

# Capítulo 3 .

## Procesos Físicos.

### 3.1. Rayos Gamma

Los rayos gamma son un tipo de radiación electromagnética de muy alta energía. Sus características son:

Frecuencia: Mayores a  $1 \times 10^{20}$  Hz

Longitud de Onda: Menores a  $3 \times 10^{-12}$  m.

Energía: Mayores a 400 keV.

$$E = h\nu \qquad \lambda\nu = c$$

Los rayos gamma y los rayos X se distinguen por su origen. Las diferentes transiciones entre los estados nucleares dan lugar a los rayos gamma, mientras que los rayos X se producen por las transiciones de energía debido a electrones atómicos profundos. Existe una superposición en los espectros de rayos X de alta energía y rayos gamma de baja energía porque es posible que algunas transiciones de electrones sean más energéticas que ciertas transiciones nucleares. La exposición a la radiación gamma produce daños similares a los causados por los rayos X, como pueden ser quemaduras, cáncer, y mutaciones genéticas. Los rayos gamma se pueden producir por medio de varios procesos físicos:

1. El aniquilamiento de una partícula a través de la colisión con su propia antipartícula, como un electrón y un positrón. Este proceso produce el pión neutro que rápidamente se descompone en dos rayos gamma.

2. A partir de la descomposición radiactiva de un elemento. Para producir rayos gamma es necesario que existan condiciones físicas extremas que permitan la excitación de los núcleos, que posteriormente, al desexcitarse generaran radiación gamma. Este proceso se da principalmente en las supernovas y otros astros.
3. Por medio de radiación Bremsstrahlung (Ver 3.2.2.2).

### 3.2. Interacción Radiación-Materia.

La interacción entre la materia y la radiación es el elemento fundamental en cualquier proceso de detección. Debido a las diferentes energías, cada rango del espectro electromagnético interactúa con la materia de manera particular. En general, la radiación electromagnética puede ser transmitida o atenuada por la materia; a su vez la atenuación puede ocurrir por procesos de absorción o de dispersión. Los niveles de energía en todos los procesos atómicos y moleculares, al igual que la energía de los fotones, están cuantizados; por lo tanto, para que exista una absorción, la separación en los niveles de energía de los átomos de la materia debe ser igual a la energía de la radiación incidente. En el caso que esto no suceda y que la partícula incidente tampoco sea desviada, habrá una transmisión y se dice que la sustancia es transparente a ese tipo de radiación.

La sección eficaz es directamente proporcional a la probabilidad de que exista una interacción entre dos partículas. Las diferentes clases de interacción, la energía del fotón incidente y el tipo de material, contribuyen a la variación en el tamaño de la sección eficaz. Si existen  $m$  tipos de interacciones posibles y  $n$  elementos que forman el material detector, entonces la sección eficaz total es [14]:

$$\sigma(E) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}(E) \quad (3.1)$$

Por consiguiente, la probabilidad de que la partícula sufra una interacción del  $i$ -ésimo tipo con el  $j$ -ésimo elemento se expresa mediante:

$$P_{ij} = \frac{\sigma_{ij}(E)}{\sigma(E)} \quad (3.2)$$

### **3.2.1 Fotonos.**

Los fotones no producen ionización de manera directa; van perdiendo su energía a través de colisiones con electrones que son los responsables de la ionización directa de la materia [17]. Los principales procesos de interacción ente los fotones y la materia son: dispersión elástica, efecto fotoeléctrico, efecto Compton, producción de pares y absorción.

#### **3.2.1.1 Dispersión coherente.**

La dispersión elástica se conoce también como dispersión de Rayleigh. Ocurre cuando la energía de la radiación es muy pequeña comparada con la energía de ligadura de los electrones del material; por lo que el fotón incidente sólo provoca una oscilación temporal en los electrones. Estas vibraciones emiten radiación de la misma longitud de onda que la radiación incidente. Se puede decir entonces, que el fotón es simplemente desviado cuando interactúa con el electrón y no existe una pérdida de energía. La sección eficaz de este proceso decrece rápidamente conforme aumenta la energía del fotón incidente. La única variable que se calcula en MCNP es el ángulo de dispersión; incluso esta interacción es ignorada por el software cuando las energías son mayores a 100 keV porque la interacción es despreciable [16].

#### **3.2.1.2 Efecto fotoeléctrico.**

El efecto fotoeléctrico es un proceso de absorción que ocurre cuando la energía del fotón es igual o no muy grande comparada con la energía de ligadura del electrón. La probabilidad de que tenga lugar un efecto fotoeléctrico es mayor para los electrones de la capa K del átomo [18]. La energía del fotón es transmitida completamente al electrón, el cuál escapa del átomo dejando un hueco en el orbital que ocupaba. La energía cinética del electrón expulsado,  $E_e$ , es independiente al ángulo de dispersión del electrón [17], entonces:

$$E_e = h\nu - W \quad (3.3)$$

donde  $h\nu$  es la energía del fotón incidente y  $W = h\nu_0$  se denomina función de trabajo.  $W$  es la energía mínima que se requiere para desprender al electrón de su orbita; depende de las propiedades del material y de la superficie. En consecuencia existe una frecuencia umbral,  $\nu_0$ , por debajo de la cuál no se emite ningún electrón. La energía de los electrones  $E_e$  permanece constante al variar la intensidad de la radiación incidente; no obstante el número de electrones desprendidos sí cambia [19].

El efecto fotoeléctrico predomina para energías menores a 0.1 MeV. Su sección eficaz es inversamente proporcional a la energía del fotón incidente,  $h\nu$ , y directamente proporcional al número atómico  $Z$ ; sin embargo ésta no puede ser expresada por una ecuación simple para todo los rangos de energía y todos los  $Z$ . Se puede decir que:

$$\sigma_{pe} \propto \frac{Z^m}{h\nu^n} \quad (3.4)$$

donde  $m$  varía de 4 a 5 y  $n$  fluctúa de 1 a 3.5 [17][18]. Las variaciones se presentan como discontinuidades en las gráficas de secciones eficaces; este comportamiento se analizará con detalle en el Capítulo 6. La incertidumbre en las bibliotecas de MCNP que contienen las secciones eficaces en el rango aproximado de 0.1 a 10 MeV son mucho mayores para el efecto fotoeléctrico que para cualquier otra interacción [16].

Además del electrón emitido, durante el efecto fotoeléctrico se crea un átomo ionizado. La vacante en el orbital se llena mediante la captura de un electrón libre o por medio de una transición de un electrón de algún nivel de mayor energía, donde la diferencia de energía entre los niveles es emitida en forma de radiación. En la mayoría de los casos, estos fotones emitidos son rayos X característicos que viajan algunos milímetros antes de volver a sufrir otra interacción [18]; sin embargo, algunas veces puede tener lugar un efecto Auger. Durante este proceso, el fotón emitido después de la transición puede colisionar con otro electrón de una capa superior del mismo átomo, arrancándolo del orbital e impartándole una energía cinética. A ese electrón se le llama electrón Auger. No obstante como se desprende un electrón, el átomo sigue ionizado. Se produce entonces otra

transición del nivel de energía de otro electrón, teniendo como resultado una fluorescencia donde se emite un electrón o fotón Auger. El electrón y fotones Auger son de baja energía ( $E < 1$  keV) por lo que tienen una trayectoria libre media muy corta; incluso en el código MCNP se considera que depositan toda su energía en el punto donde se crean [16]. La fluorescencia sucede cuando el intervalo de tiempo entre la excitación y desexcitación del átomo es muy corto; se emite primero un fotón con energía mayor a 1 keV, y si el átomo continúa teniendo una energía residual de excitación mayor a 1 keV se emite un segundo fotón (segunda fluorescencia) [16]. Se asume que todos los fotones son emitidos de manera isotrópica.

El Manual del código de MCNP [16] explica que durante una simulación, el efecto fotoeléctrico implica la terminación de la historia aleatoria del fotón con elementos con  $Z < 12$ , ya que la posible energía de fluorescencia es menor que 1 keV. Sin embargo la trayectoria del electrón expulsado es muestreada. Puede ocurrir primera fluorescencia en elementos con  $12 < Z < 31$  y segunda fluorescencia cuando  $31 \leq Z$ .

### 3.2.1.3 Efecto Compton.

Para que el efecto Compton o dispersión incoherente pueda ocurrir, se requiere que el fotón incidente tenga una energía mucho mayor a la energía de ligadura de los electrones de un átomo. El fotón al chocar con un electrón (considerado libre y en reposo) se dispersa fuera de su dirección original y transmite parte de su energía al electrón; por consiguiente el electrón adquiere energía cinética y se aleja del átomo. El fotón dispersado tendrá una frecuencia  $\nu'$  menor a la frecuencia  $\nu$  del fotón incidente para que se conserve la energía,

$$h\nu = E_e + h\nu' \quad (3.5)$$

y también se conserve el momento durante el proceso,

$$\frac{h\nu}{c} = p_e + \frac{h\nu'}{c} \quad (3.6)$$

$E_e$  y  $p_e$  representan la energía total y el momento del electrón respectivamente. De esta manera, a partir de las ecuaciones (3.5) y (3.6) podemos concluir que el efecto Compton se expresa así:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad (3.7)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda del fotón incidente,  $\lambda'$  la del fotón dispersado y  $\theta$  es el ángulo de dispersión del fotón.

La cantidad de energía transmitida al electrón es directamente proporcional al ángulo de dispersión  $\theta$ , alcanzando su valor máximo cuando  $\theta=90^\circ$ . Apoyándose en unos cálculos, Johns [20] explica que si la energía del fotón incidente es pequeña, casi toda la energía es dispersada y se transfiere una cantidad muy pequeña al electrón. En cambio, cuando la energía del fotón incidente se encuentra en el rango de 10 a 100 MeV, la mayor parte de la energía es transferida al electrón y muy poca es dispersada.

La interacción de tipo Compton es predominante a energías cercanas a 1 MeV. MCNP utiliza una aproximación denominada Klein-Nishina para calcular la sección eficaz del efecto Compton, que asume entre otras cosas que los electrones se encuentran libres y en reposo. La probabilidad de interacción disminuye gradualmente conforme aumenta la energía del fotón incidente  $E$ , hasta aproximarse a  $E^{-1}$  [17]. Además el efecto Compton depende de la densidad electrónica del material  $\rho_{mat}$ , y es casi independiente al número atómico. En general la sección eficaz se puede aproximar por:

$$\sigma_{ec} \propto \frac{\rho_{mat}}{E} \quad (3.8)$$

#### **3.2.1.4 Producción de Pares.**

El proceso de producción de pares es un tipo de absorción que sucede espontáneamente cuando el fotón incidente interactúa con la fuerza coulombiana de un

núcleo<sup>1</sup>. Solo puede ocurrir cuando los fotones incidentes poseen una energía igual o mayor a 1.022 MeV; debido a que el fotón se materializa en un par electrón-positrón, y la energía electromagnética se convierte en energía en reposo (0.511 MeV tanto para el electrón como para el positrón). La energía sobrante se convierte en energía cinética de las partículas recién creadas. Los rayos gamma tienen la frecuencia mínima requerida para que se logre este proceso.

La producción de pares es la interacción dominante para energías mayores a 1 MeV. La sección eficaz de este proceso físico aumenta monotónicamente a partir de la energía umbral de 1.022 MeV [14]; es proporcional al cuadrado del número atómico del material.

$$\sigma_{pp} \propto Z^2 \quad (3.9)$$

La trayectoria del fotón es finalizada, y se crea un electrón y un positrón en la posición exacta donde se generó la interacción. El código MCNP asume que el positrón se aniquila con otro electrón de los alrededores en el mismo lugar de la colisión, produciendo así dos fotones de 0.511 MeV cada uno. El primer fotón es emitido isotrópicamente y el segundo se crea en dirección opuesta [16].

### **3.2.1.5 Absorción.**

La absorción es simplemente una excitación del núcleo del átomo por lo que la historia del fotón es finalizada. La probabilidad de que exista una absorción disminuye al aumentar la energía.

### **3.2.2 Electrones.**

Los electrones pierden su energía ionizando o excitando los átomos. Estas partículas al poseer carga no viajan en línea recta y por lo tanto su trayectoria libre media es muy

---

<sup>1</sup> También puede suceder al interactuar con el campo eléctrico de un electrón atómico, pero la probabilidad es muy baja.

pequeña. Según el manual del código MCNP [16] un fotón que viaja en aluminio pierde energía de 0.5 MeV a 0.0625 MeV en un promedio de 10 colisiones; en cambio un neutrón en las mismas condiciones requiere 30 colisiones y un electrón alrededor de  $10^5$  interacciones.

Hacer un cálculo análogo al de los fotones donde se calcula cada evento o colisión, ocasionaría que el resolver un problema en MCNP fuera extremadamente lento. Por esta razón, para electrones y otras partículas cargadas se utilizan teorías de dispersión múltiple de las que se deriva una compilación de datos llamados *poderes de frenado*, de manera similar a las pdf's de las secciones eficaces para fotones [16]. Los poderes de frenado son una aproximación de cómo se deposita la energía en función de la distancia recorrida dentro del material, y se asume que esta energía depositada es muy pequeña comparada con la energía cinética del electrón. La trayectoria del electrón es simulada con una serie de pasos después de los cuales la dirección, energía y posición del electrón se vuelve a calcular. Para los cálculos de los poderes de frenado se toma en cuenta que los electrones interactúan con la materia por medio de distintos procesos con el campo externo nuclear, tales como las dispersiones elásticas, Bremsstrahlung, colisiones débiles y colisiones fuertes.

### 3.2.2.1 *Dispersión Elástica.*

La colisión elástica es una dispersión del electrón incidente debido al campo electrostático del núcleo del blanco. Cuando un electrón colisiona elásticamente no ocurre una pérdida de energía, ni emisión de rayos X, ni excitación del átomo. El electrón es simplemente desviado de su trayectoria original, lo que hace que los electrones tengan una trayectoria tan discontinua. Su sección eficaz depende de  $Z^2$ .

$$\sigma_{el} \propto Z^2 \quad (3.10)$$

Este proceso es irrelevante para los cálculos de MCNP porque no implica una pérdida de energía o creación de partículas secundarias; a pesar de que estas colisiones



representen el 98 % de las interacciones del electrón con el campo electrostático del blanco no se toman en cuenta para los cálculos [17].

### 3.2.2.2 *Bremsstrahlung*.

El 2-3 % de las interacciones del electrón con campo electrostático del núcleo se llaman *Bremsstrahlung*, según afirma Attix [17]. Cuando un electrón o cualquier partícula cargada en movimiento tiene un parámetro de impacto menor al radio del átomo, es decir, pasa cerca de un núcleo, sus campos electromagnéticos interactúan y las partículas se atraen. El efecto *Bremsstrahlung* es más importante para electrones que para cualquier otra partícula en el rango de energías estudiado. El electrón, al ser menos masivo que el núcleo, experimenta una desaceleración y su trayectoria sufre una desviación. La velocidad del electrón disminuye, en consecuencia disminuye su momento y su energía. Para no violar las leyes de conservación en este proceso, el electrón emite un fotón en la dirección original de su movimiento.

Este tipo de radiación es más probable conforme aumenta la energía del electrón y es irrelevante para energías del orden de KeV. Su sección eficaz es proporcional a  $Z^2$  e inversamente proporcional al cuadrado de la masa de la partícula incidente.

$$\sigma_{brems} \propto \left(\frac{Z}{m}\right)^2 \quad (3.11)$$

Si la probabilidad determina que se creará un fotón *Bremsstrahlung* se deberá calcular la energía y la deflexión angular del nuevo fotón; la dirección y energía del electrón no cambian porque el promedio ya ha sido tomado en cuenta en las teorías de dispersión múltiple (poderes de frenado).

### 3.2.2.3 Colisiones débiles.

Las colisiones débiles o *soft collisions* como se conocen en inglés tienen un parámetro de impacto muy grande comparado con el radio del átomo. Cuando el electrón pasa cerca del átomo, su campo eléctrico puede llegar a excitar el átomo o incluso ionizarlo al arrancar algún electrón de valencia. Como resultado se transfiere una cantidad muy pequeña de energía, del rango de eV, del electrón incidente al átomo. Sin embargo, las colisiones débiles son las más numerosas y representan casi la mitad de la energía transferida al material [17]. La teoría de las colisiones débiles fue desarrollada por Bethe.

### 3.2.2.4 Colisiones fuertes o electrones *Knock-on*.

Los electrones Knock-on son partículas, inicialmente consideradas libres y en reposo, que se desprenden del átomo debido a una colisión directa con un electrón incidente. También conocidas como colisiones fuertes, *hard collisions* o rayos delta ( $\delta$ ), tienen un parámetro de impacto del orden del radio del átomo. La probabilidad de esta interacción depende de la naturaleza de la partícula incidente, en este caso del electrón; es decir, depende de sus propiedades cuánticas como el spin. Los electrones Knock-on son menos probables que las interacciones débiles; pero la energía inicial del electrón incidente o primario es del orden de la energía transferida al electrón Knock-on o secundario.

En MCNP se muestrea la energía del electrón secundario y posteriormente se determina por conservación de momento el ángulo de desviación. Las características del electrón primario no se ven afectadas porque se consideran los poderes de frenado.

Los electrones Knock-on desempeñan un papel muy importante en la primera etapa de detección de rayos gamma como se podrá observar en el Capítulo 6.

### 3.2.3 Neutrones.

Los neutrones son partículas neutras, por lo que es muy difícil detenerlas y por consiguiente detectarlas. Estas partículas sólo producen ionización de manera indirecta; interactúan con los núcleos de elementos que poseen un número atómico muy chico y generalmente no colisionan con los electrones. Las funciones de probabilidad de las secciones eficaces de los neutrones tienen un comportamiento muy variable; incluso no existen teorías para predecir muchas de las interacciones importantes de los neutrones.

Las interacciones más relevantes que puede sufrir un neutrón son captura, dispersión elástica, dispersión inelástica y fisión. Durante una captura la historia del neutrón es finalizada igual que en el evento de absorción de un fotón; mas existe un tipo de captura radioactiva donde después de la interacción se emite un fotón. La captura sucede generalmente si los neutrones poseen una energía menor a 1 eV.

El momento y la energía en una dispersión elástica siempre se conservan; en cambio en una dispersión inelástica un exceso de energía cinética excita al núcleo. Existen varios tipos diferentes de dispersión inelástica, las cuáles pueden producir distintas partículas secundarias como fotones y uno o varios neutrones. En las colisiones se considera que los núcleos están libres y en reposo.

Si el núcleo de un átomo pesado obtiene suficiente energía de excitación (aproximadamente 5 MeV) empieza a oscilar fuertemente y puede llegar a fisionarse. Esta energía puede ser adquirida mediante el bombardeo de rayos gamma, la absorción de neutrones lentos o se puede producir una fisión espontánea si los núcleos no son estables<sup>2</sup>. Durante la fisión se libera energía, rayos gamma, rayos beta, neutrones y otros elementos. Los neutrones emitidos causan la fisión de otros núcleos, es decir, una reacción en cadena. Lux [14] asegura que en promedio se producen de 2.3 a 2.9 neutrones secundarios por cada

---

<sup>2</sup> Los núcleos estables tienen un número similar de neutrones y protones.  $N \approx Z$

proceso dependiendo del tipo de núcleo y de la energía del neutrón incidente que desencadena la fisión. Siempre se conserva la carga y la masa-energía durante la fisión.

Los neutrones después de una serie de colisiones llegan a tener energías iguales o menores que 0.5 eV [17]; se dice que se termalizan. La energía de los neutrones térmicos es comparable con la energía causante del movimiento térmico de los átomos, por lo que los neutrones pueden perder o ganar energía durante las interacciones con los núcleos. MCNP da un tratamiento especial a estos neutrones térmicos considerándolos como un gas libre.