

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

N. L. Moreno López¹, J. Félix Valdez¹

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

nl.morenolopez@ugto.mx, felix@fisica.ugto.mx



RESUMEN/ABSTRACT

A la fecha no se han reportado la emisión de fotones en metales por incidencia de partículas con carga eléctrica. Simulamos en Geant4 un sistema experimental que consta de un bloque de Aluminio de 10cm x 10cm x 10cm y seis detectores de 10cm x 10cm x 1mm unidos a las caras del bloque de Aluminio, con el que estudiamos la producción de fotones por centelleo, Cerenkov y transición en Aluminio por la incidencia de partículas relativistas eléctricamente cargadas. Extrajimos información de los fotones que detectamos: proceso de creación, posición en la que son detectados, momento, energía, punto de creación, polarización, distribución angular y espectro de emisión. Los fotones por centelleo son detectados uniformemente en todas las direcciones, no están polarizados, su emisión corresponde a las líneas de emisión del Aluminio ionizado. Los fotones por Cerenkov están en la región del visible, están polarizados, tienen una dirección bien definida, a mayor espesor del Aluminio, mayor cantidad de fotones detectados. No observamos fotones por transición cuando la partícula incidente es un muon de 4GeV. Presentamos los detalles de la simulación, de los resultados físicos obtenidos, y el uso de esta información.

INTRODUCCIÓN

Un *detector de partículas* es un instrumento para medir propiedades de una partícula [1]. Detectamos partículas elementales a través de su interacción con el medio de detección. En la interacción, la partícula deja un rastro de energía. Amplificamos el pequeño rastro de energía hasta un nivel de medición donde podemos usar instrumentos convencionales.

En interacciones electromagnéticas partícula incidente – medio de detección, la pérdida de energía de la partícula incidente es debido a la producción de iones, a la emisión de fotones, o ambas [2]. La *producción de iones* se debe a interacciones con los electrones atómicos. La pérdida de energía de la partícula incidente es por ionización, excitación de los átomos del material. La *emisión de fotones* puede deberse a la excitación-des-excitación de los átomos del material de detección denominado *Centelleo*, interacciones tipo *Bremsstrahlung*, *radiación Cerenkov* o *radiación de transición* [3].

METODOLOGÍA

OBJETIVO

En la referencia [4] 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.

PLANEACIÓN

Planeamos simular un sistema experimental en Geant4 [5] que consta de una geometría hecha de Aluminio acompañada de detectores en una atmósfera de aire. Producimos diferentes procesos físicos en el Aluminio que resultan en la emisión de fotones en la región visible del espectro electromagnético, luego los detectamos con los detectores y posteriormente estudiamos las características de los fotones que logran escapar de la geometría hecha de Aluminio para generar una fuerte conclusión de cuál forma de producción produjo los fotones en el seno del Aluminio.

SIMULACIÓN EN GEANT4

La simulación en Geant4 consta de la *descripción de los detectores*, *selección de procesos físicos* y *generación de eventos primarios*:

Descripción de detectores: seleccionamos como medio de detección un cubo de Aluminio (CA) de 10 cm de arista. El CA está rodeado por detectores, un detector por cada cara del cubo de 10cm x 10cm x 1mm.

Generación de eventos primarios: un evento primario es el lanzamiento de un muon μ^+ de 4 GeV. El muon se mueve desde $-z$ hasta $+z$, en una región de 5mm x 5mm alrededor del eje z. Nuestra simulación se compone de 100 eventos.

Selección de procesos físicos: incluimos los procesos *Centelleo*, *radiación Cerenkov* y *radiación de transición*.

Colección de información procedente de la interacción μ^+ - Aluminio: con las demás clases, filtramos de todas las partículas detectadas (iones, fotones), los fotones visibles que se producen y escapan del Aluminio, que además logran ser detectados por los detectores. De estos extrajimos la siguiente información: proceso de creación, posición en la que son detectados por los detectores, momento, energía, y polarización.

En la Figura 1 mostramos la geometría de nuestro sistema experimental, y la generación del evento primario.

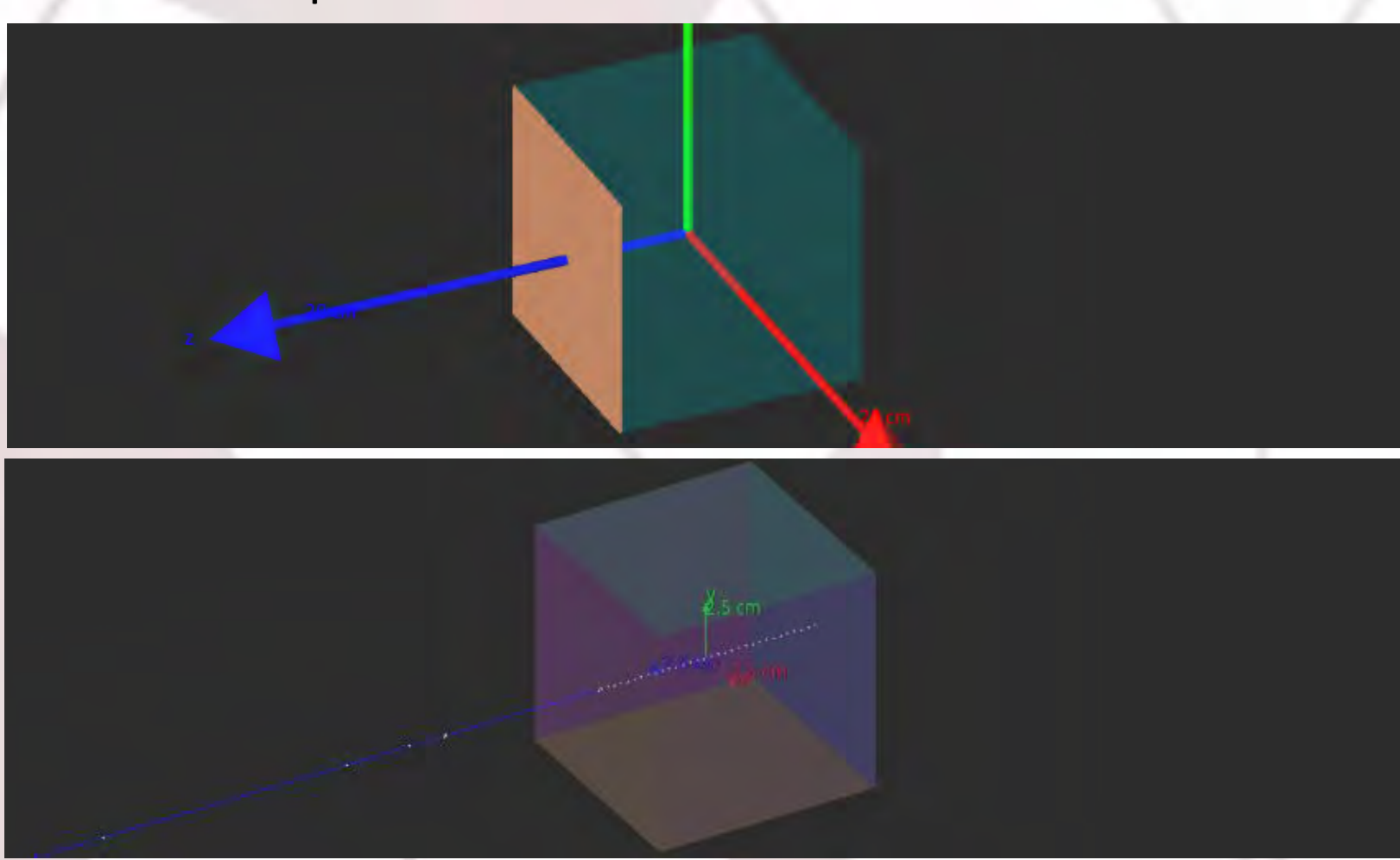


Figura 1. Posicionamiento de los elementos del sistema experimental (CA, detectores) y simulación del lanzamiento del evento primario.

RESULTADOS

Obtuvimos la distribución angular, la distribución espacial, el espectro de emisión, e información del vector de polarización de los fotones producidos en materiales prediseñados en Geant4: aerogel ($\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{C}$) donde se produce radiación Cerenkov, un centellador inorgánico donde se produce centelleo, y un radiador donde se produce radiación de transición. Nos aseguramos de que esta colección de características de los fotones producidos en el Aluminio fueran consistentes con las características de los fotones producidos en los materiales prediseñados, por cada forma de producción (Centelleo, radiación Cerenkov, radiación de transición).

En la Figura 2 mostramos la radiación emitida por los materiales prediseñados de Geant4. En la Figura 3 mostramos la colección de resultados obtenidos para dos formas de producción de fotones en el rango visible del espectro electromagnético.

DISCUSIÓN

Observamos en 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 centelleo, entonces en el laboratorio debemos comprobar que esta radiación tiene un espectro de emisión definido por las líneas de emisión del Aluminio ionizado [6]. Los fotones se deben dirigir hacia todas las direcciones con una tendencia uniforme en los detectores "laterales". Los fotones no deben estar polarizados.

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

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 por radiación de transición 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.

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.

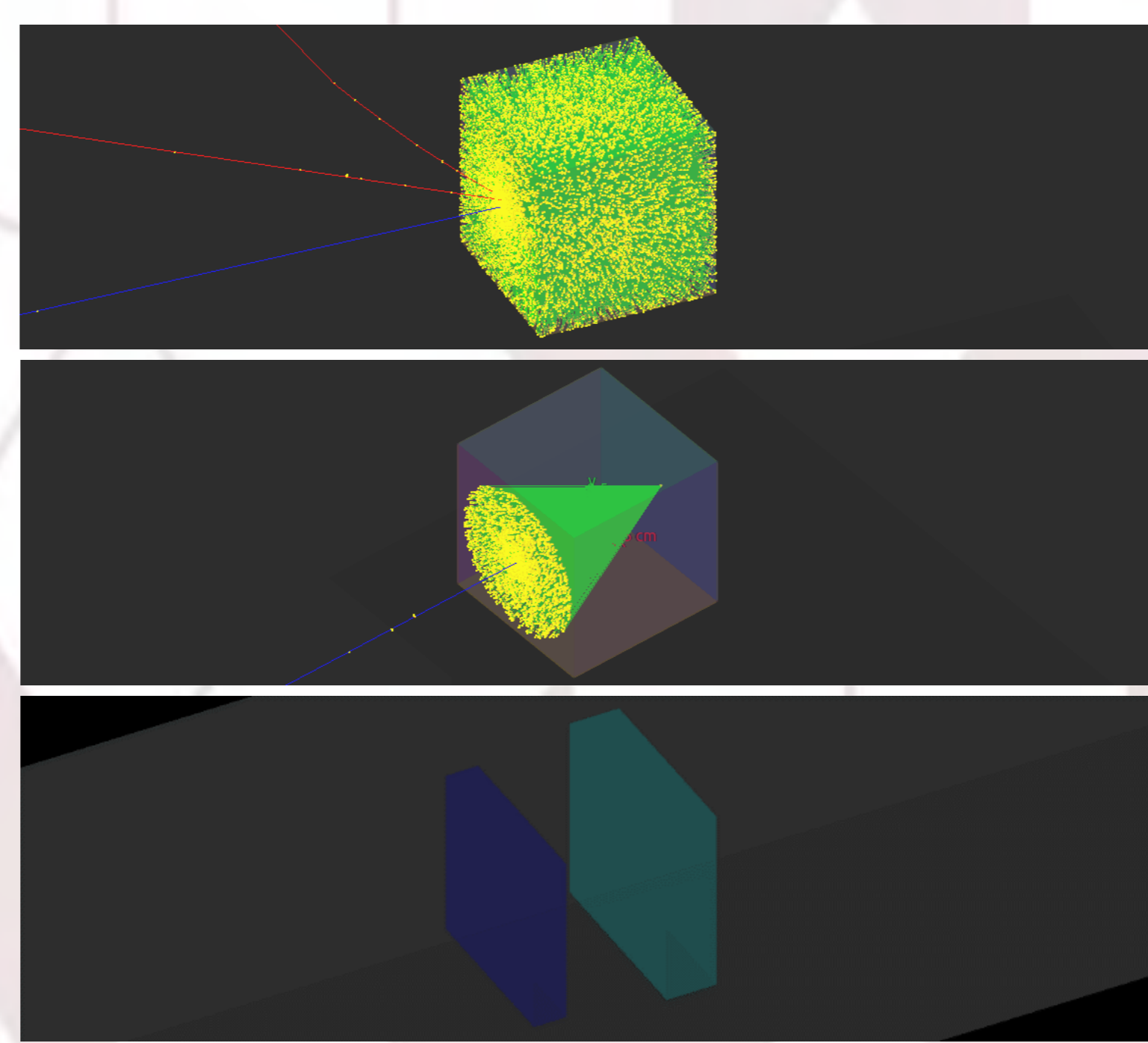


Figura 2. Radiación emitida por materiales prediseñados de Geant4 cuando un μ^+ de 4 GeV incide en ellos.

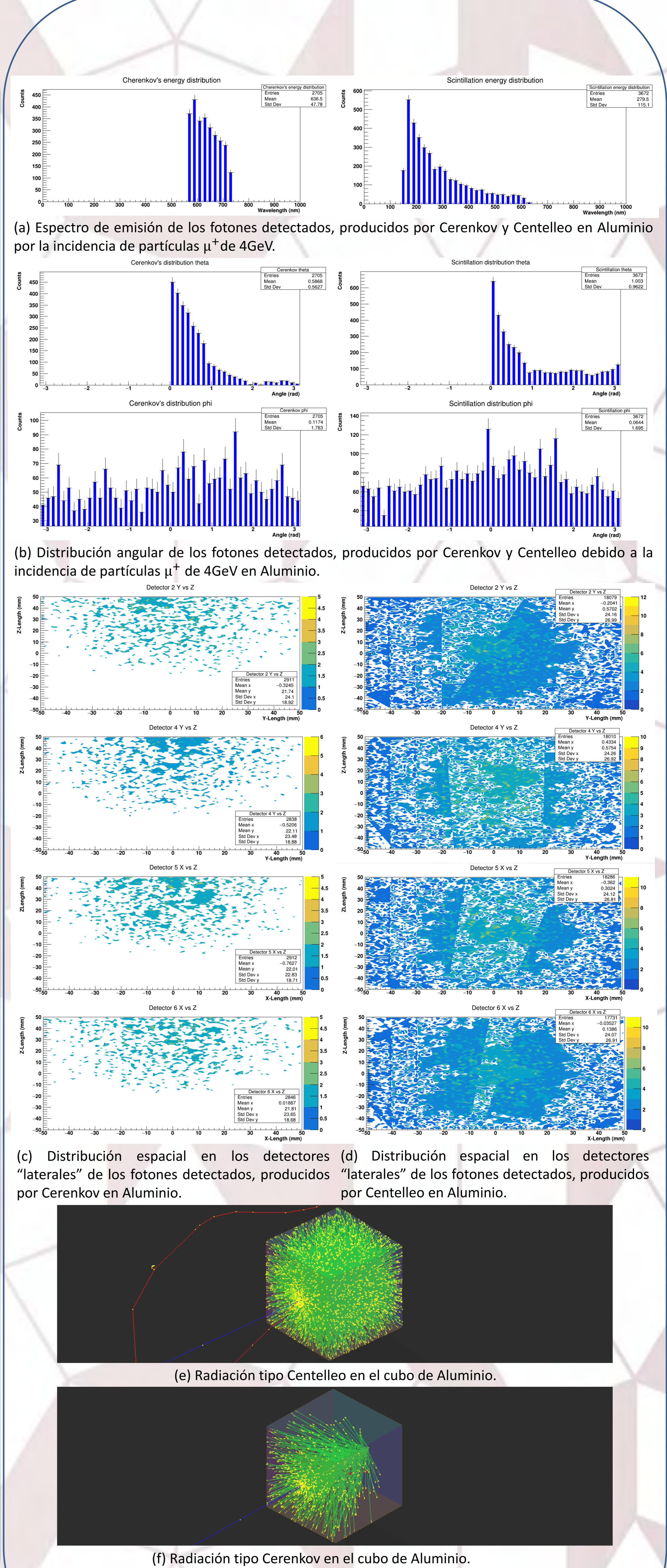


Figura 3. Resultados de la simulación de Geant4: espectro de emisión, distribución angular y distribución espacial en los detectores "laterales" de los fotones detectados, producidos en el cubo de Aluminio, en adición, una visualización de los fotones producidos.

CONCLUSIONES

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

Logramos observar fotones producidos en el Aluminio tipificados como Centelleo y radiación tipo Cerenkov hasta con el lanzamiento de un solo evento, no observamos fotones en la región visible del espectro electromagnético tipificados como radiación de transición. Logramos observar radiación de transición sólo en la región de rayos X al incrementar la energía de la partícula incidente, y el número de eventos. 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).

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 [7, 8, 9, 10].

En la referencia [7] concluyen que la radiación producida es radiación de transición por la intensidad y polarización de los fotones producidos. En la referencia [4] obtienen características de los fotones similares a la radiación Cerenkov, en metales con dimensiones que coinciden a los que seleccionamos en la simulación.

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.

REFERENCIAS

[1] Garutti, E. (2012). *The Physics of Particle Detectors*. (Lecture Notes pp-3-40). https://www.desy.de/~garutti/LECTURES/ParticleDetectorSS12/L1_Introduction_HEPdetectors.pdf
[2] Garutti, E. (2012). *The Physics of Particle Detectors*. Lecture Notes. https://www.desy.de/~garutti/LECTURES/ParticleDetectorSS12/L2_Interaction_radiationMatter.pdf
[3] Jackson, J. D. (1975). *Classical Electrodynamics* (Third ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/3527600434.eap109>
[4] Moreno, N. (2020). *Detección y estudio de fotones producidos en Aluminio por incidencia de rayos cósmicos*. Universidad de Guanajuato. División de Ciencias e Ingenierías.
[5] CERN. (2020). Geant4: a simulation toolkit. Tutorial. <https://geant4.web.cern.ch>
[6] 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>
[7] Goldsmith, P., & Jelley, J., V. (1959). *OPTICAL TRANSITION RADIATION FROM PROTONS ENTERING METAL SURFACES*. Phil. Mag., 4(43). <https://www.osti.gov/biblio/4197927>
[8] 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>
[9] 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>
[10] 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>