

Simulación de un Sistema de Detección
combinado de detectores de rayos gamma de
BGO y Germanio

Martha Yasmid Ferrer Pacheco
Universidad Nacional de Colombia

Maestría en Física

Índice general

1. Introducción	6
2. Marco Teórico	8
2.1. Interacción radiación-materia	8
2.1.1. Efecto Compton	9
2.1.2. Efecto Fotoeléctrico	10
2.1.3. Producción de Pares	10
2.2. Detectores de radiación gamma	11
2.2.1. Detectores de Ge (semiconductor)	12
2.2.2. Detectores BGO(centellador)	13
2.3. Características de los sistemas de detección	14
2.3.1. Resolución de la energía	14
2.3.2. Eficiencia en la absorción de la energía	17
3. Simulación de un detector sencillo de Ge utilizando C++	20
3.1. Elementos de un espectro	20
3.2. Simulación utilizando C++	20
4. Gammasphere	25
5. Geant4: Geometry and Tracking	27
6. Decaimiento Gamma del Continuo Nuclear	29
6.1. Relación entre las cantidades (M,E) y (k,H)	32
7. Simulación	35
7.1. Geometría de los detectores	35
7.2. Materiales	36
7.3. Sensibilidad	39
7.4. Física	39
7.5. GPS: Generación de una fuente de partículas	40
7.6. Evento	40
7.7. Respuesta del detector	40

8. Resultados	42
8.1. Cascadas Monoenergéticas (5,5) y (10,10)	45
8.1.1. Cascadas Monoenergéticas	45
8.1.2. Observación	47
8.2. Cascadas Rotacionales	51
8.2.1. Observación	56
8.3. Cascadas Rotacionales más tres rayos del continuo $E_\gamma = (3, 5, 10MeV)$	57
8.3.1. Observación	61
9. Conclusiones	63

*Por todo el amor y comprensión que me han brindado a Luis Francisco,
Juan Diego y Andrés Felipe, razón de mi vida*

Agradecimientos

Un agradecimiento muy grande de corazón al profesor Fernando Cristancho por acogerme en su grupo y permitirme aprender de él. Gracias por que sin proponérselo ha contribuido a mi felicidad y de las personas que me rodean

...

A Nicanor por prestarme su ayuda incondicional en momentos difíciles y saber escuchar cuando es necesario...

A Armando un inmenso agradecimiento por que supo ser amigo en momentos cruciales a lo largo de éste proceso y se alejó cuando era necesario... éso me dio fortaleza...

A los compañeros del grupo de Física Nuclear, especialmente a Diego por su paciencia y amabilidad a Nancy por su dedicación y sus palabras de aliento ,a Edana y Pico por sus oportunas aclaraciones, a Eduardo por sus clases de programación, por saber escuchar y dar un conejo a tiempo, a Liliana por ayudarme en la logística y a todos los demás por sus críticas constructivas y por compartir sus alegrías...

A Fernando N. por su labor administrativa y confiar en mí...él me presentó con mi director...

A mis compañeros y amigos en la UPTC Jossith, Zandra, Eliana, por que cada uno a su manera aportó su granito de arena en éste proceso...

A mi mamá quien me enseñó que en la vida nada es fácil...que todo se consigue con sacrificio...

A Francisco mi esposo, a J. Diego y A. Felipe mis hijos por aceptar sacrificar nuestro tiempo y por sus palabras de aliento...

A toda mi familia por confiar ciegamente en mi y brindarme su apoyo incondicional...

A Elizabeth y Paola por acogerme en su hogar...

A Dios por que él ha permitido que me goce este momento junto con las personas que más amo.

Simulación de un Sistema de Detección combinado de detectores de rayos gamma de BGO y Germanio

Resumen

GammaSphere, es el mejor sistema de detección de radiación gamma utilizado para el estudios de núcleos a alta energía y alto espín. Está constituido por dos clases de detectores; 110 de Ge y 770 de BGO (Bismuto, Germanio, Oxígeno). Aunque los BGO's son usualmente empleados como supresores Compton, existen propuestas experimentales en las cuales los BGO's serian usados como espectrómetros. El interés en tales experimentos es obtener información acerca del punto en el espacio energía-momento angular, E-I, en el cual las cascadas gamma se originan a partir del valor de energía H efectivamente registrado por el arreglo y del número de detectores k que fueron

activados por los M rayos gamma de la cascada. El presente trabajo hace un estudio de la relación (M,E) (k,H) a partir de una simulación esquemática de Gammasphere con el paquete Geant 4. Aunque mucho trabajo es necesario para obtener conclusiones confiables, los resultados obtenidos apuntan a que en un experimento real es posible identificar M,E ya que las distribuciones en el plano k-H provenientes de M,E fijos tienen desviaciones estándar lo suficientemente pequeñas.

Abstrac

Gammasphere, is the best system of detection and radiation monitoring gamma used for the studies of nuclei to high energy spin. It is constituted by two classes of detectors; 110 of Ge and 770 of BGO (Bismuth, Germanium, Oxygen). Although the BGO's usually is used like suppressors Compton, exist experimental proposals in which the BGO's serian used like spectrometers. The interest in such experiments is to obtain information about the point in the space angular energy-moment, E-I, in which the gamma cascades are originated from the value of energy H indeed registered by the adjustment and of the number of detectors k that were activated by the M gamma rays of the cascade. The present work makes a study of the relation (M, E) - (k, H) from a schematic simulation of Gammasphere with the Geant 4. Although much work is necessary to obtain reliable conclusions, the obtained results aim at that in a real experiment it is possible to identify M, and since the distributions in the originating plane k-H of M,E and fixed have standard deviations the sufficiently small thing.

Parabras claves: Gammasphere, núcleos a alta energía y alto espín, cascada, Geant4.

Clue words: Gammasphere, nuclei to high energy spin, cascades, Geant4.

Capítulo 1

Introducción

La investigación del núcleo atómico a muy altas energías y a altos estados de espín exige tanto nuevas formas de hacer experimentos como nuevas formas de hacer el análisis de los datos obtenidos de ellos. Una de las posibilidades para el entendimiento de éstos núcleos es la detección de cascadas gamma de diferentes energías en reacciones nucleares, propuesta existente en [1] donde se hace uso de la alta multiplicidad de estas cascadas. Sin embargo tanto el proceso de decaimiento como el de detección es altamente complejo y su comprensión exige de modelos físicos que sin ser la copia exacta del fenómeno, sean suficientemente realistas y además permitan visualizar las diferentes partes del proceso entero. Por esta razón se apela a simulaciones Monte Carlo tanto para simular el proceso de decaimiento como para el proceso de detección.

Gammasphere ilustrado en la Sección 4 es el mejor sistema de detección de la radiación gamma utilizado para el estudio de la estructura nuclear. Las cascadas originadas en reacciones nucleares contienen transiciones de alta energía, que están típicamente entre $4 \leq E_\gamma \leq 15(\text{MeV})$, las cuales no pueden ser detectadas eficientemente por los detectores de Ge pero sí por los de BGO. Gammasphere no fue pensado originalmente para hacer espectroscopía con sus BGO, pero bajo ciertas condiciones experimentales, sería favorable usarlos como espectrómetros por su alta eficiencia. Si se caracteriza el arreglo de ésta manera es posible hacer una propuesta experimental seria a este respecto.

Para la simulación del arreglo de detectores se hace uso del paquete Geant4 por su versatilidad para simular la interacción de la radiación gamma con la materia. Tal como se explica en la Sección 5, una de las ventajas de las subrutinas del Geant4 es poder desarrollar diversas aplicaciones que tienen diferentes y complejas geometrías además de poder escoger el tipo de partículas, los materiales y los procesos involucrados en la interacción. Para el caso

objeto de este trabajo, la geometría desarrollada es de 110 celdas de detectores del Gammasphere, que interactúan con rayos gamma de diferentes energías. Dentro de la física escogida, está la ocurrencia de Efecto Compton, Efecto fotoeléctrico y Creación de pares positrón-electrón. Se destaca el hecho de que Gammasphere no ha sido simulado utilizando las subrutinas de Geant4.

Este trabajo busca caracterizar el sistema de tal manera que los detectores de BGO (Bismuto, Germanio, Oxígeno) cumplan el papel de espectrógrafos de rayos gamma ya que son muy eficientes y recomendables para hacer espectroscopía a altas energías; una vez hecha la caracterización, se pretende obtener la respuesta del arreglo a cascadas gamma de alta multiplicidad, es decir, la relación $(M, E) \rightarrow (k, H)$, donde M es la multiplicidad, E la energía, k el número de detectores activados y H la energía recolectada de los detectores.

Capítulo 2

Marco Teórico

El estudio del paso de la radiación a través de la materia tiene interés en varios campos de la Física como son: Física de Altas Energías, Física Nuclear, Radiofísica (radioterapia, radioprotección y radiodiagnóstico).

Cuando un haz de fotones interactúa con la materia el número de procesos que tiene lugar es tan elevado que es imposible predecir los resultados de la interacción. De ahí la necesidad de realizar simulaciones numéricas de los resultados de dichos procesos. Una forma de realizar estas simulaciones es utilizando el Método de Monte Carlo, que permite resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias. Por medio de éste método se puede obtener información de lo que ocurre paso a paso y es muy útil cuando se trata de problemas cuyo tratamiento analítico es demasiado complicado.

2.1. Interacción radiación-materia

El problema físico que nos ocupa tiene que ver con el paso de fotones a través de la materia y con los fenómenos que ocurren en este proceso. Los procesos que ocurren son:

1. Efecto Compton.
2. Efecto fotoeléctrico.
3. Creación de pares positrón-electrón.

La importancia relativa de los diversos procesos depende tanto de la energía de la radiación incidente, como del material con el que se produce la interacción. En las subsecciones siguientes se dará una descripción somera de la física implicada en cada uno de los procesos.

2.1.1. Efecto Compton

El efecto Compton es un proceso de dispersión entre un fotón y un electrón libre. Para energías incidentes del fotón de 1 MeV todos los electrones atómicos pueden considerarse como si fueran libres, de modo que se puede asumir que la dispersión está bien descrita por el efecto Compton. Para determinar completamente lo que ocurre en dicho proceso hay que calcular varias cantidades: la probabilidad de que ocurra la interacción en función de la energía del fotón incidente y las nuevas direcciones y energías del fotón y del electrón tras la colisión, ver [2] páginas 56 y 57, ecuaciones 2.107, 2.108 y 2.113.

Cuando el fotón interactúa con el medio, va perdiendo energía, de modo que llega un momento en el que la energía de ligadura de los electrones atómicos no es despreciable frente a la energía del fotón. En este caso el efecto Compton no describe correctamente la dispersión y el tratamiento riguroso del problema conduce a la necesidad de introducir correcciones a las secciones eficaces que predice la fórmula de Klein-Nishina [2]. Estas correcciones se introducen mediante factores de forma que dependen del átomo considerado y del ángulo con el que se dispersa el fotón, siendo más importantes a medida que aumenta el número atómico y para ángulos de dispersión pequeños. No obstante, las energías a las que estas correcciones son importantes, el efecto fotoeléctrico domina claramente sobre el efecto Compton lo cual se puede observar en la Figura (2.2); en consecuencia, se puede usar la fórmula de Klein-Nishina sin correcciones en todo el rango de energía.

La distribución de energía de los electrones retrodispersados sigue la distribución de energías dada por la fórmula de Klein-Nishina, dado que en el desarrollo de éste trabajo se utiliza dicha distribución para la comprensión de la dispersión Compton, se ilustra en la Figura (2.1) y la ecuación está dada por: [2].

$$\begin{aligned}\frac{d\sigma}{dT} &= \frac{r_e^2 \pi}{m_e c^2 \gamma^2} \left[2 + \frac{s^2}{\gamma^2 (1-s)^2} + \frac{s}{1-s} \left(s - \frac{2}{\gamma} \right) \right] \quad (2.1) \\ s &= \frac{T}{h\nu} \\ T_{max} &= h\nu \left(\frac{2\gamma}{1+2\gamma} \right) \\ \gamma &= \frac{h\nu}{m_e c^2}\end{aligned}$$

donde r_e es el radio clásico del electrón m_e es la masa del electrón $h\nu$ la energía del fotón incidente. T_{max} es la energía cinética máxima del electrón dispersado.

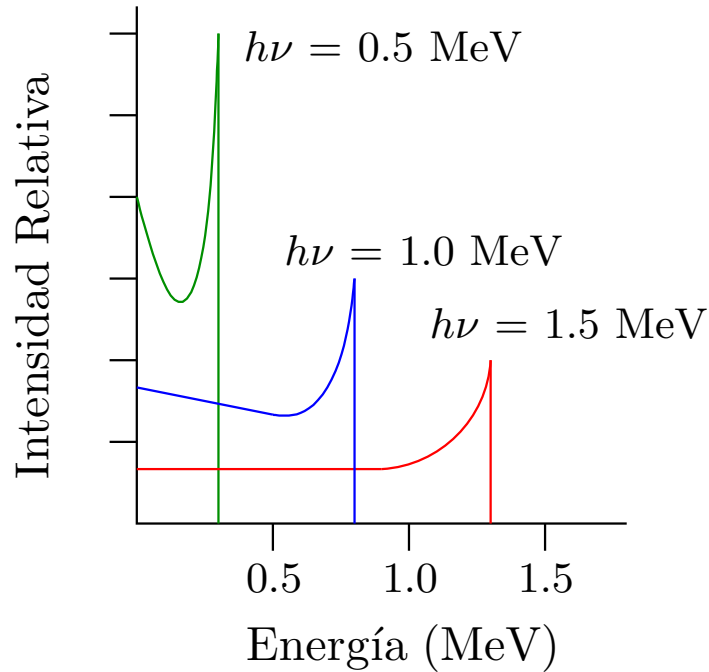


Figura 2.1: Distribución de la energía de los electrones Compton dispersados

2.1.2. Efecto Fotoeléctrico

Es una colisión elástica entre un fotón y un electrón que inicialmente se encuentra ligado [2]. Este efecto tiene mayor importancia cuando aumenta el número atómico del material con que interactúa la radiación. Es decir, los elementos con más alto Z serán los más apropiados para ser usados como absorbedores o detectores de rayos gamma γ . Cuando un fotón incide sobre el material dejando toda su energía en él ocurre efecto fotoeléctrico.

2.1.3. Producción de Pares

Este efecto se da en la interacción de un fotón con un núcleo del que resulta un par electrón-positrón. Para que este proceso ocurra el fotón debe tener una energía superior a 1.022 MeV.

Es posible determinar unos intervalos aproximados de energías a los cuales estos procesos tiene mayor probabilidad de ocurrencia. Para energías superiores de 1 MeV el proceso dominante es la creación de pares. A energías del orden de 1 MeV efecto Compton y a energías menores de 1 MeV el proceso dominante es el efecto fotoeléctrico, esto se resume para los materiales de los detectores de éste trabajo, en la Figura (2.2). Así como la dependencia de

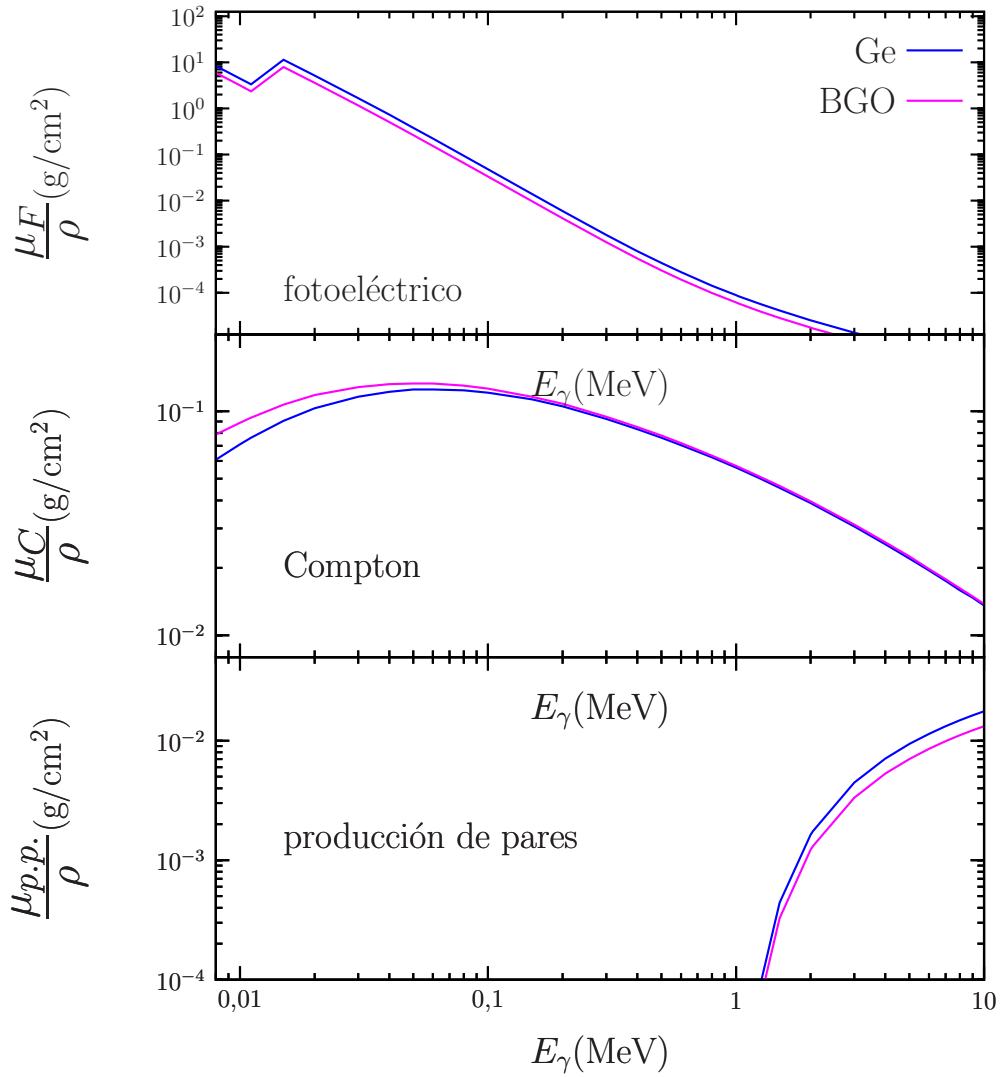


Figura 2.2: Secciones Eficaces para el Ge y BGO

cualquiera de estos efectos con el número atómico, donde se ve o se percibe que a mayor número atómico se favorecen los fenómenos fotoeléctrico y creación de pares y menos el efecto Compton

2.2. Detectores de radiación gamma

A continuación hablaremos a cerca del fundamento central de éste trabajo, dos tipos de detectores de radiación gamma, uno de ellos un semiconductor de Ge y el otro un centellador de BGO(Bi,Ge,O), ambos detectores de estado sólido.

El principio fundamental de un detector de radiación se basa en la transferencia de una parte o de toda la energía de la radiación al material de éste, en donde ésta origina una señal más accesible a la percepción humana [2]. Generalmente es una corriente eléctrica la cual se amplifica para procesarla y producir la respuesta de salida.

El diseño y el material del cual están hechos los detectores depende del tipo de radiación que se quiera detectar y de la información que sobre ésta se desee obtener. Si lo que se quiere medir es la energía de la radiación incidente, se debe escoger un detector en el cual la amplitud del pulso de salida sea proporcional a ésta. Cada uno está construido para ser sensible a cierto tipo de radiación en un rango de energía determinado, si capta energías por fuera de ésta región se producen señales inútiles y su eficiencia decrece.

El proceso de detección depende del tipo de radiación, por ejemplo si es de rayos X o γ , interactúa inicialmente para producir partículas cargadas mediante alguno de los procesos descritos anteriormente en la sección 2, dando lugar a la formación de una señal eléctrica, mientras que la radiación es de partículas cargadas y produce ionización directamente sobre los átomos del material.

Así, en el proceso para producir la respuesta del detector depende tanto del tipo de radiación como del material sensible, a continuación se detalla sobre dos tipos de detectores los semiconductores y los centelladores por ser de interés en éste trabajo.

2.2.1. Detectores de Ge (semiconductor)

Los detectores de Ge están hechos de cristales semiconductores de manera que el paso de la radiación a través del cristal crea pares electrón-ión los cuales son recolectados por un campo eléctrico para formar un pulso eléctrico. Un detector semiconductor consta de un semiconductor tipo n y uno tipo p en contacto. Debido a la diferencia de concentraciones de electrones y huecos entre los materiales, los electrones del material tipo n pueden difundirse a través de la juntura dentro del material tipo p y combinarse con los huecos, igual difusión sufren los huecos de la región p capturando electrones de la región n. Como cada uno de los materiales, n y p, son inicialmente neutros, la recombinación de los huecos y electrones causan la acumulación de carga a ambos lados de la juntura; negativa en la región p y positiva en la región n. Esto crea un campo eléctrico a través de la juntura el cual detiene el proceso de difusión resultando una región con carga espaciada inmóvil. Cuando la radiación entra en esta zona puede liberar pares electron hueco los cuales son arrastrados fuera de ella por el campo eléctrico. En la práctica esos detectores son operados con un voltaje inverso y paralelo, aplicado entre los

contactos eléctricos localizados al final de ambos extremos de la juntura. Los voltajes aplicados pueden variar entre 1000-3500 V y cumplen dos propósitos: incrementar las dimensiones de la zona libre de carga aumentando así el volumen sensible del detector y aumentar la magnitud del campo eléctrico en esa región, haciendo más eficiente la colección de carga.

La ventaja de los detectores semiconductores es que la cantidad de ionizaciones producida por una energía dada es grande, lo que incrementa su resolución. Uno de los problemas que presenta éste tipo de detectores, a excepción del silicio, es que tienen que operarse a muy bajas temperaturas, aproximadamente a la temperatura del nitrógeno líquido, 77 K; debido a sus pequeños gaps (0.785 eV a 0K para el Ge), por la agitación térmica se pueden producir pares electron-hueco; los pares así creados son una de las causas de las corrientes de escape, las cuales aparecen como ruido a la salida del detector y son las denominadas de mínima energía que pueden ser observadas. A temperatura ambiente, éstas corrientes son demasiado altas para ser aceptadas. La principal aplicación de los detectores de Ge, es la detección de rayos gamma. La ventaja que tiene el Ge sobre el Si es su número atómico ($Z_{Ge} = 32$ y $Z_{Si} = 14$). Lo que aumenta su poder de frenado y la sección eficaz para el fotoeléctrico es unas 60 veces mayor para el Ge que para el Si; y la desventaja con respecto al Si es que éste no necesita ser enfriado por presentar un mayor gap, lo que le permite trabajar a temperatura ambiente.

Nuestro interés, son los detectores de Germanio Intrínseco, el cual tiene menos de 10^{10} *atomos/cm³* de impurezas. La ventaja es que no tiene que estar a bajas temperaturas todo el tiempo, y solo es necesario enfriarlo cuando se aplica un alto voltaje.

El Germanio intrínseco también llamado Germanio hiperpuro HPGe (High Purity Germanium), tiene su mayor aplicación en la detección de rayos gamma ya que ofrecen la más alta resolución para energías de unos pocos keV hasta 10 MeV

2.2.2. Detectores BGO(centellador)

Los detectores de centelleo se valen del hecho que ciertos materiales al ser golpeados por una partícula o por una radiación, emiten una pequeña cantidad de luz (centellean), esto es debido a que se producen transiciones electrónicas a estados excitados, los que decaen emitiendo fotones de luz. Los materiales centelladores de cristales inorgánicos son en general cristales Halógeno-Alcalinos con pequeñas cantidades de impurezas. Dentro de estos materiales el más utilizado es el Na (alcalino) y el I(halógeno) y de los cristales no alcalinos, el más utilizado es BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$).

Estos materiales se acoplan a un dispositivo de amplificación como un fotomultiplicador, donde los centelleos se convierten en un pulso eléctrico y son analizados y contados eléctricamente para dar información de la radiación incidente. Un tubo fotomultiplicador consiste de un fotocátodo (cátodo fotosensible, el cual convierte los centelleos incidentes en fotoelectrones) seguido por un sistema colector de electrones compuesto por una serie de electrodos de emisión secundaria o dínodos y un ánodo. Entre el fotocátodo y el ánodo se aplica una diferencia de voltaje de 0 a 1300 V, pero para voltajes menores de 800 V la respuesta del fotomultiplicador se hace menos lineal. Los fotoelectrones son acelerados por un campo eléctrico hasta el primer dínodo. Cada fotoelectrón que pega en el dínodo transfiere parte de su energía a los electrones, eyectando cierto número de electrones secundarios, los cuales a su vez son acelerados hacia el siguiente dínodo donde más electrones serán eyectados y acelerados. Y así sucesivamente a través de cierto número de dínodos, dando como resultado la multiplicación de los electrones. En el ánodo, ésta cascada de electrones es capturada, para finalmente tener una señal eléctrica proporcional a la energía cedida por la radiación al material.

La gran ventaja de los detectores de centelleo inorgánicos es su gran poder de frenado debido a su alta densidad y su alto número atómico. Esto los hace susceptibles para ser usados en la detección de rayos gamma y electrones de alta energía así como positrones.

2.3. Características de los sistemas de detección

2.3.1. Resolución de la energía

La resolución tiene que ver con la capacidad que tiene un sistema de detección de distinguir dos rayos con energías muy cercanas, en el caso de la radiación gamma, por ejemplo, tiene energías bien definidas y lo que se espera tener en la respuesta del detector es una función delta, de altura finita, pero lo que se ve es un pico con un ancho definido, debido a que la energía presenta una distribución casi siempre gaussiana. La resolución está dada en términos del ancho a la altura media de la gaussiana FWHM(Full Width at Half Maximum) y que para una energía dada está dada por:

$$Resolucion = \frac{FWHM}{E} = \frac{\Delta E}{E} \quad (2.2)$$

Veamos por ejemplo el caso de la radiación γ , ésta entrega su energía a los electrones del material mediante cualquiera de los procesos descritos anteriormente; estos electrones adquieren energía cinética y entregan el exceso

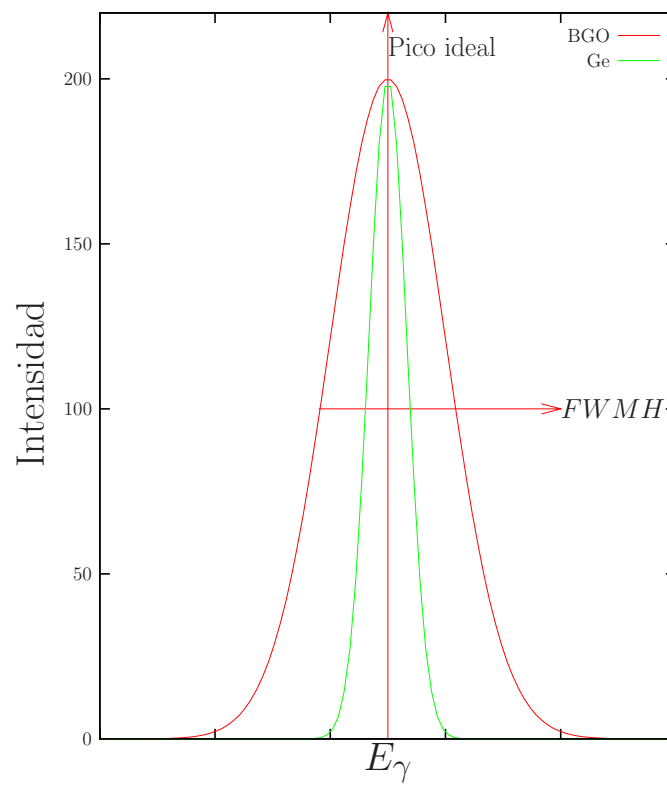


Figura 2.3: La eficiencia de un detector de BGO es mayor que el Ge y la resolución del Ge es mayor

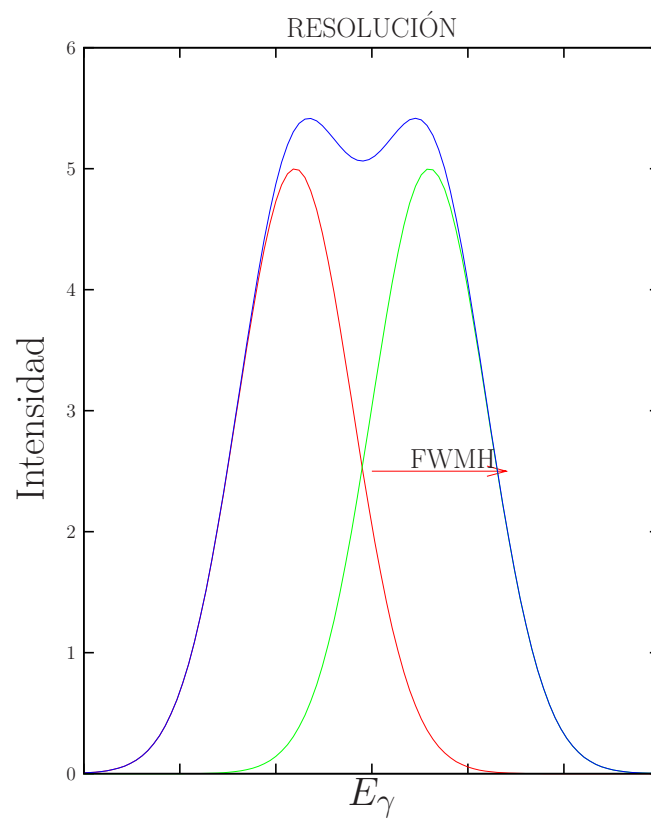


Figura 2.4: Para poder diferenciar dos picos dentro de un espectro es necesario que estén separados por una distancia al menos igual al FWHM. La línea azul muestra la suma de dos gaussianas idénticas, separadas justamente por ese valor.

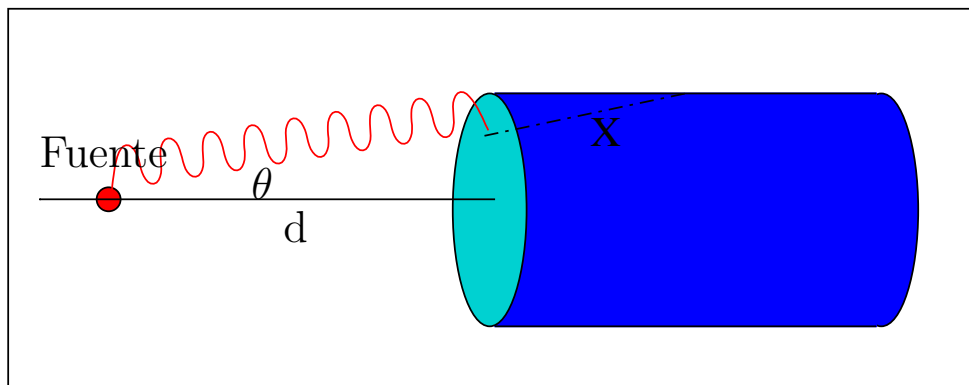


Figura 2.5: Dependiendo de la geometría detector-fuente algunos fotones alcanzan el detector y pueden interactuar con la masa del mismo.

de energía al material por medio de colisiones elásticas con los electrones atómicos, produciendo excitaciones o ionizaciones. Si ω es la energía promedio necesaria para producir una ionización, entonces el número promedio de ionizaciones producidas por una energía absorbida E es $j = E/\omega$. Aplicando la estadística de Poisson y la relación entre FWHM y σ , [2]

$$\sigma^2 = j; FWHM = 2,35 \times \sigma \quad (2.3)$$

Entonces la resolución, ec. (2.2), queda expresada como:

$$Resolucion = 2,35 \times \sqrt{\frac{\omega}{E}} \quad (2.4)$$

2.3.2. Eficiencia en la absorción de la energía

La Eficiencia está relacionada con la capacidad de absorción de la radiación. Ésta depende directamente de la geometría y disposición fuente-detector. Para que el fotón quede registrado en éste debe alcanzar el detector e interactuar con su volumen sensible.

Existen dos tipos de eficiencias: eficiencia absoluta y relativa. La eficiencia absoluta o total de un detector está definida como la relación entre el número de eventos registrados por el detector sobre el número de eventos emitidos por la fuente.

$$\epsilon_{Absoluta} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos emitidos por la fuente}} \quad (2.5)$$

Esta depende de la geometría del detector y de la probabilidad de interacción con el detector. Para un detector de geometría cilíndrica y una fuente

isitrópica puntual a una distancia d del detector como se muestra en la Figura (2.3.2), la probabilidad de que un fotón sea emitido en un ángulo θ es [2].

$$P(\theta)d\Omega = \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (2.6)$$

donde $d\Omega$, es un elemento de ángulo sólido. Y la probabilidad que una partícula que pega en el detector tenga allí una interacción está dada por

$$1 - \frac{N(x)}{N_0} = 1 - \exp(-\mu x) \quad (2.7)$$

donde Combinando éstas dos posibilidades tenemos:

$$d\epsilon_{Absoluta} = [1 - \exp(-\mu x)] \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (2.8)$$

donde μ es el coeficiente de absorción del material, x es el espesor y Ω es el ángulo sólido. La eficiencia total entonces, se puede calcular al integrar la ecuación(2.8). Sin embargo si x no varia mucho el exponencial puede considerarse como cero , luego

$$\epsilon_{Absoluta} = \frac{\Omega}{4\pi} \quad (2.9)$$

La eficiencia absoluta o total puede ser escrita como factor de otras dos

$$\epsilon_{Absoluta} = \epsilon_{Intrinseca} \epsilon_{Geo} \quad (2.10)$$

donde $\epsilon_{Intrinseca}$ es la eficiencia intrínseca y está dada por

$$\epsilon_{intrinseca} = \frac{\text{eventos registrados}}{\text{eventos incidentes detector}} \quad (2.11)$$

Para calcular los eventos emitidos por la fuente, se halla la actividad de la fuente a la fecha, se multiplica por el branching b_r y por el tiempo de exposición de la muestra.

$$N_0(E_\gamma) = A(Z, N, t)b(E_\gamma) \quad (2.12)$$

donde A es la actividad de la fuente a la fecha y b_r es el branching del rayo gamma

$$A = A_0 e^{-\ln \frac{2}{\tau} * t} \quad (2.13)$$

Para calcular el número de eventos registrados por el detector se halla el área bajo el fotopico. Así la eficiencia intrínseca se puede escribir como

$$\epsilon_{intrinseca} = \epsilon_{absoluta} \left(\frac{4\pi}{\Omega} \right) \quad (2.14)$$

El ángulo sólido para ésta geometría está dado por

$$\Omega = 2\pi\left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}}\right) \quad (2.15)$$

Función respuesta

Es el espectro que entrega el detector como respuesta luego de una interacción. Se puede expresar como:

$$N_m(E) = \sum_{E_i \geq E}^{E_n} N(E_i, E) \quad (2.16)$$

donde n es el número de rayos gamma emitidos por la fuente, E_i es la energía de cada una de las transiciones realizadas por la fuente, $N(E_i, E)$ es la función respuesta del detector al rayo incidente con energía E_i evaluada en E y $N_m(E)$ es el número de fotones medidos por el detector en la energía E . La obtención de la función respuesta de un detector es complicada, para la simulación se tuvo en cuenta como función respuesta para el fondo Compton la distribución de energía de los electrones dada por la ec. (2.1). El fotopico es aproximado a una gaussiana de anchura FWHM

Capítulo 3

Simulación de un detector sencillo de Ge utilizando C++

3.1. Elementos de un espectro

La respuesta de un detector es el espectro que resulta de la ocurrencia de efectos tales como: Compton, fotoeléctrico y producción de pares referidos en una sección (2). En la Figura (3.1), se resalta los picos comunes cuando un rayo gamma incide sobre el material sensible del detector. El fotopico aparece debido a todos los fotones que dejan toda su energía en la parte sensible del detector. El fondo Compton se debe a todos los fotones que dejan parte de su energía en él y escapan. El borde Compton se forma gracias a los fotones que hacen múltiple Compton. El punto T_{max} marca la máxima energía cinética que un fotón puede entregar haciendo dispersión Compton. El pico de escape simple, sucede cuando ocurre producción de pares y el electrón o el positrón escapan del detector. Igualmente el pico de escape doble se debe a la producción de pares y los dos, electrón y positrón, escapan de él, luego se registra un pico a 1.022MeV del fotopico. El Pico de aniquilación aparece debido a los fotones que hacen producción de pares con el material envolvente del detector y uno de ellos, electrón o positrón es registrado. El pico de retrodispersión aparece a una energía aproximada de 256 keV de los fotones que son retrodispersados con el material envolvente del detector. A bajas energías aparece un pico de Rayos X característicos de los que hacen fotoeléctrico con el material envolvente y sólo son registrados éstos.

3.2. Simulación utilizando C++

Para cumplir con los objetivos de éste trabajo es necesario entender por lo menos los siguientes aspectos:

1. Los procesos físicos ocurren dentro del detector.

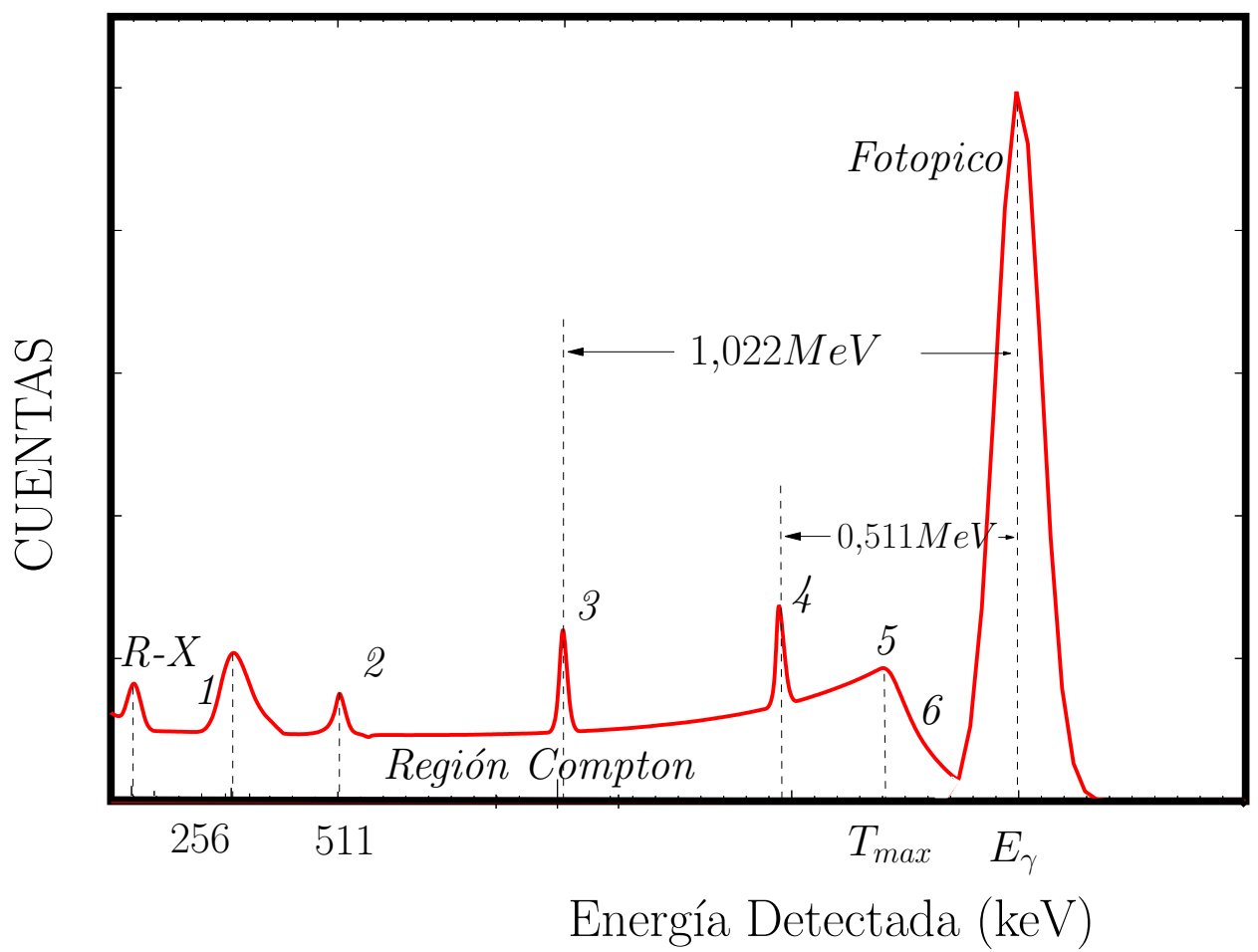


Figura 3.1: Elementos básicos de un espectro

2. Cómo se genera la respuesta del detector, es decir, el espectro.
3. La información que se obtiene al analizar el espectro entregado por el detector.

Comprender ésto es la primera aproximación para desarrollar una aplicación haciendo uso de Geant4. Este software incluye una gran cantidad de herramientas útiles para la simulación de la interacción radiación-materia, decidir incluirlas o no dentro de una aplicación requiere tener claridad acerca de los fenómenos que se desean estudiar. Para comprobar que los resultados de la simulación son correctos, se analiza si corresponden a la física incluida. Ésta es la forma más inmediata de evaluar los resultados de la simulación.

El mecanismo utilizado en el desarrollo de éste trabajo para comprender la física dentro del detector, la respuesta del detector y qué información se obtiene del espectro que entrega, fue la elaboración de un programa sencillo que simula un detector que permite ver como funciona un detector de radiación gamma, es decir, cuando los fotones inciden sobre el material del detector, qué es lo que detecta y cómo es que se produce el espectro que el finalmente entrega como respuesta a esa interacción.

El programa desarrollado se hizo en C++. En él se tiene un detector de dimensiones aproximadas a las de los detectores del GAMMASPHERE como se describe en la sección 4, por ser de nuestro interés detectores de forma, tamaño y material de este arreglo. Dentro de la simulación se incluye la posibilidad de que ocurra efecto fotoeléctrico y dispersión Compton, efectos descritos en la sección 2, que corresponde en este caso a la física a tener en cuenta. Este programa permite la elección de dos tipos de materiales que son objeto de éste trabajo, Ge y BGO(Bi,Ge,O), es posible, elegir el rango de energía de los fotones incidentes y el número de eventos, así como también, la energía por canal, como lo hace un detector real.

Las secciones eficaces para la ocurrencia de efecto Compton y fotoeléctrico dependen de la energía de los fotones gamma y del material del detector, dentro de la simulación se utiliza las bases de datos del NIST, las cuales están graficadas para energías y materiales de nuestro interés en la Figura (2.2), donde se muestra la dependencia de ocurrencia de estos efectos con la energía y el material.

Los fotones que entregan toda su energía al material del detector son acumulados en el espectro en el fotopico, mientras que para los fotones que hacen dispersión Compton su energía es distribuída de acuerdo con la distribución de probabilidad dada por la sección eficaz de Klein–Nishina [2]. De

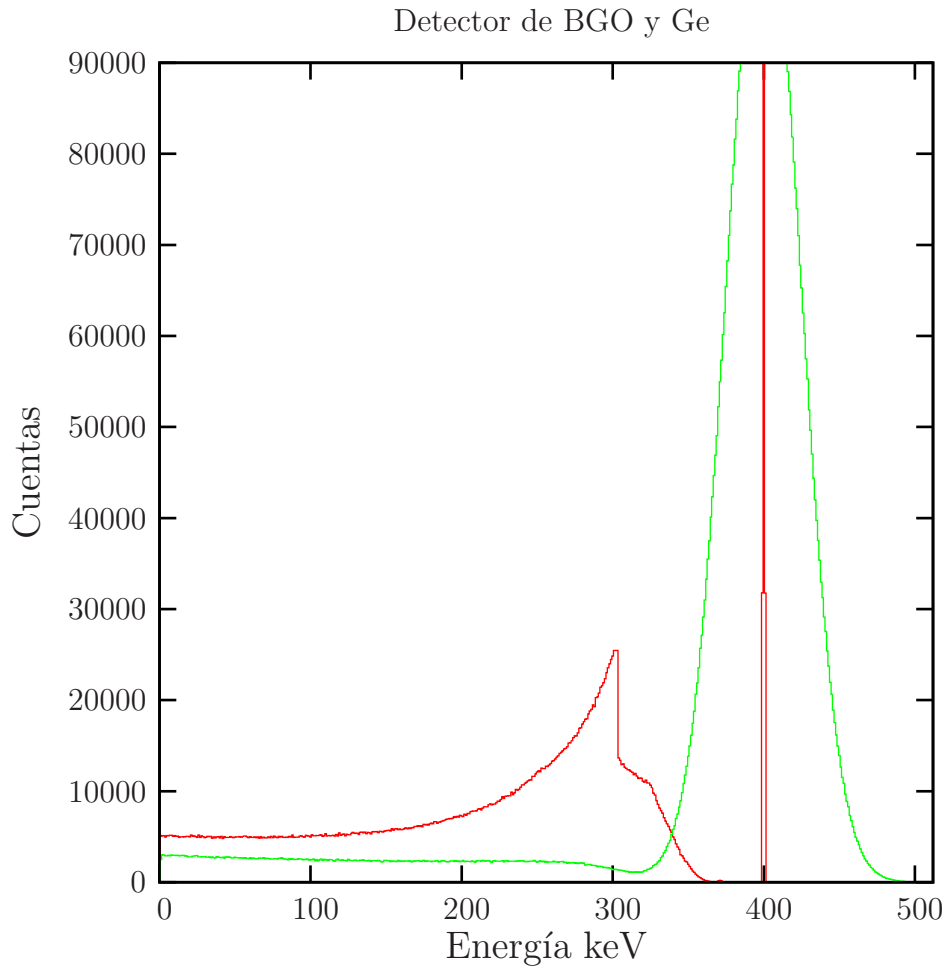


Figura 3.2: Espectro de Ge y BGO, obtenido en la simulación

acuerdo con esto en el espectro entregado por el detector se debería ver el fotopico como una delta de Dirac, pero en realidad se observa una curva de distribución gaussiana. Es así como los detectores distribuyen las energías en los canales del detector, cada curva gaussiana tiene un ancho $FWHM$ medido al 60% de su altura máxima. Esto se trató en la sección 2.3. Para el cálculo del $FWHM$, la relación entre energía y $FWHM$ está dado por:

$$FWHM = A + B \times \sqrt{E_\gamma} \quad (3.1)$$

De la simulación se obtiene el siguiente espectro de la figura 3.2

En él, se compara la eficiencia y resolución de los dos detectores de interés Ge, y BGO. Al analizar el espectro se obtiene información acerca de la física ocurrida dentro del detector, se observa lo siguiente:

1. El detector con mejor resolución es el Ge, el fotopico tiene un aspecto de Delta de Dirac con un FWHM = 1.54 keV, mientras que el fotopico para el BGO es una gaussiana con un FWHM = 115.11 keV, lo que muestra claramente la alta resolución para el Ge de $r=0.19$ comparada con la de BGO de $r=14.38$.
2. La energía cinética máxima es de 603 keV, alcanza a tener un corte abrupto para el Ge y más suave para el BGO.
3. No aparece pico de retrodispersión pues no ha sido incluido en la física en este caso.
4. La contribución para el fondo Compton es mayor en el Ge que para el BGO, lo cual concuerda con las secciones eficaces.
5. La altura del fotopico es mayor para el Ge que para el BGO, lo cual concuerda con su eficiencia.

Capítulo 4

Gammasphere

Gammasphere es el mejor sistema de detección de la radiación gamma utilizado para el estudio de la estructura nuclear. La parte más importante de Gammasphere la constituyen dos tipos diferentes de detectores trabajando en equipo: 110 detectores de Germanio rodeado cada uno por un sistema de siete detectores de BGO. Los detectores de Germanio, con su alta resolución y a pesar de su baja eficiencia son los encargados de producir las señales analizables posteriormente. El papel de los BGO es “pasivo”: dada su alta eficiencia y a pesar de su bajísima resolución, construyen un apantallamiento que reduce fuertemente el número de eventos Compton en los detectores individuales de Ge. Los BGO hacen el papel de supresores Compton haciendo uso del método de coincidencias así, si una señal que es registrada simultáneamente en un Ge y un BGO se asume que uno corresponde al fotón incidente y el otro al dispersado, por lo tanto ésta energía no se tiene en cuenta en el espectro.

Los detectores en el gammasphere, están distribuidos en 19 anillos y cada uno de los Germanios tienen una posición de coordenadas (θ, ϕ) , como se ilustra en la Figura (4.2). En éste trabajo se utilizaron las posiciones facilitadas en [[3]], para la ubicación de los detectores de Ge y para las posiciones de los BGOs se trabajó con los datos calculadas por [[4]].

El interés de éste trabajo se centra en hacer espectroscopía con los detectores de BGO por su alta eficiencia, lo cual es posible ya que éstos tienen electrónica separada, es decir es posible obtener información de cada uno de los detectores de BGO y del conjunto de ellos.

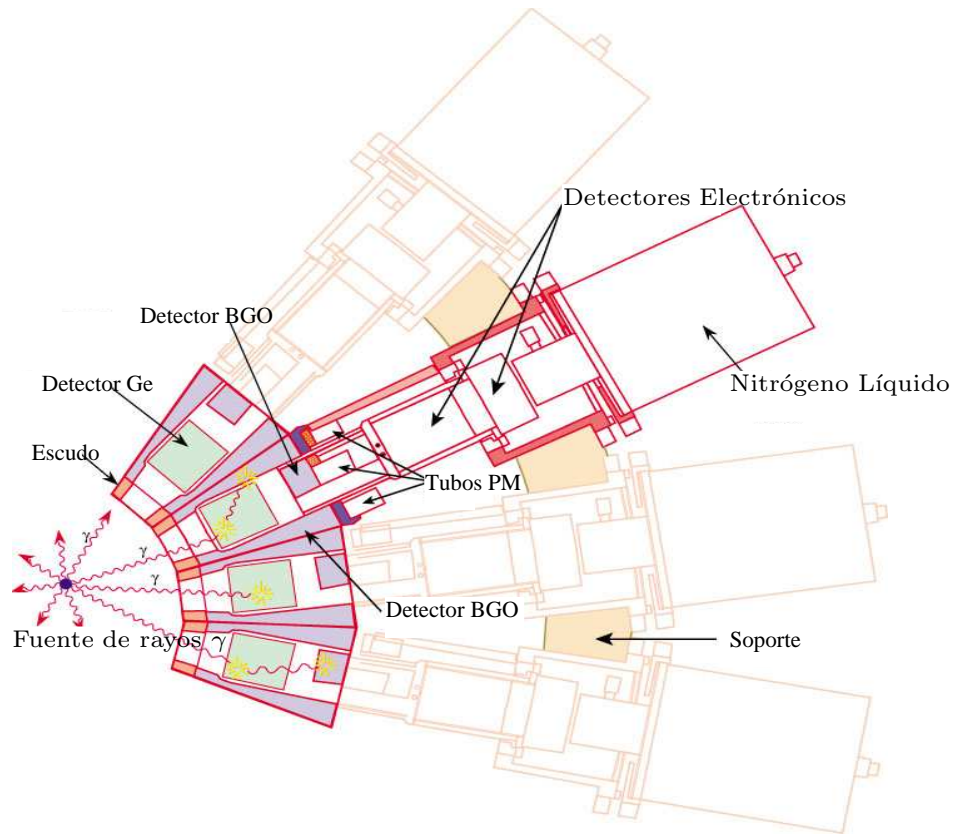


Figura 4.1: Posición de los detectores en Gammasphere

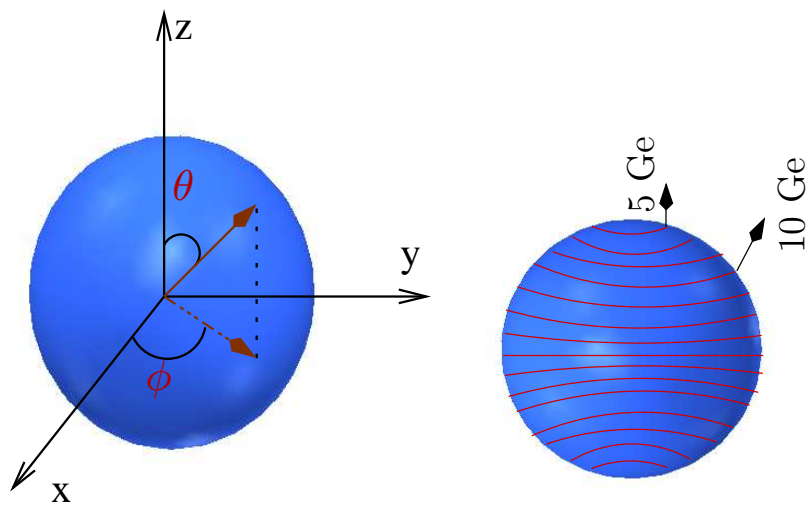


Figura 4.2: Posición de los detectores de Ge en Gammasphere

Capítulo 5

Geant4: Geometry and Tracking

Geant4 es un API (Application Interface), desarrollado en el CERN, como resultado de un trabajo de cooperación de varios institutos y universidades que ponen su experiencia en el campo de la simulación logrando así la realización del proyecto más ambicioso de esta naturaleza. Geant4, es entonces un software implementado en C++, que ha sido construido y diseñado para ser usado en diferentes aplicaciones como la simulación de experimentos que involucran el paso de partículas a través de la materia, es usado en diferentes aplicaciones de la física de partículas, de altas energías y en astronomía, en física médica entre otras.[5]

Geant, surge por una necesidad tecnológica ya que los experimentos modernos de física nuclear y física de partículas requieren de un gran número de detectores de geometrías complejas, que en el momento de la experiencia arrojan una gran cantidad de datos imposibles de analizar sin tener una idea previa de lo que el experimento debe dar, esto implica la necesidad de un software robusto que permita hacer simulaciones manejando gran cantidad de variables del experimento y así poder predecir los resultados, interpretando los datos que arroja la simulación, y a la vez permita estudiar el paso de la radiación por la materia, lo que en el experimento no es posible ver.

Con Geant4 se puede: hacer un diseño completo de una geometría compleja con los materiales requeridos, de manera que reproduzca con la mayor precisión el detector del experimento; obtener la trayectoria seguida por las partículas dentro del material antes y después de que suceda la interacción, junto con la energía depositada en cada paso mostrando el proceso mediante el cual lo hizo; es posible además, elegir el tipo de partículas interactuantes, su tiempo de vida, el tipo de procesos que realizan e introducir campos externos electromagnéticos.

Algo que se debe tener en cuenta es que Geant4 por si sólo no es una aplicación, si no que, haciendo uso de él, se pueden desarrollar aplicaciones de arreglos de detectores, y que la física involucrada es determinada por el usuario, quien debe tener muy en claro los procesos que ocurren al interior del detector y cuales de esos procesos desea incluir al desarrollar la aplicación. Una práctica aconsejable es ir comprobando que la simulación arroje lo esperado de acuerdo con la física incluida, así se puede determinar que tan confiable es la simulación y si hay algún error, poder determinarlo; de ahí la importancia de conocer la física de lo que ocurre. El software incluye gran parte de los efectos que pueden ocurrir en la interacción radiación-materia, pero la tiene en cuenta dentro de la compilación sólo cuando es incluida en la aplicación.

Su confiabilidad y reconocimiento se han dado gracias a que los resultados obtenidos con las aplicaciones desarrolladas con Geant4, son muy cercanas al compararlas con los resultados de los experimentos. Geant4 ha sido desarrollado en el Cern y se utilizó en el diseño del multi-detector Atlas del colisionador de Hadrones como también, en el diseño de multidetectores como el GASP y el AGATA (Advanced Gamma Tracking Array).

Capítulo 6

Decaimiento Gamma del Continuo Nuclear

El núcleo es un interesante sistema mecánico-cuántico y su comportamiento a altos estados de energía y de spín es todavía una incógnita. Una forma de estudiar la estructura de niveles del núcleo es a través de la espectroscopía gamma, con la cual se ha hecho espectroscopía a baja energía y bajo spín, en éstos rangos el comportamiento del núcleo es ya bien conocido y lo que se conoce para altas energías es una extrapolación del comportamiento a bajas energías, asumiendo que las condiciones son similares aunque éstas no han sido verificadas.

En este trabajo se presenta una herramienta que podría ser útil para hacer espectroscopía gamma a altas energías, utilizando un arreglo de detectores de Ge-BGO y obteniendo la relación entre la multiplicidad (M), número de rayos gamma y la energía (E), junto con el número de detectores que se activan (k) y la energía detectada (H) de la cascada. Éste método muestra que es posible conocer el origen de la cascada, aplicando una función respuesta que contemple los errores propios en un sistema de detección [6]. En lo que sigue se muestra como se produce un núcleo con éstas características y el fundamento teórico del origen de las transiciones gamma a alta energía.

El mecanismo más utilizado para la producción de un núcleo de alto spín y alta energía es una reacción en la cual un núcleo proyectil choca con otro blanco. En éste proceso se distinguen al menos cinco etapas: (a) proyectil que interactúa fuertemente con el blanco, (b) formación de un sistema nuclear compuesto, (c) fisión rápida o fusión completa, (d) emisión de partículas y (e) emisión de rayos gamma.

La formación de sistemas de alto spín es favorecida para núcleos pesados (ya que tienen mayor momento angular) y para ciertas condiciones del

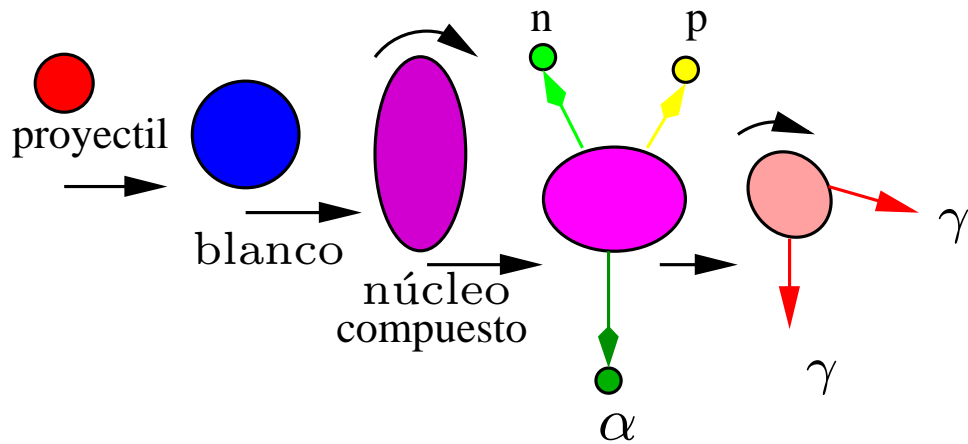


Figura 6.1: Esquema de la reacción fusión-evaporación

parámetro de impacto b de tal manera que el spín es favorecido a medida que aumenta b , pero hasta el límite en que no sea mayor que el radio del núcleo blanco R_b , es decir, en el límite rasante ($b \simeq R_b$), ya que no ocurre fusión pues la interacción nuclear es de corto alcance.

En el momento en que se forma el núcleo compuesto, éste queda con un exceso de energía, una parte es de rotación y la otra conocida como energía de excitación intrínseca; el sistema busca deshacerse del exceso de energía y lo hace inicialmente emitiendo partículas mediante el proceso llamado evaporación (sigue el patrón de distribución de Maxwell-Boltzman), hasta el momento en que la energía de excitación es menor que la energía de ligadura de los nucleones. A este tiempo el núcleo todavía está excitado y el camino para desexcitarse es emitiendo radiación gamma de diferentes energías [7].

En la Figura 6.2, se ilustra el espacio de fase nuclear $E - I$, donde E es la energía de excitación e I es el momento angular del núcleo. En los estados iniciales están los núcleos que tienen alta energía de excitación y que se deshacen del exceso de energía emitiendo partículas α , n , p y rayos γ de alta energía, ésta región se considera continua por la densidad de niveles. Luego cuando el núcleo ha alcanzado cierto equilibrio emite rayos γ en un amplio rango de energías que abarca desde transiciones estadísticas hasta transiciones rotacionales. Allí se encuentran los estados de entrada, conformados por los núcleos cuyos nucleones tienen energías de excitación intrínseca del orden de la energía de ligadura de un nucleón. Se conocen como estados de entrada porque a partir de ellos la relajación se da vía la emisión gamma.

Los núcleos que pueblan los estados de entrada sufren una gran cantidad

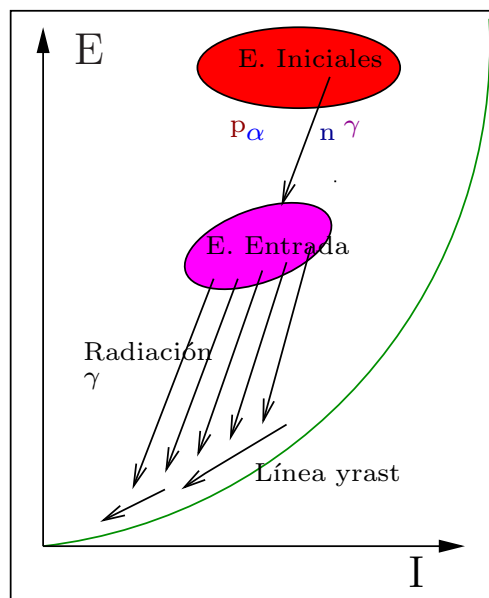


Figura 6.2: Esquema espacio de fase nuclear $E - I$

de transiciones hasta alcanzar su estado base, ese conjunto de transiciones se conoce como **cascada**. Cada una se caracteriza por el número de transiciones que la componen, es decir, por su multiplicidad M y por su energía E .

Un espectro gamma se obtiene al registrar la totalidad de las cascadas originadas en una reacción específica. Al analizar el espectro gamma se encuentran tres regiones a tener en cuenta: (a) bajas energías ($\approx \leq 1\text{MeV}$), (b) abultamiento colectivo ($1 \leq E\text{MeV} \leq 2$), (c) altas energías de transición.

A energías $\approx \leq 1\text{MeV}$, en el espectro aparecen picos bien definidos correspondientes a transiciones entre estados discretos de bajo spín, para un rango entre $1 \leq E\text{MeV} \leq 2$, aparece un abultamiento debido a transiciones colectivas entre dos estados cercanos y a energías superiores, la intensidad de la radiación sigue un comportamiento exponencial con la energía.

Uno de los mecanismos de excitación intrínseca consiste en la rotación coherente de los nucleones alrededor de un eje perpendicular al eje de simetría del núcleo. Ésto define los estados rotacionales que son el origen de transiciones rotacionales, cuyo ordenamiento regular puede interpretarse como una consecuencia del comportamiento del núcleo como rotor rígido. La energía asociada a un estado puramente rotacional es análoga al caso clásico de acuerdo con la ecuación 6.1. Ésta también es conocida como energía en el estado yrast.

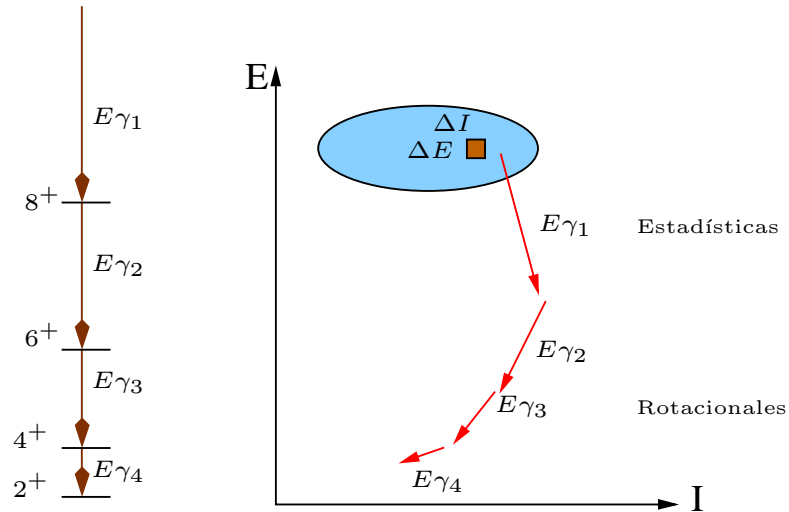


Figura 6.3: Emisión cascada gamma

$$E = \hbar^2/2\mathfrak{S}I(I + 1) \quad (6.1)$$

donde, E es la energía en el estado yrast, \mathfrak{S} es el momento de inercia que da cuenta de la distribución de la materia nuclear y por lo tanto está relacionado con la deformación del núcleo e I es el momento angular. En un capítulo posterior se verán algunos resultados de cascadas rotacionales en las que se obtiene los diagramas (k,H) .

6.1. Relación entre las cantidades (M,E) y (k,H)

Como se mencionó anteriormente, los núcleos que pueblan los estados de entrada sufren una serie de transiciones hasta llegar a su estado base, ese conjunto de transiciones se conoce como cascada. Una cascada se caracteriza por: i) su multiplicidad M , número de rayos gamma que emite y ii) su energía E , que corresponde a la suma de las energías de los rayos gammas emitidos. En un sistema de detección las cantidades k y H hacen referencia al número de detectores activados y a la energía detectada de la cascada respectivamente.

En la Figura 6.3, se señala una región en el espacio de fase $E - I$, marcado con un ΔE y ΔI , a partir del cual se genera una cascada gamma de multiplicidad M , y energía E . La energía de transición se calcula mediante

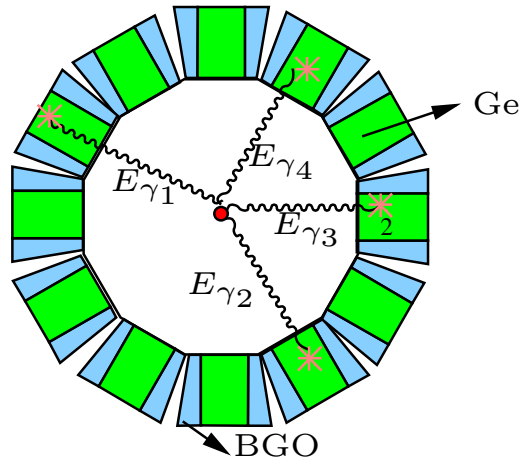


Figura 6.4: Detección ideal

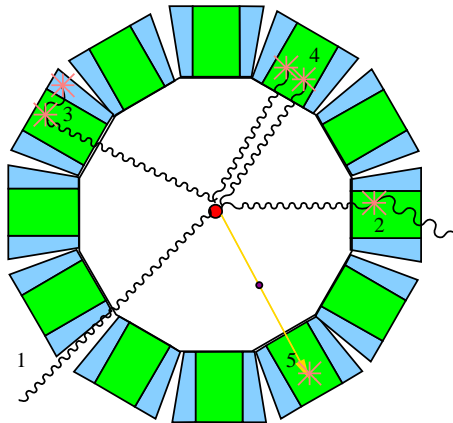


Figura 6.5: Problemas en los sistemas de detección

la ecuación:

$$E = \hbar^2 / \mathfrak{S}(2I - 1) \quad (6.2)$$

donde E , corresponde a la energía de transición entre dos estados consecutivos, teniendo en cuenta que ésta varía de acuerdo a: $E_{\gamma} = E_I - E_{I-2}$.

En principio, para establecer la relación $M \leftrightarrow k$ y $E \leftrightarrow H$, lo ideal es tener un sistema de detección con el 100 % de eficiencia, con una cobertura de un ángulo 4π y alta segmentación, de tal forma que: i) cada detector registre un rayo gamma de la cascada, es decir $M = k$, y ii) que se registre la totalidad de la energía de la cascada $E = H$ Figura (6.4).

Sin embargo, éstos sistemas de detección ideales no existen y lo que real-

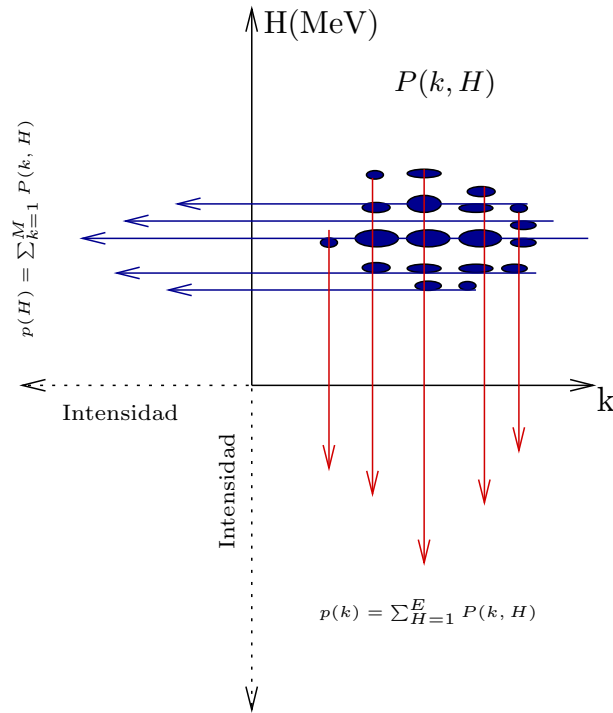


Figura 6.6: Construcción de las proyecciones para H y k

mente ocurre en un sistema real es lo siguiente: Figura (6.5)

1. algunos rayos escapan del detector
2. el rayo deja parte de su energía y escapa
3. hay dispersión del rayo entre los detectores
4. a un detector llega más de un rayo
5. otro tipo de partículas llegan al detector

En éste trabajo se simula la detección de cascadas gamma del continuo nuclear y se obtienen los diagramas (k, H) , un paso importante en el camino de encontrar la relación propuesta plamada en [[8]][[9]][[10]]. Y resumida en la ecuación (6.3)

$$(M, E) \leftarrow FuncionRespuesta \leftarrow (k, H) \quad (6.3)$$

Un diagrama H-k es la representación de la probabilidad de que cierta cantidad de energía sea registrada por un número de detectores $P(k, H)$. Figura (6.6) En ella, se ilustra la obtención de las proyecciones para H y k, las cuales son histogramas en función de la energía y el número de detectores activados en una cascada respectivamente.

Capítulo 7

Simulación

7.1. Geometría de los detectores

En esta aplicación se implementa un arreglo de detectores, con 110 celdas, cada una con: un detector de Germanio rodeado de 6 detectores de BGO formando un hexágono. Es posible disparar cascadas gamma de diferente multiplicidad y energía. De éste arreglo se obtiene la energía depositada en la parte sensible de cada uno de los detectores de Ge y BGO y con ello construir el espectro gamma. Se construyen los diagramas (k, H) , junto con las proyecciones para H y para k , obteniendo como resultado la relación $(M, E) \rightarrow (k, H)$.

La geometría desarrollada en esta aplicación, se basa en el arreglo de multitudetectores de Ge y BGO (Bismuto, Germanio, Oxígeno), del Gammasphere. Se tiene entonces un arreglo que consta de 110 detectores de Ge, y 660 detectores de BGO, de tamaño y forma aproximados a los del Gammasphere. Ver Figuras 7.2 y 7.1

Los detectores de Ge, son de forma cilíndrica, rodeados cada uno de seis detectores de BGO, los cuales tienen forma de cuñas; estas celdas a su vez están ubicadas en una distribución esférica cubriendo aproximadamente el 80% del ángulo sólido de 4π .

La simulación se ha desarrollado haciendo uso del paquete Geant4, siguiendo la estructura de los ejemplos que vienen con el software, la implementación de la geometría está definida en la clase `A01DetectorConstruction.cc`. Esta clase es derivada de `G4VUserDetectorConstruction` del Geant4. En ella se describen todas las propiedades del detector (geometría, materiales, regiones sensibles y visualización de las regiones sensibles). En la Tabla 7.1, se encuentran las formas y dimensiones de la geometría utilizada en ésta apli-

```

G4double MinRad = 0*cm;
G4double MaxRad = 3.5*cm;
G4double HalfLength = 3.75*cm;
G4double MinPhi = 0*deg;
G4double MaxPhi = 360*deg;
G4Tubs* Ge1Solid=new
G4Tubs("detector",MinRad,MaxRad,HalfLength,MinPhi,MaxPhi);
G4LogicalVolume* GeLogical
=new G4LogicalVolume(Ge1Solid,"Ge1Logical",0,0,0);
G4double longX = 1*cm;
G4double shortX = 2*cm;
G4double longY = 0.3*cm;
G4double shortY =1*cm;
G4double HalfLengthZ = 9.4*cm;
G4Trd* BGOSolid =new
G4Trd("BGOdetector",longX,shortX,longY,shortY,HalfLengthZ);

```

Tabla 7.1: Geometría detectores de Ge y BGO

cación para los detectores de Ge y BGO respectivamente.

En las Figuras 7.1 y 7.2, se muestra la geometría y dimensiones de los detectores utilizados.

Es importante hacer notar que en el desarrollo de ésta aplicación se utiliza un volumen sólido para cada una de las geometrías y a partir de él se generan tantos volúmenes lógicos y físicos como se necesite.

7.2. Materiales

Dentro de las herramientas del Geant4 están las clases G4Material y G4Element que permiten definir los diferentes materiales de los cuales fueron hechos los detectores, teniendo en cuenta que la materia está constituida por elementos y éstos de isótopos. Dependiendo de las necesidades dentro de la aplicación, los materiales pueden ser elementos químicos puros o compuestos. La clase G4Material [5] describe las propiedades macroscópicas, como densidad, estado, temperatura y presión; contiene toda la información de los elementos y sus isótopos y la clase G4Element[5], contiene las propiedades de los átomos como número atómico, nucleones y masa atómica

En la Tabla 7.2 se describen los materiales utilizados en ésta aplicación. Para incluir un material simple como un elemento químico basta con especificar su densidad (density), masa molar (a) y número atómico. Para el

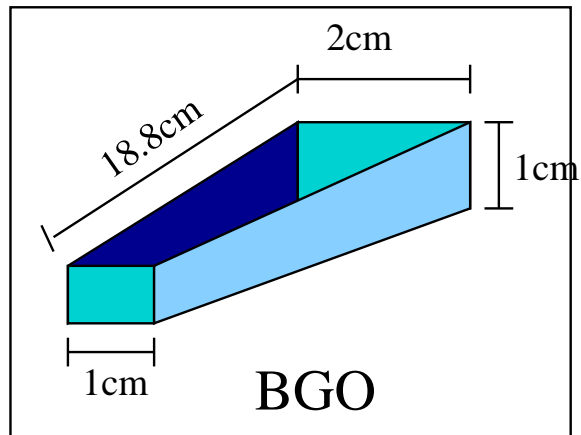


Figura 7.1: Geometría detector de BGO

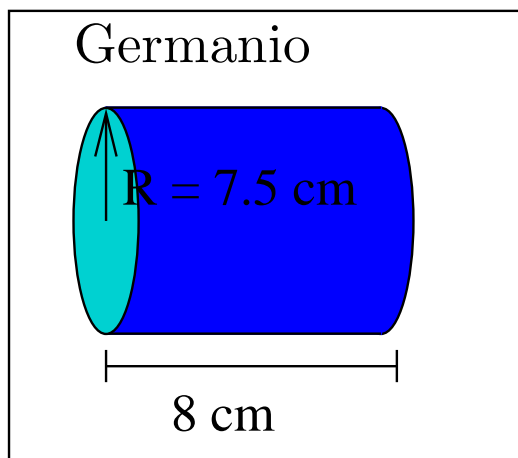


Figura 7.2: Geometría detector de Ge

```

G4double a;
G4double z;
G4double density;
G4double weightRatio;
G4String name;
G4String symbol;
G4int nElem;
G4int natoms;
a = 14.01*g/mole;
G4Element* elN =new
G4Element(name="Nitrogen", symbol="N", z=7., a);
a = 16.00*g/mole;
G4Element* elO = new
G4Element(name="Oxigen", symbol="O", z=8., a);
G4Element* elBi =new
G4Element(name="Bismuth", symbol="Bi", z=83., a=208.98038*g/mole);
a = 72.61*g/mole;
G4Element* elGe= new
G4Element(name="Germanio", symbol="Ge", z=32., a);
// Air
density = 0.0001*mg/cm3;
air = new G4Material(name="Air", density, nElem=2);
air->AddElement(elN, weightRatio=.7);
air->AddElement(elO, weightRatio=.3);
//Germanio
density = 5.32*g/cm3;
Ge =new G4Material(name="Germanio", z=32., a, density);
// BGO
density= 7.13*g/cm3;
BGO = new G4Material(name="BGO", density, nElem=3);
BGO->AddElement(elBi, natoms=4);
BGO->AddElement(elGe, natoms=3);
BGO->AddElement(elO, natoms=12);

```

Tabla 7.2: Definición de los materiales

<pre> G4SDManager* SDman = G4SDManager::GetSDMpointer(); 4String SDname; ostringstream name; for(i = 1; i ≤ 2; i++) { name<< "Ge[" << i << "]" ; Ge[i] =new A01EmCalorimeter(SDname=name1.str()); SDman->AddNewDetector(Ge[i]); GeLogical[i]->SetSensitiveDetector(Ge[i]); } </pre>
sensibilidad de los detectores

Tabla 7.3: sensibilidad de los detectores

caso se incluyen los elementos Nitrógeno(N), Oxígeno(O), Germanio(Ge) y Bismuto(Bi).

Para definir una mezcla por fracción de masa, se definen los elementos, la densidad de la mezcla y se da la fracción de masa de cada componente, en nuestro caso, el aire.

Para incluir un material compuesto como el BGO, se especifican los elementos químicos, la densidad del compuesto y se define el material especificando el número de átomos de cada elemento.

7.3. Sensibilidad

Dentro de la clase que describe la geometría de los detectores también se incluyen sus propiedades como partes sensibles, que hacen referencia a las regiones del arreglo de las cuales se va a obtener la información requerida. En la Tabla 7.3, aparecen las líneas que incluyen la sensibilidad en ésta aplicación.

7.4. Física

El Geant4 dentro de sus herramientas cuenta con la clase G4VuserphysicsList [5], a partir de la cual se puede incluir las partículas y los procesos físicos usados, éstas clase es derivada de G4ParticleDefinition[5]. Cada partícula está representada por su propia clase, la cual provee las características individuales de cada una: nombre, carga, masa y spin. Dentro de las partículas utilizadas están: electrón, positrón y rayos gamma. Dentro de los procesos físicos utilizados se incluyen los procesos electromagnéticos: Efecto Fotoeléctrico, Dispersión Compton y Producción de pares; además se incluye la posibilidad de que haya transporte, es decir, que no haya interacción.

7.5. GPS: Generación de una fuente de partículas

Para la generación de partículas primarias se hace uso de la clase `G4GeneralParticleSource` del Geant en lugar de la clase `G4ParticleGun`. Ésta permite especificar la distribución espectral, espacial y angular de las partículas primarias así como también la generación de cascadas de diferente energía y ser disparadas simultáneamente. Dentro de una aplicación ésto se puede hacer de forma interactiva con el usuario o mediante un archivo de entrada. En la aplicación presentada se hace a través de un archivo de entrada donde se introducen todas las características de las fuentes de partículas utilizadas. En la tabla 7.4 se ilustran algunas líneas del archivo de entrada utilizado.

7.6. Evento

Un evento consiste en la generación de cascadas de rayos gamma de diferente energía, las cuales son generadas en el centro del arreglo en dirección isotrópica, llegan a los detectores donde interactúan electromagnéticamente con su parte sensible. Allí se guarda la energía que deja el rayo gamma y la posición dónde deja la energía dentro del detector.

Algunos aspectos importantes de la generación de los eventos primarios son manejados desde un archivo de entrada como se ilustró en la sección precedente.

7.7. Respuesta del detector

La información requerida para analizar un evento es guardada en un `Hits` y es recolectada de los detectores luego de cada evento para ser registrada en un archivo que tiene extensión `.aida`, para luego ser analizada.

```

#Selecciona una fuente gamma
/gps/particle gamma
#Tipo de fuente en cuanto a forma
/gps/pos/type Point
#Posición de la fuente
/gps/pos/centre 0. 0. 0. cm
#Fija la energía del rayo gamma
/gps/energy 1.173 MeV
#Dirección en la cual salen las partículas
/gps/ang/type iso
#Angulos theta y phi entre los cuales se emiten los rayos
/gps/ang/mintheta 53 deg
/gps/ang/maxtheta 127.1186 deg
/gps/ang/minphi 140.7 deg
/gps/ang/maxphi 220 deg
# ubica otra fuente gamma
/gps/source/add 1
/gps/particle gamma
/gps/pos/type Point
/gps/pos/centre 0. 0. 0. cm
/gps/energy 1.332 MeV
/gps/ang/type iso
/gps/ang/mintheta 53 deg
/gps/ang/maxtheta 127.1186 deg
/gps/ang/minphi 140.7 deg
/gps/ang/maxphi 220 deg
#Dispara simultáneamente los dos rayos gamma
/gps/source/multiplevertex true
#Numero de eventos
/run/beamOn 1000000
GPS.mac

```

Tabla 7.4: Comandos GPS

Capítulo 8

Resultados

Se ha construido un arreglo de detectores que consta de 110 detectores de Germanio y 660 de BGO los cuales cubren un ángulo sólido del 80 % de 4π . En la Figura 8.1 se muestra una vista general de la geometría desarrollada, obtenida con Geant 4.

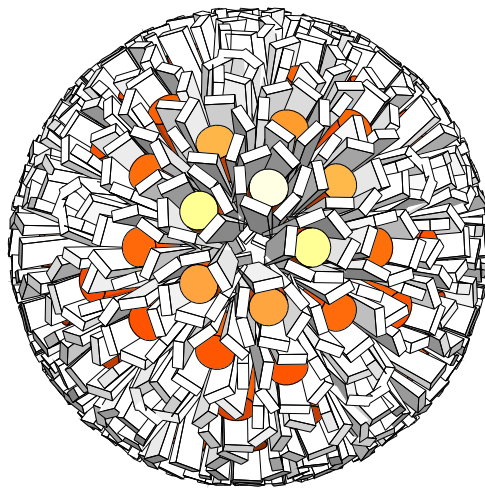


Figura 8.1: 110 detectores de Ge y 660 detectores de BGO en una distribución esférica

Como una primera prueba para conocer la respuesta de éste arreglo, se obtienen espectros de ^{60}Co con los detectores de Ge y BGO ilustrados en las Figuras (8.2,8.3). En ellos se aprecia la gran resolución del Ge comparada con la del BGO dada por el ancho del fotopico, así como también, el fondo y la múltiple dispersión Compton. En el espectro de BGO se presenta un

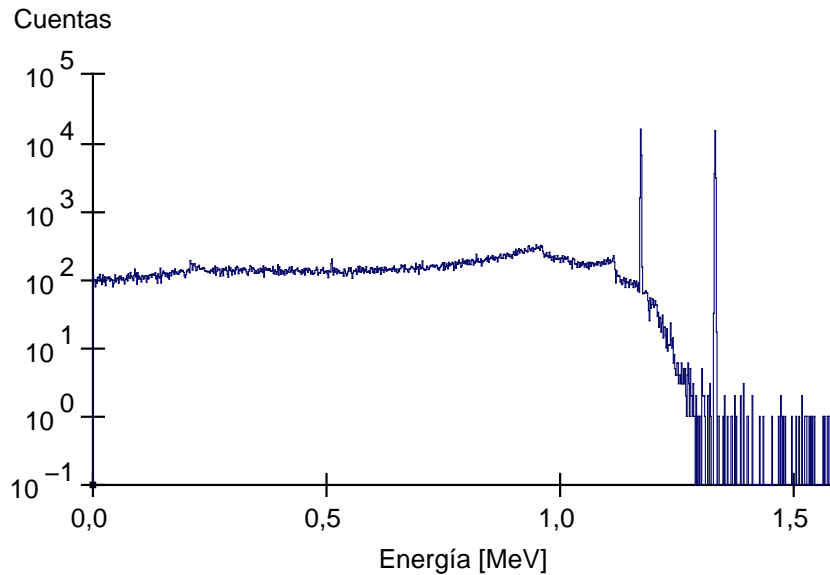


Figura 8.2: Espectro Gamma de ^{60}Co tomado con el arreglo de detectores de Ge

abultamiento alrededor de 0.2 MeV, debido a fotones retrodispersados con los detectores del lado.

En la Figura (8.2) se ilustra el espectro Gamma para el ^{60}Co donde se ve claramente los dos picos correspondientes a 1.173 y 1.332 MeV. Tomado con detectores de Ge. El FWHM es de 0.00174 y de 0.0018 MeV respectivamente. Y la resolución de los picos es de 0.148 % y de 0.136 %. Se observan dos bordes Compton a 1.063 MeV y a 1.22 MeV correspondientes a la energías cinéticas máximas propias de éstas energías.

En la Figura (8.3) se ilustra el espectro Gamma para el ^{60}Co , tomado con detectores de BGO, donde se ven claramente los picos correspondientes de las energías 1.173 y 1.332 [MeV] del cobalto. El FWHM es de 0.1394 y de 0.149 MeV respectivamente y la resolución de los picos es de 11.9 % y de 11.15 %.

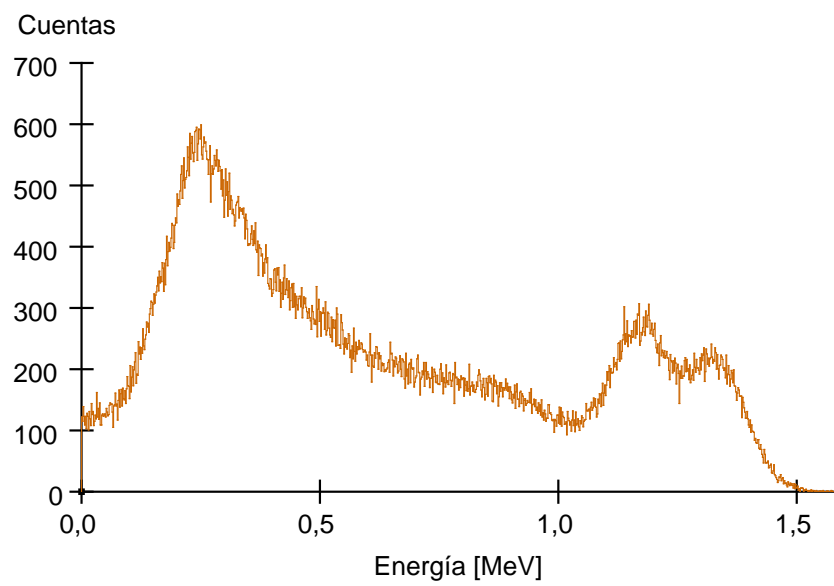


Figura 8.3: Espectro Gamma de ^{60}Co tomado con el arreglo de detectores de BGO

8.1. Cascadas Monoenergéticas (5,5) y (10,10)

En ésta sección se presentan las relaciones $(M, E) \rightarrow (k, H)$ para cascadas gamma (5,5[MeV]) y (10,10[MeV])

8.1.1. Cascadas Monoenergéticas

Las cascadas monoenergéticas están caracterizadas por tener una multiplicidad (M), con todos sus rayos de igual energía. En la Figura [8.4] se ilustran cascadas de éste tipo.

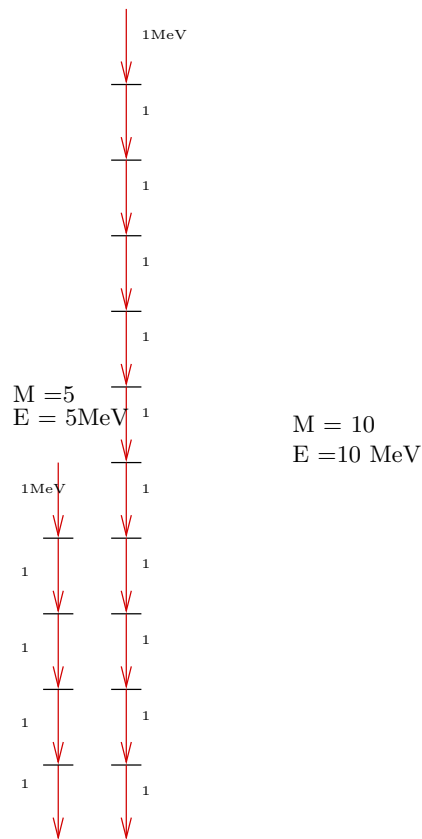


Figura 8.4: Diagrama cascadas monoenergéticas

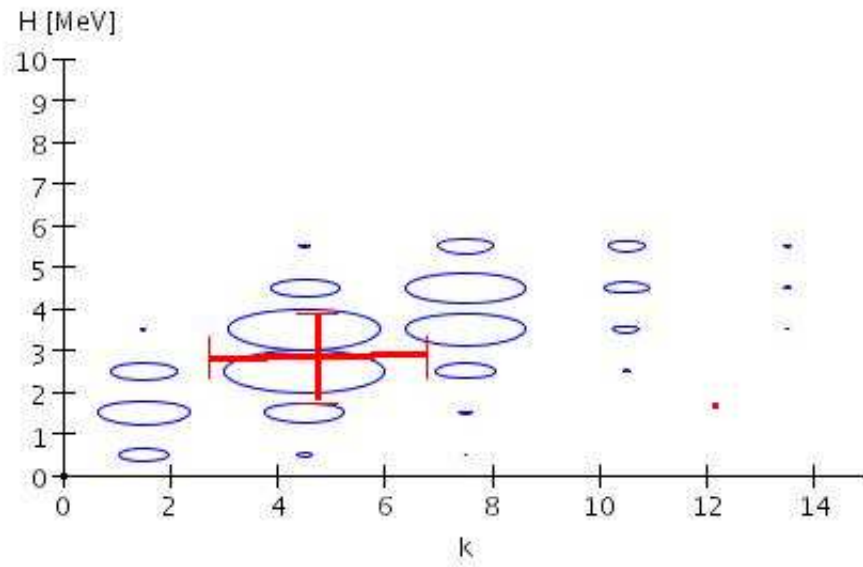


Figura 8.5: Diagrama H k para cascadas $(5,5) \rightarrow (4.74 \pm 2.1, 2.8 \pm 1.1)$.

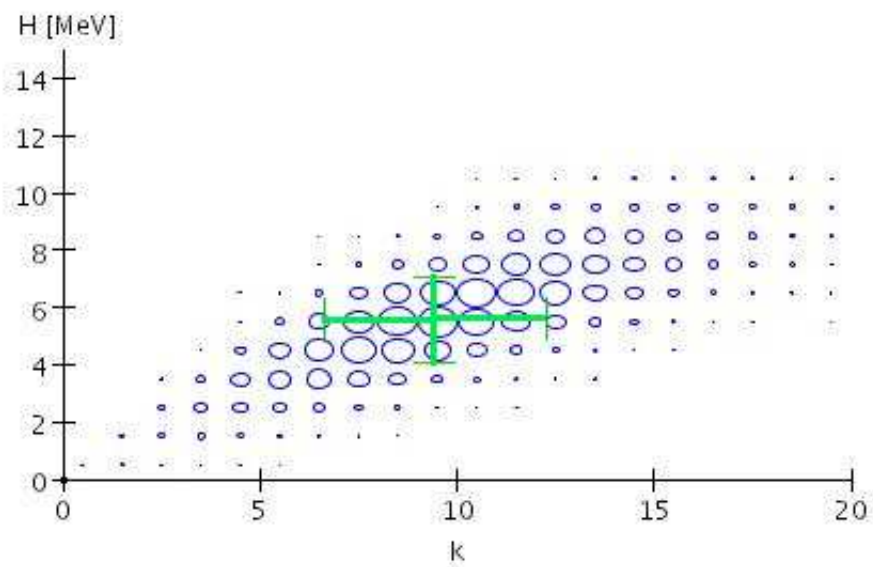


Figura 8.6: Diagrama H k para cascadas $(10,10) \rightarrow (9.4 \pm 2.8, 5.6 \pm 1.5)$.

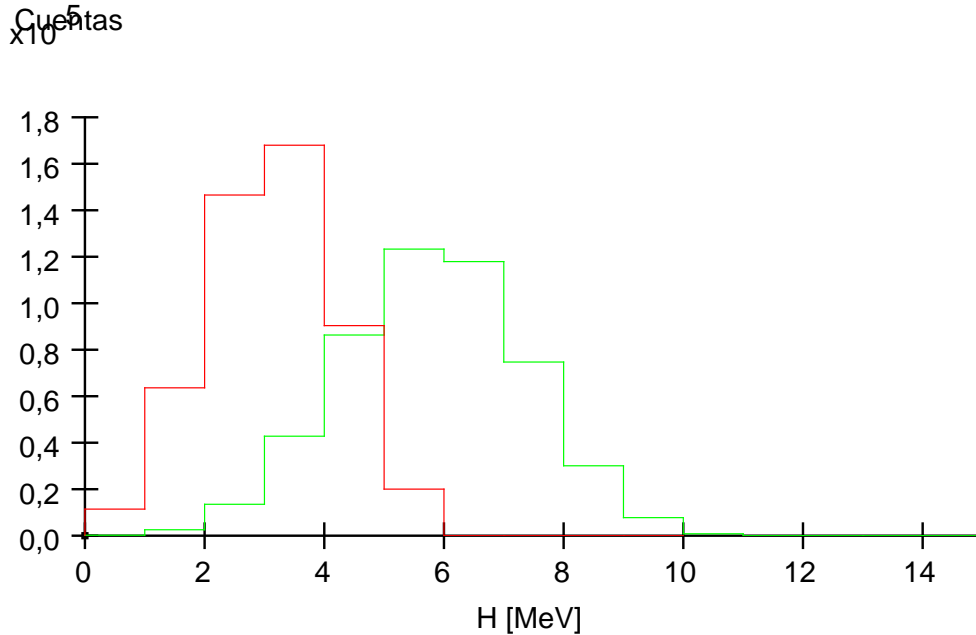


Figura 8.7: Proyecciones de H para cascadas (5,5[MeV]) y (10,10[MeV])

8.1.2. Observación

En las Figuras (8.5) y (8.6), se ilustra \bar{H} y \bar{k} , para cascadas monoenergéticas de $(M,E[\text{Mev}]) = (5,5)$ y $(10,10)$. En éstas se él se observa que una cascada de 5 rayos gamma activa en algunos pocos casos 14 detectores y que unas pocas cascadas de multiplicidad 10, pueden activar en alrededor de 20 detectores.

Una proyección de H, corresponde la suma de detectores que registran igual valor de enegía. $p(H) = \sum_{H=1}^E P(k, H)$.

En la Figura (8.7), se muestran la proyecciones H de las cascadas monoenergéticas. La línea roja para una multiplicidad de 5 y la verde para una multiplicidad de 10.

Una proyección de k, corresponde la suma de las enegías registradas por el mismo número de detectores. $p(k) = \sum_{k=1}^M P(k, H)$.

En la Figura (8.8), se muestran la proyecciones k de las cascadas monoenergéticas. La línea roja para una multiplicidad de 5 y la verde para una multiplicidad de 10.

La Figura (8.11), resume los promedios para H y k de para éstas cascadas, donde se nota que se pueden diferenciar claramente la una de la otra. En

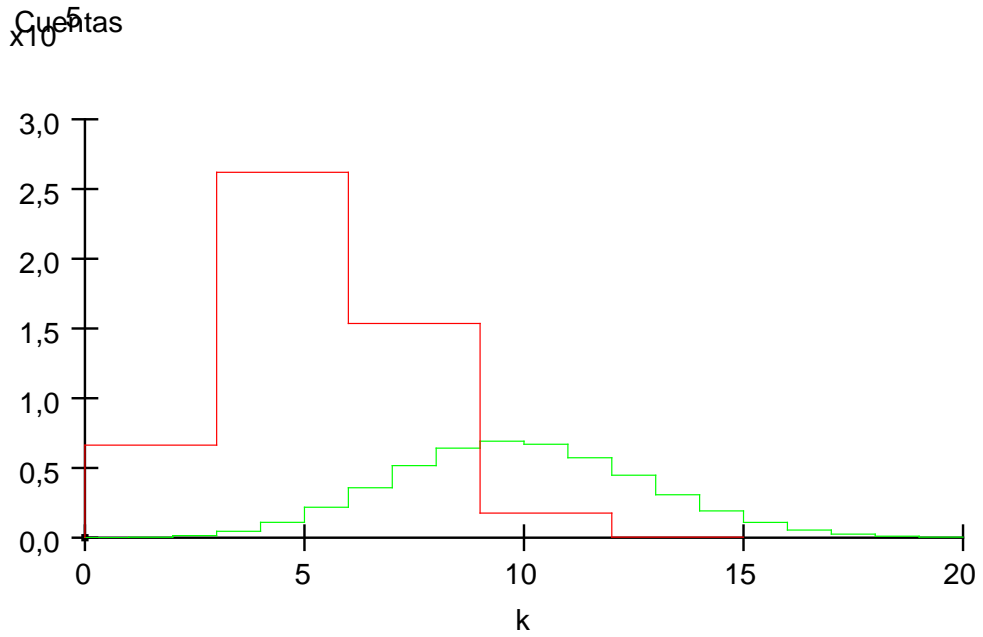


Figura 8.8: Proyecciones de k para cascadas (5,5[MeV]) y (10,10[MeV])

las Figuras (8.9) y (8.10) aparecen los espectros registrados por todos los detectores de Ge y BGO respectivamente.

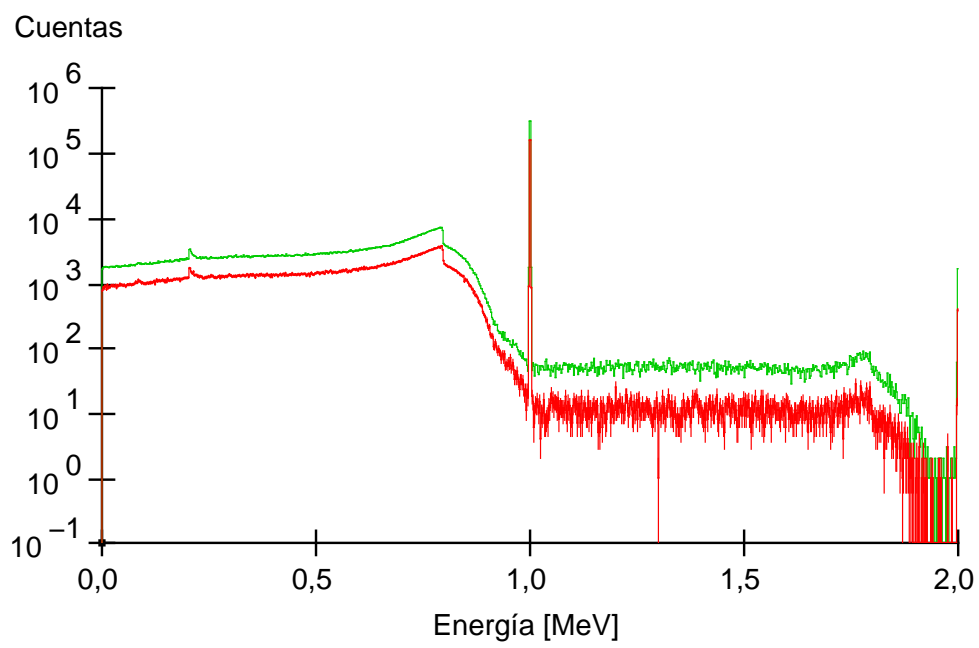


Figura 8.9: Espectro suma para cascadas γ monoenergéticas tomadas con detectores de Ge

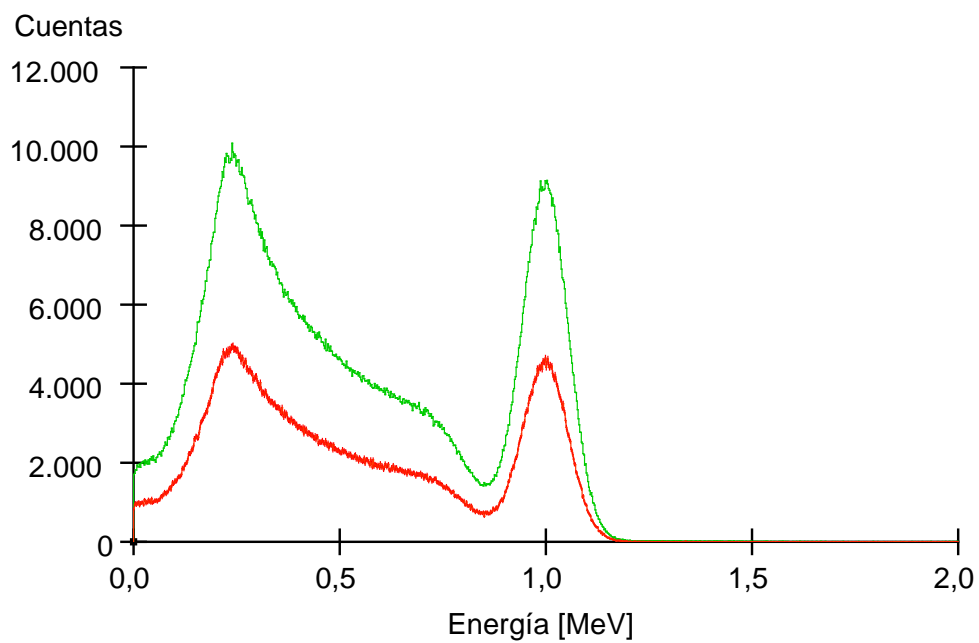


Figura 8.10: Espectro suma para cascadas γ monoenergéticas tomadas con detectores de BGO

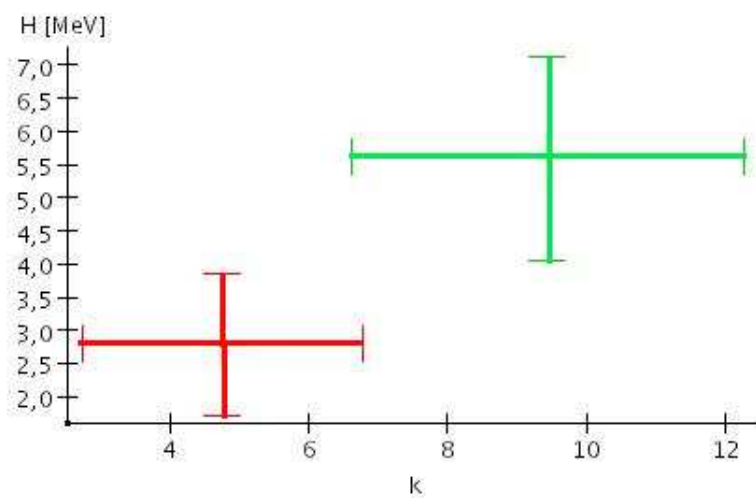


Figura 8.11: \bar{H} y \bar{k} para cascadas monoenergéticas

0.0040[MeV]	0.0934	0.1467	0.2000	0.2534
0.3067	0.3600	0.4134	0.4667	0.5200
0.5734	0.6267	0.6800	0.7334	0.7867
0.8400	0.8934	0.9467	1.000	1.0534
1.1067	1.1600	1.2134	1.2667	1.320
1.3734	1.4267	1.480	1.5334	1.5867
3	5	10		

Tabla 8.1: Energías para cascadas rotacionales y tres rayos estadísticos

8.2. Cascadas Rotacionales

Para generar las energías propias de cascadas rotacionales se hace uso de la ecuación 6.2 la cual relaciona la energía de los estados rotacionales con el espín, tomando como valor característico $I/\hbar = 75 \text{ MeV}^{-1}$ para núcleos con energía de excitación intrínseca rotacional. En la tabla 8.1, se presentan las energías en MeV, para transiciones hasta un espín de 60. Las tres últimas energías corresponden a transiciones estadísticas. En la Figura (8.12), se ilustra una cascada rotacional (7,2[MeV]), donde se observa que: las transiciones disminuyen en magnitud y el espín varía en un factor de 2.

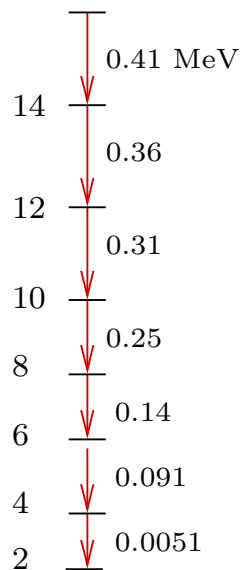


Figura 8.12: Diagrama cascada rotacional

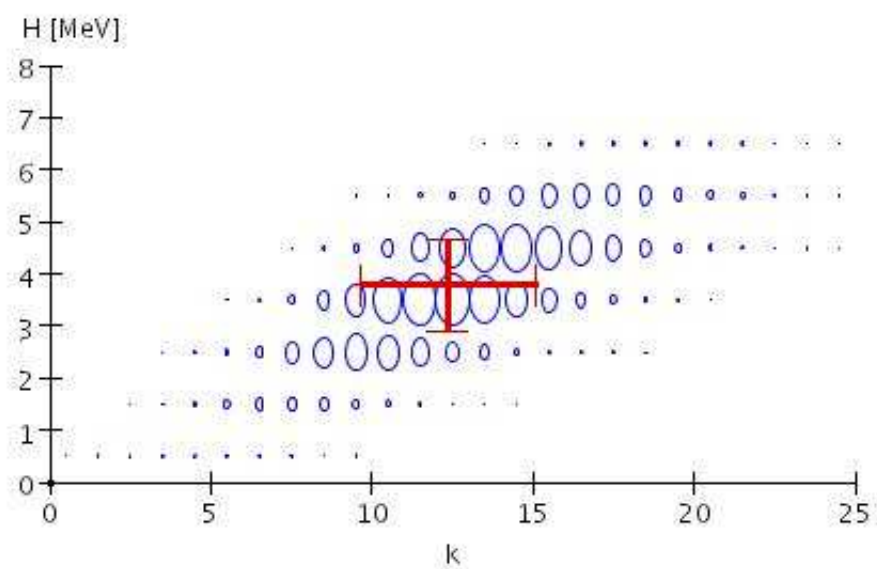


Figura 8.13: Diagrama H k para cascadas (15,6.2) → (12.3 ± 2.6, 3.8 ± 1.0).

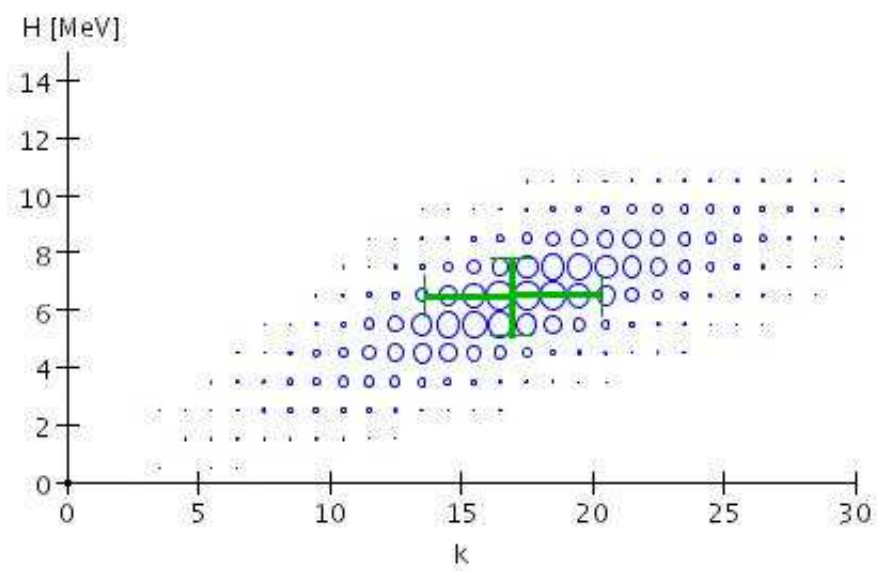


Figura 8.14: Diagrama H k para cascadas (20;11) → (17 ± 3.4; 6.5 ± 1.4).

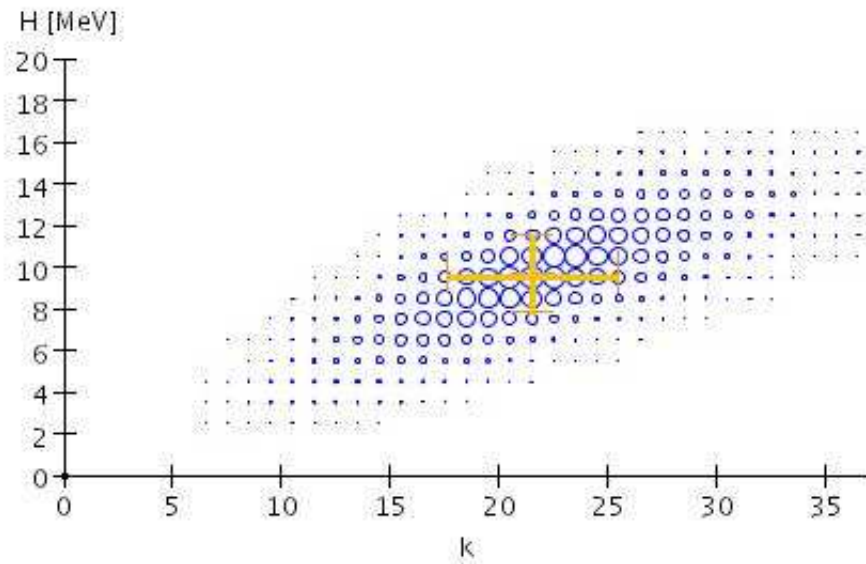


Figura 8.15: Diagrama H k para cascadas (25; 17) → (21,5 ± 3,91; 9,75 ± 1,9).

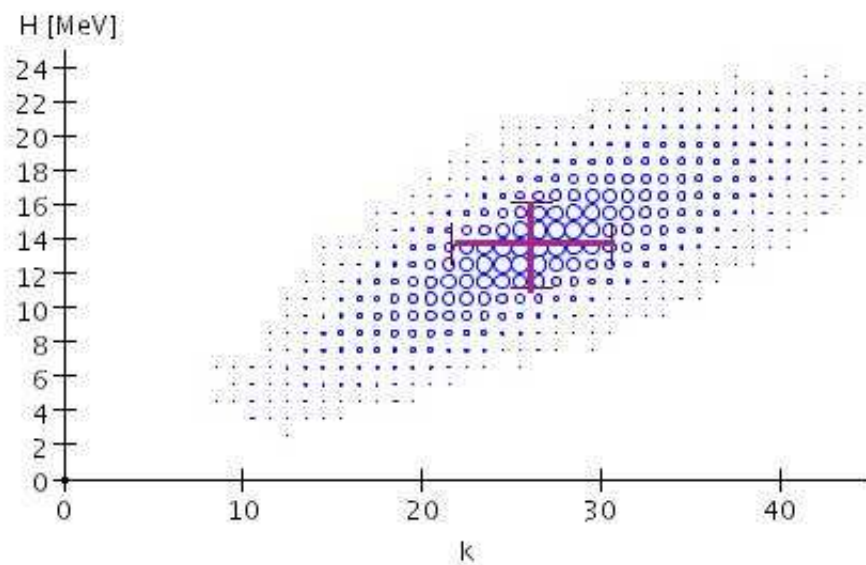


Figura 8.16: Diagrama H k para cascadas (30; 24) → (26,1 ± 4,4; 13,63 ± 2,5).

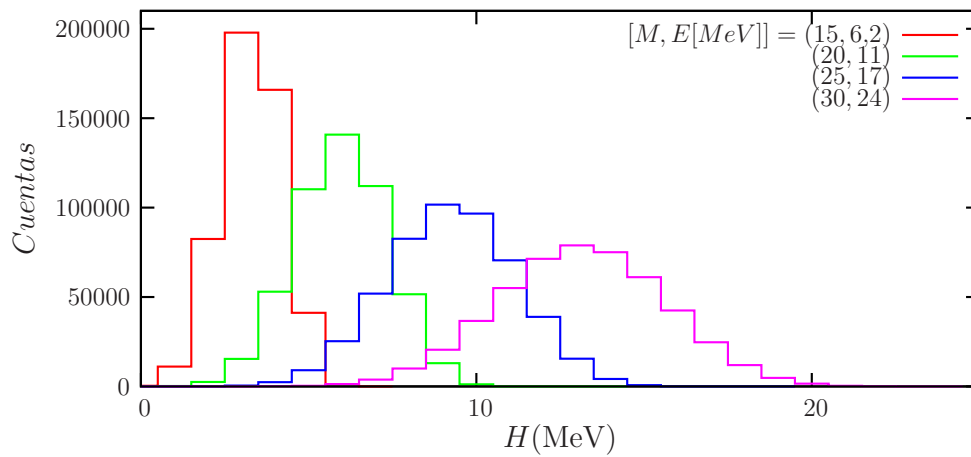


Figura 8.17: Proyecciones H de un conjunto de cascadas (M,E) de diferente origen

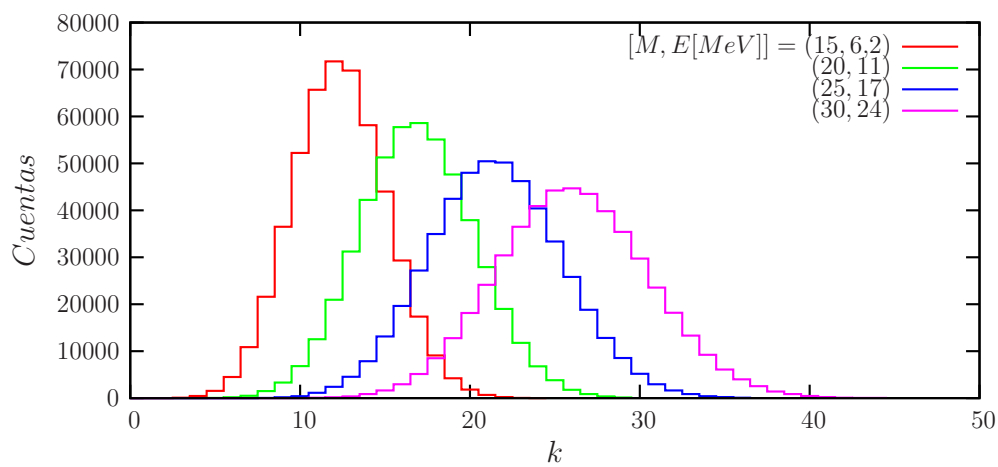


Figura 8.18: Proyecciones k de un conjunto de cascadas (M,E) de diferente origen

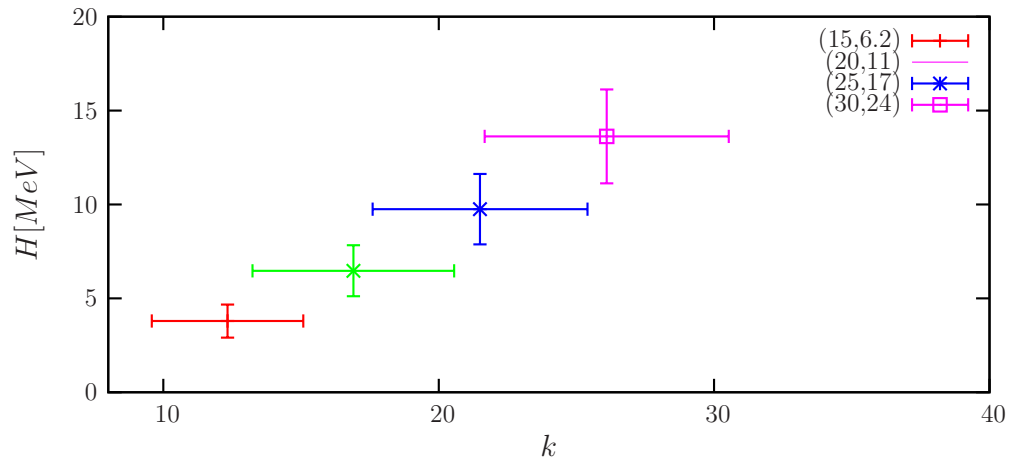


Figura 8.19: H promedio y k promedio de un conjunto de cascadas (M,E) de diferente origen

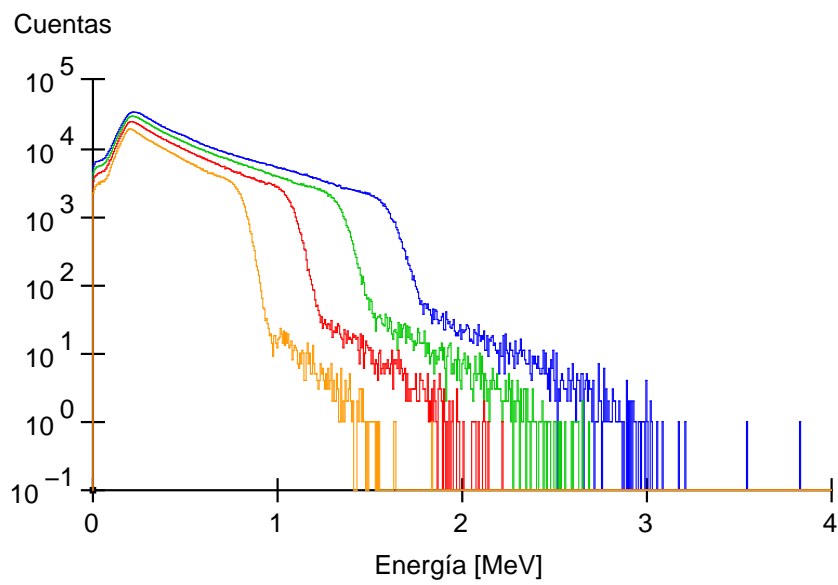


Figura 8.20: Espectro suma para cascadas γ de bandas rotacionales

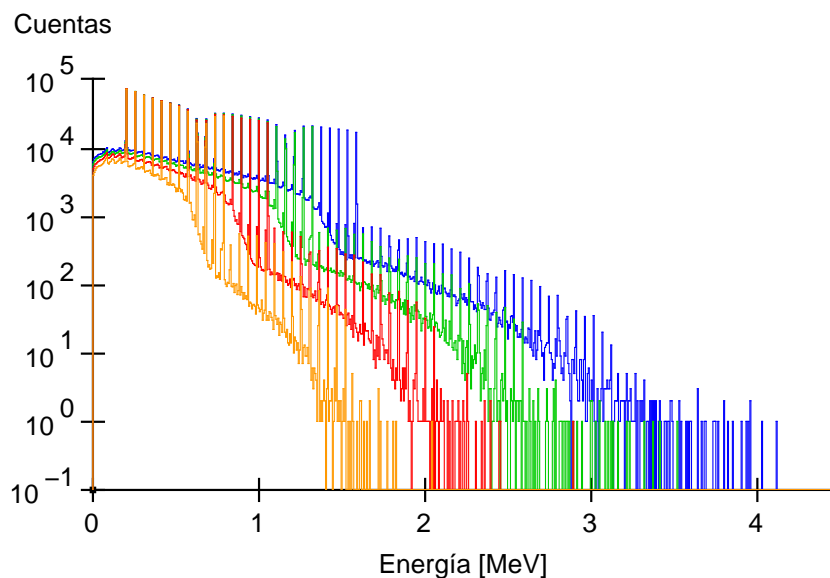


Figura 8.21: Espectro suma para cascadas γ de bandas rotacionales

8.2.1. Observación

En las Figuras (8.17) y (8.18) se resumen las proyecciones de H y k para un conjunto de cascadas rotacionales de multiplicidad $M = 15, 20, 25$ y 30 . Se encuentra que son distribuciones gaussianas con centros bien definidos. En la Figura (8.19) se comparan \bar{H} y \bar{k} para las cascadas rotacionales de diferente origen (M, E) , aunque las regiones se superponen se pueden diferenciar los promedios claramente, ésto nos lleva a pensar que es posible hacer espectroscopía gamma de altas energías con los detectores de BGO en el gammasphere.

8.3. Cascadas Rotacionales más tres rayos del continuo $E_\gamma = (3, 5, 10\text{MeV})$

En la Figura (8.22), se ilustra una cascada rotacional más tres rayos de 3, 5 y 10 MeV correspondientes a transiciones del continuo nuclear.

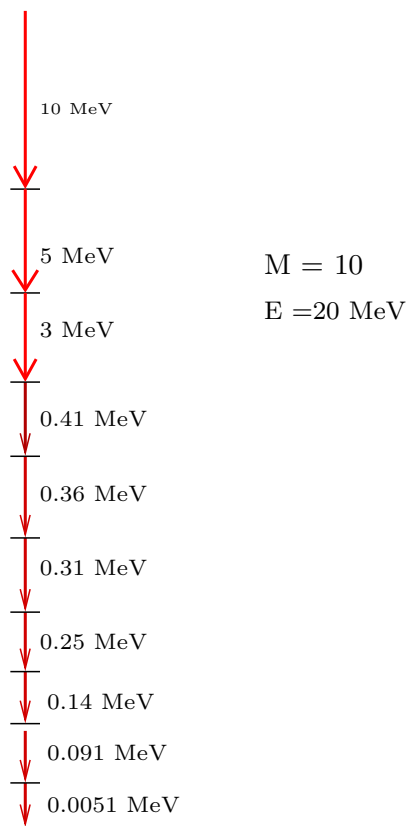


Figura 8.22: Diagrama cascada rotacional más tres rayos del continuo.

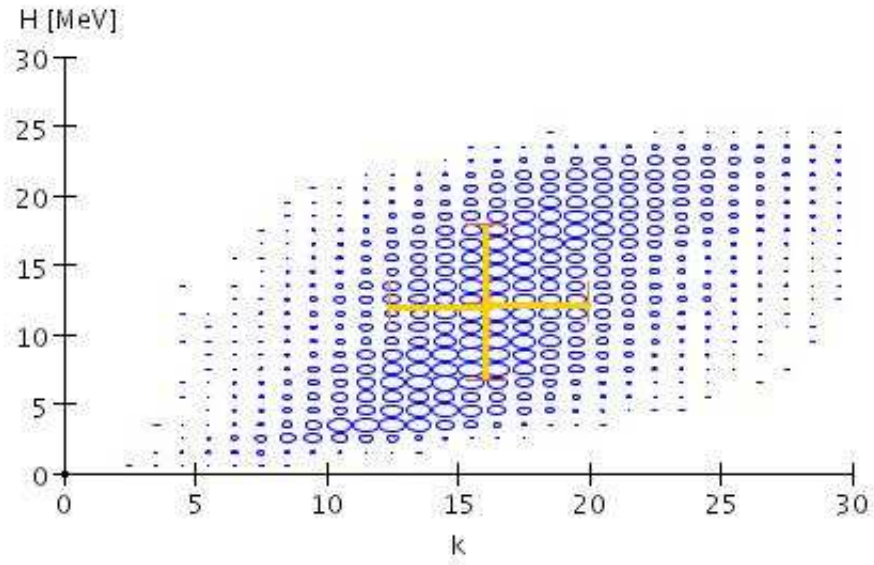


Figura 8.23: Diagrama H k para cascadas $(18,25) \rightarrow (16 \pm 3.8, 12.4 \pm 5.5)$.

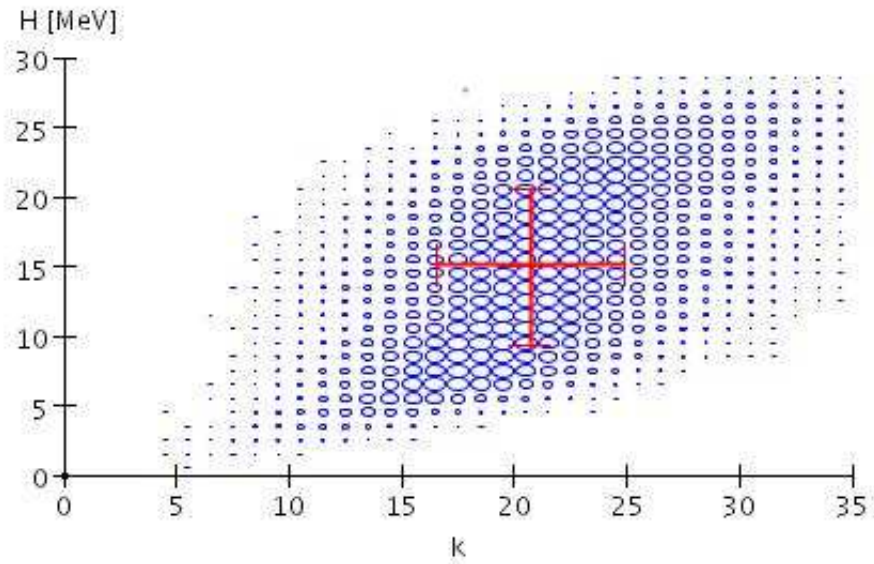


Figura 8.24: Diagrama H k para cascadas $(23,28) \rightarrow (20.7 \pm 4, 15 \pm 5.6)$.

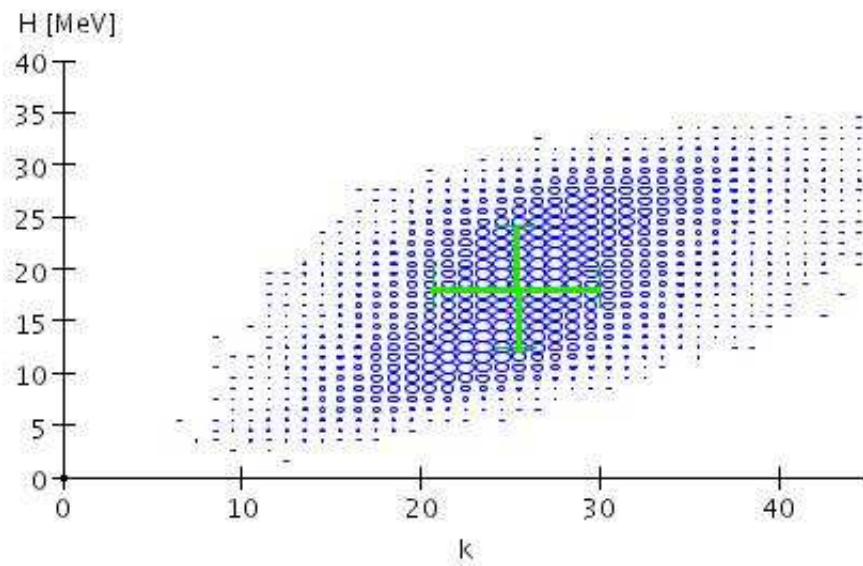


Figura 8.25: Diagrama H k para cascadas $(28,34) \rightarrow (25 \pm 4.7, 18.4 \pm 6)$

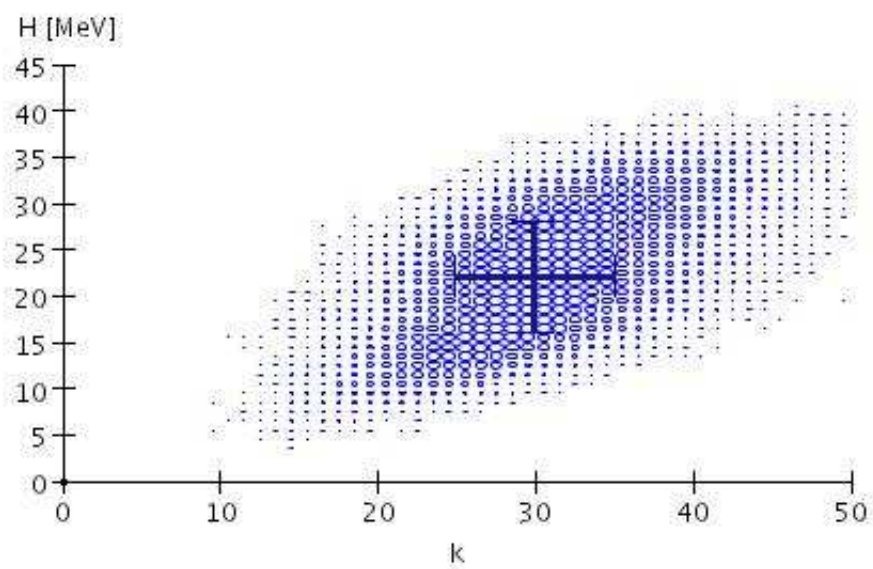


Figura 8.26: Diagrama H k para cascadas $(33,42) \rightarrow (30 \pm 5, 22 \pm 6.0)$.

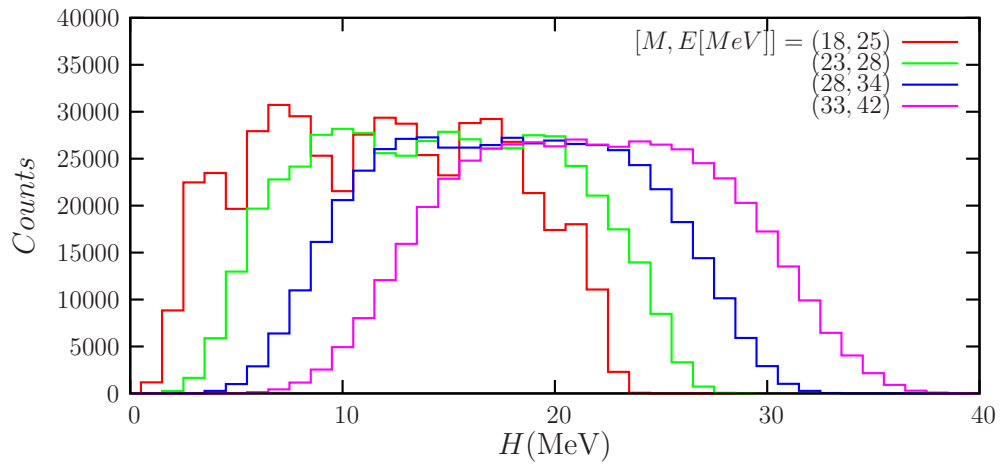


Figura 8.27: Proyecciones H de un conjunto de cascadas (M, E) con tres rayos gamma del continuo

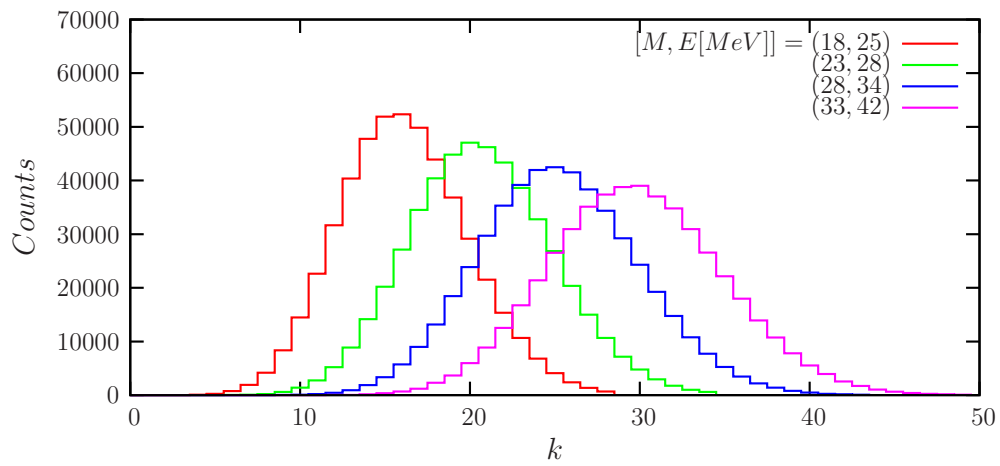


Figura 8.28: Proyecciones k de un conjunto de cascadas (M, E) con tres rayos gamma del continuo

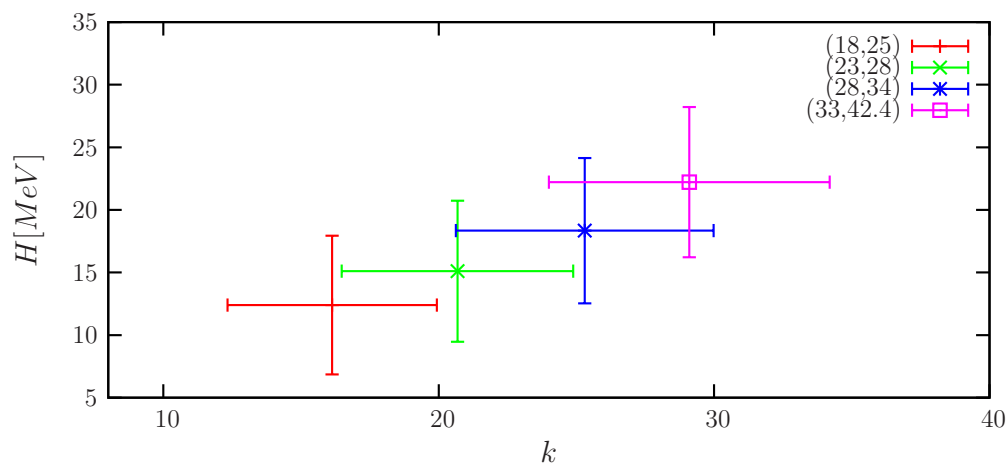


Figura 8.29: Comparando \bar{H} y \bar{k} para cascadas gamma de diferente origen (M,E) más tres rayos- γ

8.3.1. Observación

En el diagrama de la Figura (8.27) se dibujan las proyecciones H para bandas rotacionales de diferente origen (M,E) más tres rayos del continuo, se puede ver que las proyecciones están compuestas por gaussianas lo cual se debe a que los rayos gamma de mayor energía tienen menos probabilidad de ser registrados y hacen transporte, sin embargo algunos pueden ser detectados y aparece un pico adelante o atras de H promedio. En la Figura (8.28) aparecen las proyecciones k y el comportamiento de la distribución sigue siendo gaussiana con centroides bien definidos.

En el diagrama de la Figura (8.29) se comparan las \bar{H} y \bar{k} para éstas cascadas, en ellas aún se pueden diferenciar los promedios para las diferentes cascadas

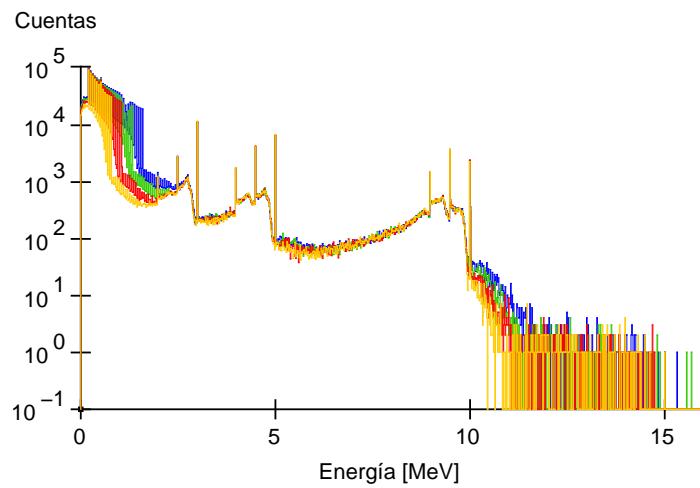


Figura 8.30: Espectro suma para cascadas γ de bandas rotacionales más tres gammas del continuo

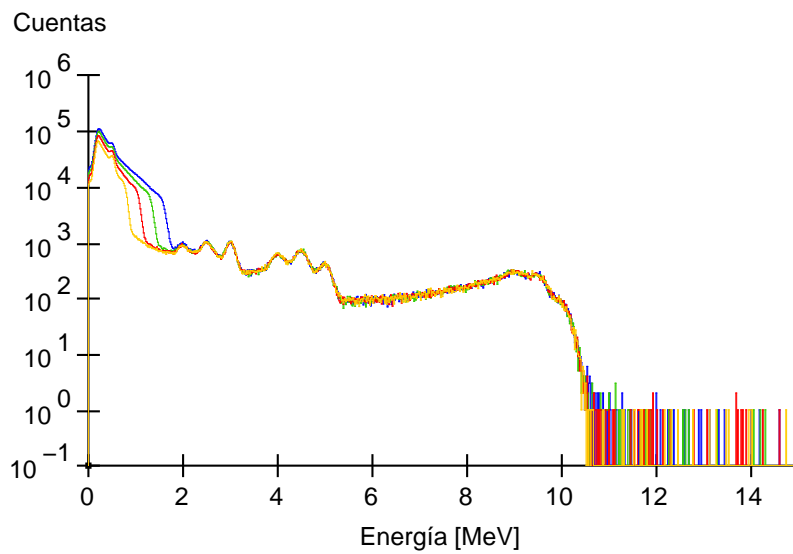


Figura 8.31: Espectro suma para cascadas γ de bandas rotacionales más tres gammas del continuo

Capítulo 9

Conclusiones

La simulación realizada se constituye en una herramienta que simula la detección de cascadas γ de diferente origen. Así mismo permite caracterizar el arreglo de detectores del Gammasphere, para hacer espectroscopía con sus detectores de BGO. Ésto posibilita el estudio de los estados de entrada de cascadas gamma del continuo.

Dentro de la simulación es posible generar cascadas de diferente origen (M,E) y correlacionarlas con sus diagramas (k,H). A partir de ello es factible encontrar la función de entrada haciendo una deconvolución de la función respuesta, aspecto que no se trató en este trabajo.

Los resultados obtenidos al simular la detección de cascadas γ , apuntan a que la identificación de (M,E) en un experimento real sea posible con el Gammasphere puesto que:

- Las distribuciones en el plano k,H provenientes de M,E fijos tienen desviaciones estandar suficientemente pequeñas que permiten distinguirlas para los valores de M,E propuestos.
- Las gaussianas de las distribuciones k y H en las proyecciones, aunque se superponen, tienen centroides bien definidos y son distinguibles unas de otras.

En un experimento real las cascadas no provienen de puntos bien definidos en M,E. Sin embargo se han diseñado métodos que proponen una buena definición de estas cantidades [[8]][[9]][[10]] El siguiente paso en el marco del presente enfoque es simular la interacción de rayos gamma provenientes de reacciones de fusion-evaporacion, lo cual se sale del marco del presente trabajo.

Bibliografía

- [1] F Cristancho and J P Urrego, Heavy Ion Physics, **16**, 75 (2002).
- [2] W.R. Leo. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. 2ed. Springer verlag, 1994
- [3] <http://www.phy.anl.gov/gammasphere/>
- [4] D. Torres. comunicación privada.
- [5] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [6] F Cristancho. The Nuclear Continuum, Notas de Clase (2002).
- [7] Delvin et al. (1996) Nul. Inst. and Meth A **383**, 506-512
- [8] E. Merchan, F. Cristancho, Physica Scripta T125, 184 (2006).
- [9] J. Cardona, F. Cristancho, Heavy Ion Physics 7, 305 (1998).
- [10] F. Cristancho, Heavy Ion Physics 2, 299 (1995).
- [11] Kenneth S. Krane. Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons, 1988
- [12] F. Cristancho. Análisis de Datos Experimentales, Notas de Clase
- [13] J P Urrego, Heavy Ion Physics, **16**, 75 (2002).. (2005). No publicadas.
- [14] J.D. Jackson, Classical Electrodynamics. Third Edition. University of California, Berkeley.
- [15] M.R. Spiegel. Estadística. 2ed. McGraw-Hill, 1990.
- [16] R.H. Landau. Computational Physics . John Wiley & Sons, 1997
- [17] I.-Y Lee. Nuclear Physics A520, 641c (1990).
- [18] <http://gasp.lnl.infn.it>

[19] E. Farnea. comunicación privada.

[20] Yang LEE. Nuclear Physics A520(1990) 641c-655c. Northon-Holland.