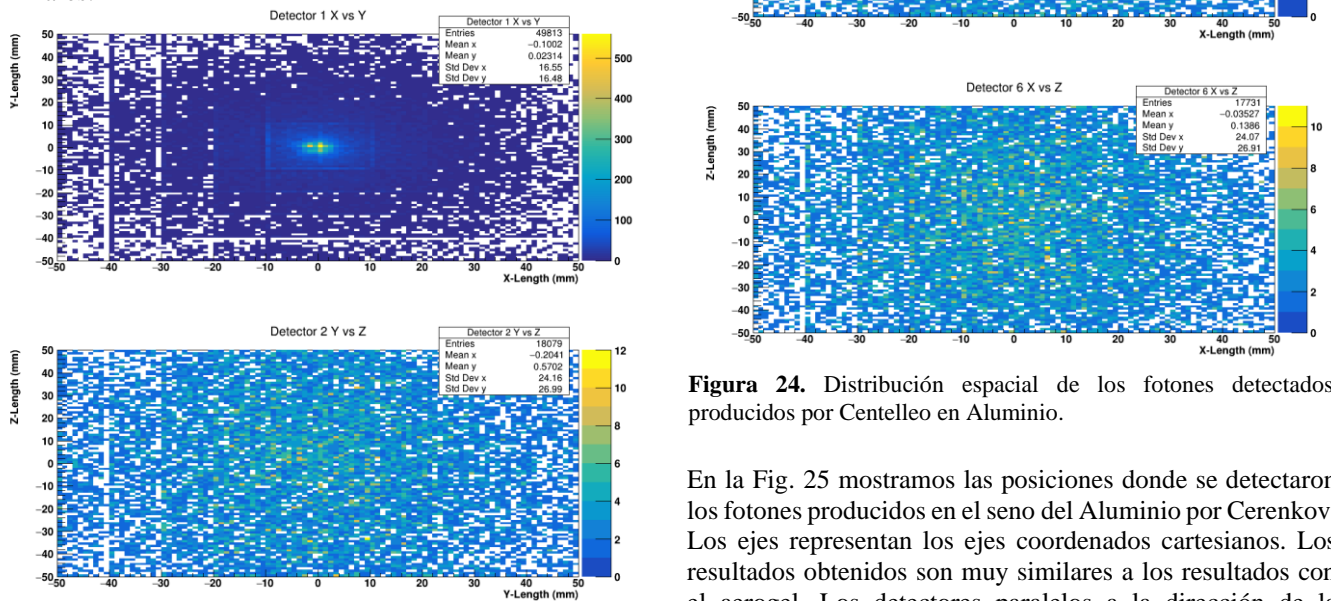


Figura 24. Distribución espacial de los fotones detectados, producidos por Centelleo en Aluminio.

En la Fig. 25 mostramos las posiciones donde se detectaron los fotones producidos en el seno del Aluminio por Cerenkov. Los ejes representan los ejes coordenados cartesianos. Los resultados obtenidos son muy similares a los resultados con el aerogel. Los detectores paralelos a la dirección de la partícula incidente (Detector 2, Detector 4, Detector 5 y Detector 6) muestran una distribución característica de las detecciones, estas detecciones incrementan a medida que avanzamos en la profundidad del cubo de Aluminio. Posicionar el detector en el laboratorio a diferentes espesores del cubo de Aluminio en las caras laterales de la geometría cúbica nos indicaría si la radiación detectada es radiación tipo Cerenkov, i.e., si a mayor espesor hay mayor cantidad de

fotones detectados, muy probablemente la radiación detectada es radiación tipo Cerenkov.

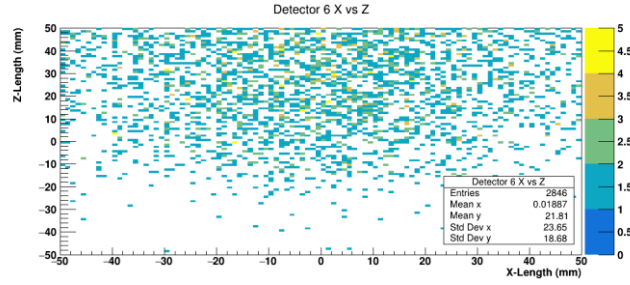
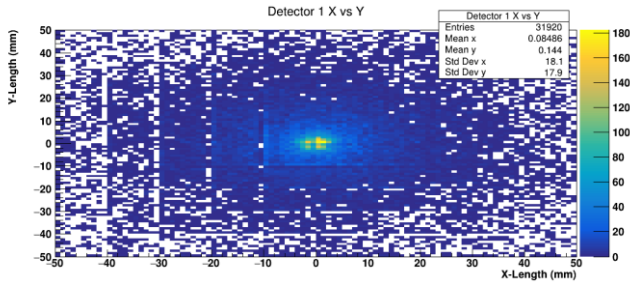
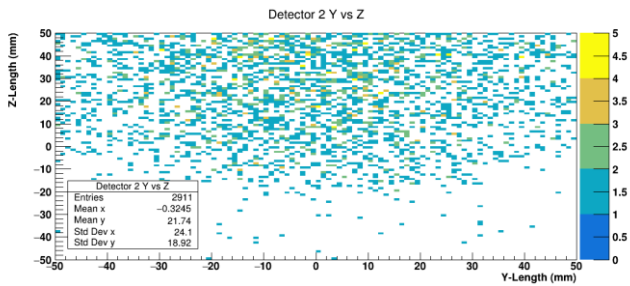
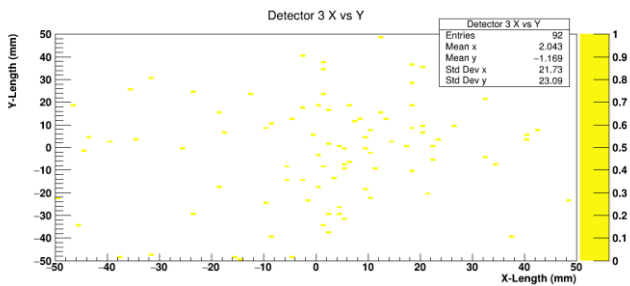


Figura 25. Distribución espacial de los fotones detectados, producidos por Cerenkov en Aluminio

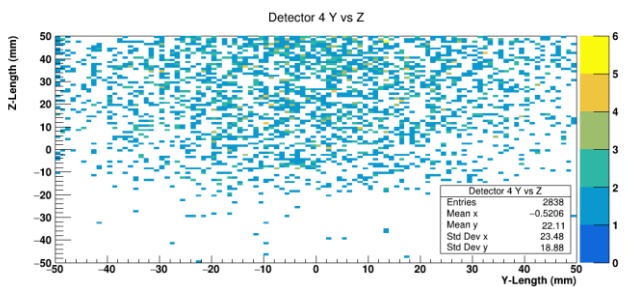


La distribución espacial de las detecciones es una forma de identificar la radiación tipo Centelleo y Cerenkov, porque la concentración de fotones en las caras laterales de la geometría cúbica es diferente. Mientras que en el caso de la radiación por Centelleo podemos detectar prácticamente la misma cantidad de fotones en cualquier posición de los detectores en las caras laterales, en el caso de Cerenkov, cuando colocamos los detectores a mayores espesores obtenemos mayor cantidad de fotones detectados.

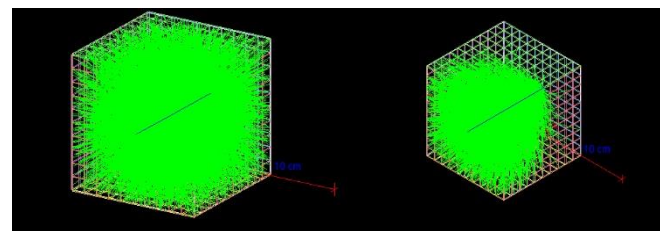
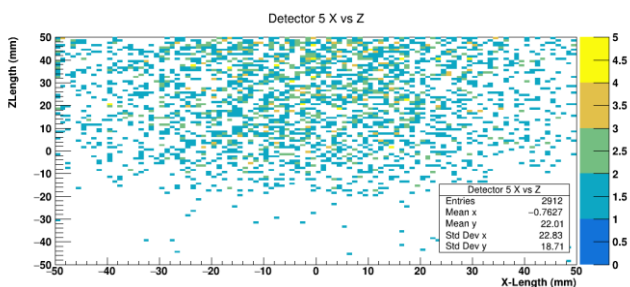


Polarización de los fotones producidos por diferentes formas de producción en Aluminio

Si los fotones son producidos por Centelleo, entonces los fotones no deben tener un vector de polarización particular. Si existe un vector de polarización particular, no son por Centelleo, en su defecto, podrían ser por Cerenkov si cumplen con las características que observamos de las demás variables (espectro de emisión, distribución angular/espacial).



En la Fig. 26 mostramos una visualización en Geant4 de nuestro sistema experimental con los diferentes tipos de radiación en el Aluminio. En el caso de transición sólo mostramos el sistema experimental.



(a) Radiación tipo Centelleo en el cubo de Aluminio. (b) Radiación tipo Cerenkov en el cubo de Aluminio. (c) Radiación tipo transición en el cubo de Aluminio.

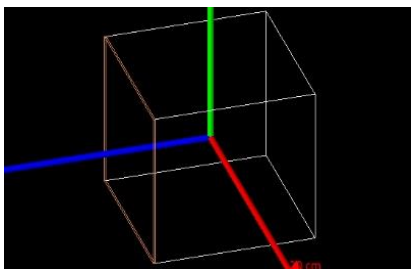


Figura 26. Visualización en Geant4 de diferentes procesos físicos en Aluminio.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Hemos observado por medio de una simulación en Geant4 radiación por centelleo, Cerenkov y transición producida en el seno de un cubo de Aluminio de 10 cm de arista.

Si la radiación producida en el Aluminio es radiación por centelleo, entonces debemos comprobar que esta radiación tiene un espectro de emisión definido por las líneas de emisión del Aluminio ionizado [10]. Los fotones se deben dirigir hacia todas las direcciones con una tendencia uniforme, aunque hay mayor cantidad de fotones que se dirigen “hacia adelante”. Los fotones no deben estar polarizados.

Si los fotones que detectamos cuando colocamos un foto-detector unido al cubo de Aluminio son producidos por centelleo en el Aluminio, entonces debemos detectar una cantidad similar de fotones en cualquier posición de las caras laterales de la geometría cúbica del Aluminio.

Si la radiación producida en el Aluminio es radiación tipo Cerenkov, entonces esta radiación tiene un espectro de emisión bien definido. La radiación se emite en los valores de longitud de onda para los cuales el índice de refracción del Aluminio cumple la condición de Cerenkov. Los fotones se deben dirigir hacia una dirección bien definida, más del 99% de ellos “hacia adelante” (dirección en la que se propaga la partícula incidente). Los fotones deben de estar polarizados.

Si los fotones que detectamos cuando colocamos un foto-detector unido al cubo de Aluminio son producidos por Cerenkov en el Aluminio, debemos observar que a medida que colocamos los foto-detectores a mayores espesores en las caras laterales de la geometría cúbica del Aluminio, debemos detectar una mayor cantidad de fotones. La distribución de estos fotones está bien definida y es característica de este tipo de radiación.

Para estudiar por comparación la radiación tipo Centelleo y la radiación tipo Cerenkov producida en el seno del Aluminio, generamos 100,000 eventos con el objetivo de comprobar si podíamos o no observar radiación por transición, y en ninguno de estos eventos detectamos fotones.

Comenzamos a observar fotones cuando teníamos como generadores primarios a μ^+ de 200 GeV y 10,000 eventos. El resultado de este conjunto de 10,000 eventos fueron 22 fotones detectados en la región de Rayos X. También observamos fotones cuando utilizamos e^- de 4 GeV como generadores primarios y 10,000 eventos. El resultado de este conjunto de 10,000 eventos fueron 74 fotones detectados en la región de Rayos X. *Estos resultados nos generan fuertes sospechas de que los fotones que detectamos no son por transición con las fuentes de partículas o generadores primarios que estamos generando (μ^+ de 4 GeV).*

Los resultados de Monte Carlo son una guía o evidencia de cómo y dónde debemos observar en el laboratorio. Monte Carlo reproduce de manera "ideal" las condiciones del sistema experimental. Si los resultados para una forma de producción en Geant4 se ajustan a nuestras observaciones, podemos concluir que son producidos por una forma de producción, caso contrario no podemos realizar ninguna conclusión.

Según los resultados de Geant4, podemos diferenciar una radiación de otra de acuerdo a su distribución angular, espectro de emisión, polarización y cantidad de fotones producidos por unidad de espesor.

Debemos pensar en las observaciones de la siguiente manera: "Si se produjeron fotones por Centelleo/Cerenkov/transición, entonces los fotones detectados deben cumplir -...-, si se cumplen las condiciones de Monte Carlo".

Hasta ahora se ha reportado producción de fotones en el rango visible en metales (Al, Ag, Au) por incidencia de partículas relativistas con carga eléctrica en láminas de metal con espesores 60nm – 160nm [12, 13, 14, 15].

En la referencia [12] concluyen que la radiación producida es radiación de transición por la intensidad y polarización de los fotones producidos.

No consideramos como forma de producción Bremsstrahlung debido a que los fotones producidos se encuentran específicamente en la región de Rayos-X del espectro electromagnético.

Hasta ahora, no hemos encontrado referencias en las que reporten detección de fotones producidos en bloques de metal con espesores $\approx 10^{-2}$ m por incidencia de partículas eléctricamente cargadas relativistas.

AGRADECIMIENTOS

A la DAIP, UGTO y CONACyT por el apoyo otorgado para realizar la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Floratos, E. (2015, October 9). *Introduction to Particle Physics*. Indico CERN.
https://indico.cern.ch/event/447008/contributions/1953687/attachments/1184942/1717323/ParticlePhysicsFOR_TEACHERS.pdf
- [2] Rosenfeld, A. H., & Snow, G. H. (2015). *8h. Elementary Particles and Interactions*. Massachusetts Institute of Technology: MIT.
<https://web.mit.edu/8.13/8.13c/references-fall/aip/aip-handbook-section8h.pdf>
- [3] Garutti, E. (2012). *The Physics of Particle Detectors*. (Lecture Notes pp-3-40).
https://www.desy.de/~garutti/LECTURES/ParticleDetectorSS12/L1_Introduction_HEPdetectors.pdf
- [4] Garutti, E. (2012). *The Physics of Particle Detectors*. Lecture Notes.
https://www.desy.de/~garutti/LECTURES/ParticleDetectorSS12/L2_Introduction_radiationMatter.pdf
- [5] Jackson, J. D. (1975). *Classical Electrodynamics* (Third ed.). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/3527600434.eap109>
- [6] Corti, G., Gray, H., Podorsky, W. (2002). *Detector Simulation status and challenges*. Indico CERN.
<https://indico.cern.ch/event/813325/contributions/3603478/attachments/1947727/3234553/HSFDetectorSimulation.pdf>
- [7] Cirrone, P., Milluzzo, G. (November 2015). *The Monte Carlo approach and the Geant4 toolkit*. INFN-LNS (Italy).
https://agenda.infn.it/event/9689/contributions/81073/attachments/58635/69139/Cirrone_Lesson1_Introduction.pdf
- [8] CERN. (2020). Geant4: a simulation toolkit. Tutorial.
<https://geant4.web.cern.ch>
- [9] Moreno, N. (2020). *Detección y estudio de fotones producidos en Aluminio por incidencia de rayos cósmicos*. Universidad de Guanajuato. División de Ciencias e Ingenierías.
- [10] National Institute of Standards and Technology. (2022). *Persistent Lines of Singly Ionized Aluminium (Al II)*. Basic Atomic Spectroscopic Data.
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/aluminumtable4.htm>
- [11] Filmetrics, Inc. (2022). *Refractive Index of Al, Aluminum for Thin Film Thickness Measurement*. © Copyright 2022 Filmetrics - A KLA Company. All Rights Reserved. <https://www.filmetrics.com/refractive-index-database/Al/Aluminium#:~:text=Aluminium%20or%20aluminum%20is%20a,nm%20are%201.37289%20and%207.617691>.
- [12] Goldsmith, P., & Jelley, J., V. (1959). *OPTICAL TRANSITION RADIATION FROM PROTONS ENTERING METAL SURFACES*. *Phil. Mag.*, 4(43). <https://www.osti.gov/biblio/4197927>
- [13] Frank, A. L., Arakawa, E. T., & Birkhoff, R. D. (1962). Optical Emission from Irradiated Foils. II. *Physical Review Journals Archive*, 126(6). <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.126.1947>
- [14] Ritchie, R. H., & Eldridge, H. B. (1962). Optical Emission from Irradiated Foils. I. *Physical Review Journals Archive*, 126(6). <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.126.1935>
- [15] Ferrell, R. A. (1958). Predicted Radiation of Plasma Oscillations in Metal Films. *Physical Review Journals Archive*, 111(5). <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.111.1214>