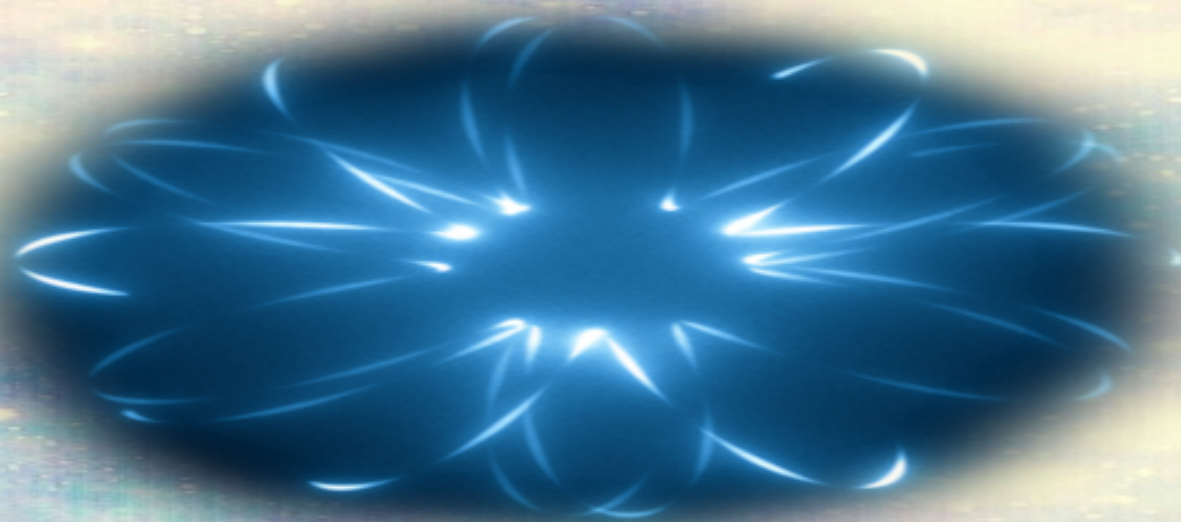


# **Evaluación de eficiencia de atenuación de elementos de protección para trabajadores expuestos en el área de radiología bajo la herramienta FrameWork-Geant4.**

**Isabel Alejandra Morales Salamanca**

**Universidad Distrital Francisco José de Caldas**





## Índice general

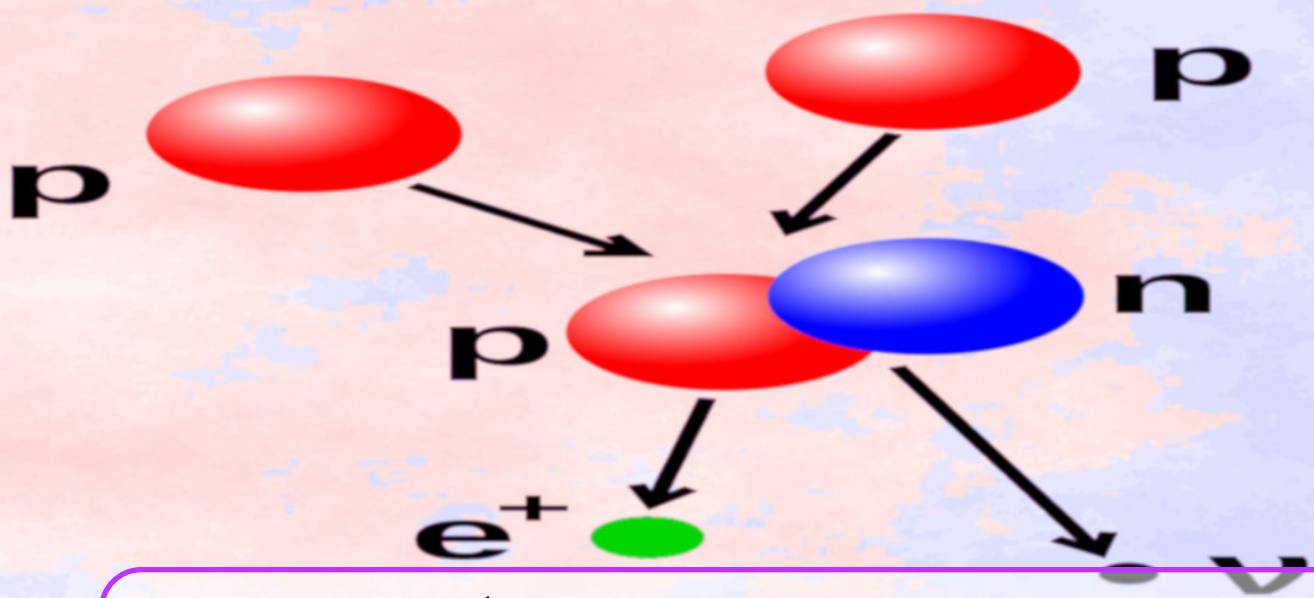
I	Parte Uno	
<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>7</b>
1.1	Objetivo General	8
1.2	Objetivos Específicos	8
<b>2</b>	<b>Interacción de fotones con materia</b>	<b>9</b>
2.1	Radiación	9
2.2	La radiación y el átomo	10
2.3	Tipos de decaimientos radiactivos	10
2.3.1	Decaimiento Beta menos	10
2.3.2	Decaimiento beta mas	10
2.3.3	Decaimiento alfa	11
2.3.4	Captura de electrones	11
2.3.5	Transición isomérica	11
2.4	Vida Media	11
2.5	Ecuación del decaimiento radiactivo	11
2.5.1	Unidades de Radiactividad	12
2.6	Interacción Radiación-Materia	13
2.7	clasificación de la radiación	13
2.7.1	Grupos de clasificación	13
2.8	Clasificación de la radiación	13
2.8.1	Clasificación de Radiación Ionizante	14
2.8.2	Clasificación de la Radiación ionizante Directa	15

2.8.3	Clasificación de la radiación de fotones bajo ionización indirecta . . . . .	15
<b>2.9</b>	<b>Interacción de partículas cargadas con la materia</b>	<b>15</b>
2.9.1	Rango de partículas cargadas . . . . .	16
<b>2.10</b>	<b>Produccion Bremsstrahlung</b>	<b>16</b>
<b>2.11</b>	<b>Interacción materia-energía (fotones)</b>	<b>17</b>
2.11.1	Interacción en un absorbente . . . . .	19
<b>2.12</b>	<b>Interacción de partículas cargadas</b>	<b>21</b>
2.12.1	Partículas Alfa . . . . .	21
2.12.2	Partículas Beta . . . . .	21
2.12.3	Interacción de rayos X y rayos gamma . . . . .	22
<b>2.13</b>	<b>Cantidades unidades de Radiación</b>	<b>23</b>
2.13.1	Tasa de conteo . . . . .	23
2.13.2	Exposición . . . . .	23
2.13.3	Dosis absorbida . . . . .	23
2.13.4	Dosis equivalente . . . . .	23
2.13.5	Dosis efectiva . . . . .	24
2.13.6	Dosis efectiva comprometida . . . . .	24
2.13.7	Dosis efectiva total . . . . .	24
2.13.8	Parámetros físicos del haz de radiación a utilizar en un tratamiento . . . . .	24
<b>2.14</b>	<b>Propiedades de la Radiación Electromagnética</b>	<b>24</b>
2.14.1	Influencia de la geometría en la determinación de coeficientes de atenuación	25
<b>2.15</b>	<b>Detectores de Radiación Ionizante</b>	<b>25</b>
<b>2.16</b>	<b>Protección Radiológica</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>Simulación e Interacción electromagnética . . . . .</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Aspectos asociados al modelo electromagnético desde la versión simulada</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>		<b>29</b>
<b>3.3</b>		<b>29</b>
<b>3.4</b>	<b>Diseño de herramienta computacional GEANT4</b>	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>Modelo implementando Geant4</b>	<b>30</b>
3.5.1	Procesos incorporados en Geant4. . . . .	31
<b>3.6</b>	<b>Geometría</b>	<b>33</b>
<b>3.7</b>	<b>Procesos Físicos</b>	<b>33</b>
<b>3.8</b>	<b>Manejo de la información (Adquisición e implementación de datos).</b>	<b>34</b>

# Parte Uno

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>7</b>
1.1	Objetivo General	
1.2	Objetivos Específicos	
<b>2</b>	<b>Interacción de fotones con materia</b>	<b>9</b>
2.1	Radiación	
2.2	La radiación y el átomo	
2.3	Tipos de decaimientos radiactivos	
2.4	Vida Media	
2.5	Ecuación del decaimiento radiactivo	
2.6	Interacción Radiación-Materia	
2.7	clasificación de la radiación	
2.8	Clasificación de la radiación	
2.9	Interacción de partículas cargadas con la materia	
2.10	Producción Bremsstrahlung	
2.11	Interacción materia-energía ( <i>fotones</i> )	
2.12	Interacción de partículas cargadas	
2.13	Cantidades unidades de Radiación	
2.14	Propiedades de la Radiación Electromagnética	
2.15	Detectores de Radiación Ionizante	
2.16	Protección Radiológica	
<b>3</b>	<b>Simulación e Interacción electromagnética</b>	<b>29</b>
3.1	Aspectos asociados al modelo electromagnético desde la versión simulada	
3.2		
3.3		
3.4	Diseño de herramienta computacional GEANT4	
3.5	Modelo implementando Geant4	
3.6	Geometría	
3.7	Procesos Físicos	
3.8	Manejo de la información (Adquisición e implementación de datos).	





## 1. Introducción

La radiación ha estado presente desde los inicios del universo. Desde su aparición sobre la tierra y posteriormente la comprensión de su naturaleza, ha aportado a la humanidad incontables beneficios, enmarcando sus usos y aplicaciones en una dualidad, tanto para fines beneficiosos como destructivos. En efecto, aun prevalecen en la memoria los efectos nefastos de la radiación en los seres humanos afectados por los desastres de Hiroshima, Chernobyl, y Fukushima, y ello ha permitido que permanezca un sentimiento negativo de desconfianza y temor hacia la radiación.

Pese a ello, el control de la energía de las radiaciones ha permitido el progreso en diversas disciplinas del saber, en especial en la medicina, abriendo nuevas posibilidades en el diagnóstico, tratamiento (terapias) y prevención de enfermedades cancerígenas. Además de sus cuantiosos beneficios y usos, en la medicina, la radiación también se ha impregnado en otras áreas de aplicación como en la academia, en la tecnología y la industria. Aplicaciones en esta dirección son las que motivan el estudio de este trabajo, ya que permiten evaluar una amplia gama de usos en diferentes áreas de empleo.

Las aplicaciones mencionadas tienen como eje fundamental al fenómeno de la radiación. Se comprende a la radiación, como la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del espacio vacío o de un medio material.

CONTINUAR TRADUCTOR  
EXTENDER CUAL ES EL OBJETIVO DE LA RADIACIÓN bajo la base de protección radiológica (radiación-protección y atenuación)

5. En la actualidad, monitorear la radiación, es un campo en el cual, la simulación por ordenador es una herramienta dinámica de implementar, accesible y económica. En general, la simulación ha permeado la ciencia debido a:

**SIMULACIÓN IMPORTANCIA, SIMULACIÓN EN ÁREAS COMO LA MEDICINA**

Haciendo uso del lenguaje C++ y usando el software GEANT4, herramienta desarrollada por el CERN en la última década, se realiza una simulación que permite constituir estructuras geométricas donde se logra producir procesos físicos medibles del proceso específico que se da de manera material y en tiempo real dentro de un escenario médico. La simulación a partir de uso del software, se ha convertido en una herramienta eficaz para verificar tratamientos en el área de la medicina (radioterapia con aceleradores), de igual forma es usado para modelar aquellos componentes propios



de los detectores usados en dosimetría clínica y para imitar las interacciones de la radiación en el paciente.

La estructura de este documento y el manejo de los temas están establecidos de la siguiente manera: En el primer capítulo se establece la fundamentación teórica. Allí se desarrollan los conceptos básicos de las interacciones electromagnéticas de las partículas con la materia.

En el segundo capítulo, se detalla los lineamientos físicos asociados a las librerías empleadas para el laboratorio virtual. Básicamente en este capítulo se retoman los conceptos descritos en el primer capítulo para establecerlos como la base de funcionamiento del experimento a simular. En el tercer capítulo se detalla la metodología de construcción del modelo a simular. Este capítulo también incluye el procesamiento de la información obtenida a través del laboratorio virtual. El último capítulo se centra en los resultados, los análisis, las conclusiones y perspectivas para futuros trabajos encaminados en el mismo sentido.

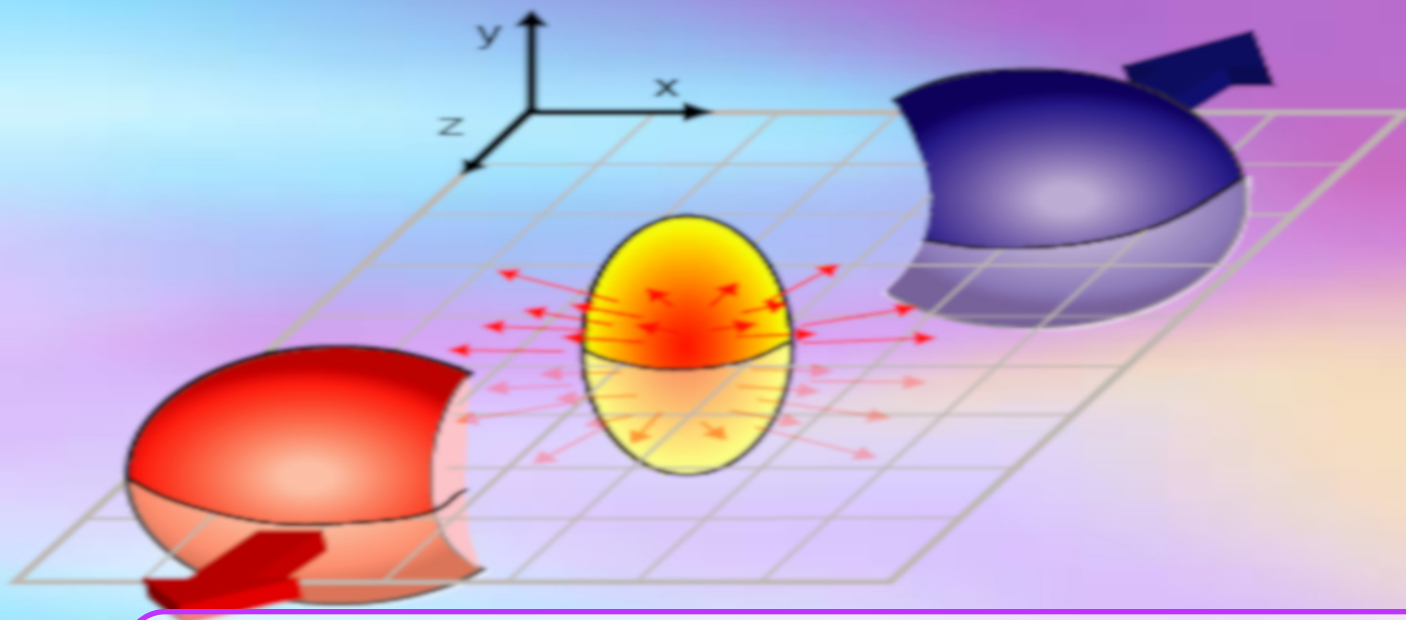
## 1.1 Objetivo General

Estudiar la atenuación presente en una estructura plomada como elemento de protección radiológica en la práctica de radiología, mediante configuraciones relacionadas con los parámetros de espesor y energía.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Simular el fenómeno físico, en el que la fuente son haces monoenergéticos dirigidos a un blanco (chaleco plomado).
- Corroborar que el porcentaje de atenuación obtenida mediante el laboratorio experimental y el laboratorio simulado, se encuentran dentro del rango del porcentaje de atenuación establecido por el proveedor del chaleco.
- Comparar los resultados teóricos y experimentales de la atenuación presente en el uso del chaleco como elemento de protección radiológica.
- Encontrar la tasa de atenuación para un chaleco con diferentes configuraciones (espesor-energía).





## 2. Interacción de fotones con materia

### Introducción

El siguiente capítulo proporciona una introducción a la física moderna y cubre elementos básicos sobre radiación y teoría electromagnética. Los primeros descubrimientos y explicación de las mismas se dan inicialmente con Heinrich Hertz en 1887 donde establece que la radiación electromagnética al incidir sobre una superficie metálica esta puede expulsar partículas cargadas, luego vino Thompson Joseph quién probó a partir de un tubo que los rayos catódicos presentes tenían naturaleza de corpúsculo, partículas a las que luego llamo electrones, posteriormente Bohr y Rutherford desarrollaron experimentos que guiaron la comprensión de la estructura del átomo.

Tomando a los fotones como un cuanto de radiación electromagnética, gracias a la explicación de Einstein donde propone que dicha radiación era cuantificada de forma semejante a aquellos niveles propuestos por Plank en el año 1900. Los elementos mencionados anteriormente forman el conjunto importante de conocimiento para estudiar la física inmersa en la medicina bajo los efectos de la radiación.

### 2.1 Radiación

La radiación como concepto fundamental, base para nuestro estudio se define como aquella energía capaz de transportarse a través de la materia o el espacio, ya sea en forma de onda o partícula como ya fue antes demostrado bajo la teoría dual, característica de la luz. Su obtención se puede dar de dos formas distintas: bajo el proceso de interacción de una partícula con la materia o gracias a la desintegración radiactiva de un radionúclido (un átomo inestable), donde la radiación emitida de este proceso depende de las características propias del radionúclido específicamente usado, mientras que aquella emisión de radiación proveniente de interacción, depende de la partícula que entra del material con el que choca, y es teóricamente hablando posible predecir resultados estadísticos bajo esta técnica siempre y cuando se conozca suficiente interacción no solo de proceder de una

partícula entrante en el proceso, sino de cantidades considerablemente grandes.

Este proceso de la radiación puede describirse bajo dos características: su energía y tipo, tipos que se encuentran divididos en dos características fundamentales: partículas y electromagnéticas, la primera, radica en partículas que poseen energía y masa pero que a su vez pueden contar o no con carga eléctrica. Dentro del tipo de radiación en partículas se consideran aquellas tales como: los protones, neutrones, partículas alfa y beta, y la radiación electromagnética es aquella que radica en fotones “paquete de luz”, partículas sin masa ni carga pero que si contienen energía electromagnética, una cantidad discreta de esta como lo detalla la teoría cuántica y dentro de este concepto se especifica que la luz ultravioleta, los rayos x, gamma y la luz visible también son fotones.

## 2.2 La radiación y el átomo

Es a partir de la estructura del átomo que es posible explicar el fenómeno que para esta ocasión es pertinente estudiar, la radiación, puesto que la materia esta compuesta de ellos, quienes que encuentran formados por un núcleo, donde se encuentran los neutrones que no cuentan con carga eléctrica y los protones quienes tienen cargas positiva.

Cada uno de los átomos poseen un electrón en orbita para cada protón en el núcleo, permitiendo que el tomo quede eléctricamente neutro. A partir de esta característica es posible evidenciar que tipo de elemento se trata. Sin olvidar claro esta, su estructura atómica. Donde hay un “X” que denota el símbolo químico de un elemento en particular, un “Z” que indica el numero atómico “numero de protones en el núcleo” quien revela la identidad química del elemento. Un “A” numero másico, definido como la suma de la cantidad de protones y neutrones que se encuentran en el núcleo. Por ultimo un “A-Z” que establece el numero de neutrones, es por esta razón que es posible encontrar elementos con diferente cantidad de neutrones y a la vez ser químicamente igual. Gracias a esta distribución y caracterización, se establece que cada disposición individual de neutrones y protones da lo que se conoce como un nucleido, y quienes contienen el mismo numero de protones se denominan isótopos, como aquellos isótopos del hidrógeno, el Deuterio y el Tritio que a su vez es un nucleido radiactivo o inestable.

## 2.3 Decaimiento radiactivo

El fenómeno de la radiactividad es el proceso de aquella desintegración espontánea de aquellos núcleos inestables que logran descomponerse en alguna otra combinación de nucleones con una menor masa.

Este proceso es un proceso estadístico, donde se tiene una muestra determinada de material radiactivo, al cual se le mide las desintegraciones por unidad de tiempo, lo que se denomina como actividad.

$$Actividad = -\frac{dN}{dt} \quad (2.3.1)$$

Donde N determina los átomos inestables del material.

De tal forma que aquel nucleido radiactivo se desintegra de manera espontánea a una velocidad dependiente del número de átomos originales presentes y de su constante de descomposición,  $\lambda$  (lambda), esta constante se define como la fracción instantánea de átomos que se descomponen por unidad de tiempo. Cada nucleido radiactivo tiene su propia constante de descomposición especifica. La tasa de cambio de tiempo instantáneo del número de átomos, N, para un radionúclido

se establece como:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (2.3.2)$$

$$\int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt \quad (2.3.3)$$

$$\ln \left[ \frac{N_t}{N_0} \right] = -\lambda t \quad (2.3.4)$$

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (2.3.5)$$

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3.6)$$

A principios del siglo XX se observaron aquellos tipos de decaimientos conocidos como  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , los más comunes para entonces, procesos y fenómenos que se generaban a partir de la descomposición del núcleo y donde a partir de aquella acción como principio se preservan las leyes de conservación de energía, de masa, de momento lineal, de momento angular, de carga eléctrica y por último la conservación de nucleones que determina que el número total de nucleones (**A**, el número de masa) debe conservarse en una reacción nuclear de baja energía (aproximadamente menos de 938 MeV) o en la descomposición. Estos neutrones pueden convertirse en protones, y viceversa, pero el número total de nucleones debe permanecer constante.

NO ENTENDI LA PAG 453

### 2.3.1 Decaimiento alfa

Generalmente el núcleo es particularmente estable con una energía de unión de 28,3 MeV. Si los últimos dos protones y dos neutrones en un núcleo están unidos por menos de 28.3 MeV, se produce la emisión de una partícula alfa.

Esta desintegración alfa es posible, porque  $Q$  (energía liberada) es mayor a cero, de hecho, muchos de los núcleos por encima de  $A=150$ , son aptos para una desintegración alfa. Aquellos núcleos pesados tienen una repulsión de Coulomb cada vez más fuerte a medida que se adicionan protones. La expulsión de dos protones (junto con dos neutrones) en forma de una partícula  $\alpha$  puede disminuir la energía de Coulomb y hacer que el núcleo resultante sea más estable.

Para que ocurra esta desintegración, dos neutrones y dos protones se agrupan dentro del núcleo antes de la desintegración, en segundo lugar, la partícula alfa, incluso cuando ya se ha formado, tiene una gran dificultad para superar la atracción nuclear de los nucleones restantes para escapar.

GRAFICA DE LA PAG 454

Las energías cinéticas de las partículas alfa emitidas desde los núcleos varían de 4 a 10 MeV. Es clásicamente imposible que las partículas alfa escapen, puesto que la barrera de energía potencial es mayor que la energía cinética, EXPLICAR ESTO Si proyectamos partículas de 5 MeV en un núcleo pesado, encontramos que la partícula alfa es repelida por la fuerza de Coulomb .. y no logra acercarse lo suficiente como para sentir la atracción de la fuerza nuclear de corto alcance. Por esto es imposible que la partícula alfa alcance el núcleo.

Pero entonces como explicar que la partícula alfa pueda superar la barrera si se encuentra atrapada dentro de la barrera de potencial. Estas partículas alfa pueden hacer un túnel a través de la barrera, donde existe una pequeña posibilidad de que la partícula alfa aparezca en el otro lado de la barrera, posibilidad que depende de la altura y el ancho de la barrera.

El mayor porcentaje de probabilidad de tunelización corresponde a una vida útil más corta para el nucleido radiactivo

..... ESTO ERA LO DE ANTES DEL DOC PARA ANEXAR En este tipo de decaimiento o desintegración, los nucleidos pesados no tienen una configuración estable de neutrones y protones, donde se obtiene la emisión de una partícula alfa que se compone de 2 protones y 2 neutrones, este proceso de desintegración se produce en aquellos nucleidos que tienen un número atómico mayor a 82. Para lograr un decaimiento de este tipo se necesita una serie de desintegraciones alfa (así como beta) hasta lograr alcanzar un elemento estable más ligero. A diferencia de las partículas beta, estas partículas alfa se emiten con una energía discreta. ....

### 2.3.2 Decaimiento Beta

En este tipo de decaimiento los núcleos inestables pueden acercarse más a la línea de estabilidad, ya que los electrones no pueden existir dentro del núcleo, y en las desintegraciones  $\beta$  dicha partícula  $\beta$  se crea en el momento de la desintegración.

Esta desintegración  $\beta$  es el reflejo de un tipo especial de fuerza, llamada simplemente la interacción débil. Los neutrinos se crean (o absorben) en procesos débiles, incluida la esta descomposición.

En el decaimiento  $\beta^+$  se produce un electrón positivo, llamado positrón  $e^+$ . El positrón es la antipartícula del electrón. En la desintegración beta el electrón y el positrón se denominan normalmente  $\beta^-$  y  $\beta^+$ , respectivamente, lo que facilita el recordar que el electrón y el positrón se crean en el núcleo durante la desintegración beta

NO ENTENDI ESTO PAG12 Debido a que los electrones K-shell y L-shell —————

### 2.3.3 Decaimiento Beta menos

Este tipo de decaimiento se da cuando la relación de neutrones con respecto a los protones es muy alta, por esta razón un neutrón se “convierte” en un protón y un electrón que es expulsado del núcleo. Es este electrón al que se designa como “partícula beta menos” o beta, partículas no se emiten con una única energía, sino con un espectro amplio de energías, debido a la división de la energía total de la desintegración entre la partícula beta y un neutrino, partícula que se emite al mismo tiempo que la partícula beta, quien contiene una masa considerablemente reducida y sin carga, quien transporta la energía liberada en cantidades distintas. Cada una de estas características le permiten viajar distancias extensas, perdiendo poca energía al penetrar materiales cercanos sin causar daños de tipo biológico.

### 2.3.4 Decaimiento beta mas

Se produce cuando la correspondencia entre neutrones con respecto a protones es baja, donde un protón se transforma en un neutrón y en una partícula beta mas “un positrón” quien tiene na carga positiva, la misma masa de un electrón y el cual es expulsado del átomo.

Su comportamiento es fielmente igual al del electrón, con la diferencia de que cuando el positrón tiene contacto con un electrón libre, estas dos partículas al combinarse se aniquilan, proceso que da lugar a dos fotones con una energía (0.511 MeV / fotón).

### 2.3.5 Captura de electrones

Para que se logre este tipo de desintegración se forma un neutrón, gracias a que uno de los electrones que orbitan es capturado por el núcleo y se combina con un protón. Este proceso disputa con la

desintegración de positrones cuando hay una baja relación de neutrones a protones puesto que si el átomo no logra cumplir con la energía que requiere para que se de la descomposición de positrones, el proceso de desintegración se dará por captura de electrones, y cuando esto ocurre, existe una emisión de rayos X, los cuales son característicos del recién formado nucleido.

### 2.3.6 Transición isomérica

En este proceso cuando se da una emisión de una partícula y el núcleo del producto se encuentra en un estado meta-estable o en estado de excitación, y es aquí donde se emiten rayos gamma quienes se llevan el exceso de energía del núcleo parcialmente excitado luego de un evento de descomposición. Estos rayos gamma tienen una energía discreta.

## 2.4 Vida Media

Este concepto se refiere al tiempo que emplea y tardan la mitad de los átomos de una sustancia radiactiva en desintegrarse radiactivamente, o el tiempo que tarda la actividad de una muestra en reducirse a la mitad.

$$N = \frac{N_0}{2^n} \quad (2.4.1)$$

$N_0$  = número inicial de átomos.

Así que, para  $n=1$ , queda la mitad de los átomos iniciales; para  $n=2$ , quedan  $1/4$ ; para  $n=3$ , quedan  $1/8$ , y así sucesivamente.

### 2.4.1 Unidades de Radiactividad

Puesto que es muy importante garantizar la equivalencia y uniformidad en las mediciones que se realicen es importante tener en cuenta la unidades de medida correspondientes a las variables a medir, y esta no es la excepción.

Cuando evidenciamos la siguientes expresión tenemos: Número de átomos,  $N$ , que quedan en un instante particular en el tiempo

$$A = \lambda N \quad (2.4.2)$$

- $A$  = actividad, número instantáneo de átomos en descomposición por unidad de tiempo.

Actividad que se encuentra determinada de forma directa con la cantidad de material radiactivo en una muestra, actividad que se usa la unidad de curie (Ci).

- 1 curie =  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo (dps)
- 1 curie =  $2.22 \times 10^{12}$  desintegraciones por minuto (dpm)

Sus unidades derivadas puesto que el curie es una cantidad muy grande, se establecen como:

- 1 millicurie = (mCi) =  $2.22 \times 10^9$  dpm =  $10^{-3}$  curies
- 1 microcurie = ( $\mu$  Ci) =  $2.22 \times 10^6$  dpm =  $10^{-6}$  curies
- 1 nanocurie = (nCi) =  $2.22 \times 10^3$  dpm =  $10^{-9}$  curies
- 1 picocurie = (pCi) =  $2.22$  dpm =  $10^{-12}$  curies

Teniendo en cuenta que el material radiactivo se mide en unidades de actividad, la ecuación de descomposición se establece como:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4.3)$$

- $A$  = Actividad después de un tiempo  $t$

- $A_0$  = actividad original de la muestra
- $\lambda$  = Constante de desintegración radiactiva igual a  $\frac{0,693}{T_{1/2}}$
- $t$  = tiempo de decaimiento

Ya que el Sistema Internacional (SI) de unidades ha definido el becquerel (Bq) como la unidad de actividad, igual a 1 desintegración por segundo. Tenemos:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq.}$$

La actividad específica habitualmente se expresa en términos de la tasa de desintegración (dps o dpm), tasa de conteo (conteos / min, cpm, o conteos / seg, cps), o curies (o mCi,  $\mu$  Ci) del radionúclido específico por unidad masa del elemento. Donde se tiene:

$$SA = \lambda N \quad (2.4.4)$$

$$\lambda N = \lambda \frac{6,02 \times 10^{23}}{m} \text{ Bq/g} \quad (2.4.5)$$

- SA = actividad específica
- $\lambda$  = constante de decaimiento
- N = número de átomos
- m = masa molecular (gramos / mol).

## 2.5 Interacción Radiación-Materia

Aquella radiación que interactúa con la materia tiene la capacidad de ser absorbida o dispersada, el concepto de absorción en este contexto es importante e interesante puesto que:

- Si los tejidos del cuerpo humano logran absorber dicha radiación, esta misma acción puede provocar lesiones biológicas
- Este proceso de absorción es el fundamento sobre el cual se basa la detección de la radiación
- Es el grado de absorción quien determina cuales deben ser los requisitos para el blindaje adecuado.

En términos de transferencia de energía de las radiaciones que se emiten en dirección a la materia, esta, sucede de dos formas principales:

- **Excitación:** En esta forma de transferencia existe una adición de energía a un sistema atómico, donde se transfiere del aquel estado fundamental a un estado excitado, sin formar iones, el átomo emite energía en forma de radiación fluorescente o rayos x de baja energía cuando el átomo vuelve a su estado fundamental o base.
- **Ionización:** En este proceso existe la eliminación de un electrón de un átomo, dejando al átomo con una carga neta positiva.

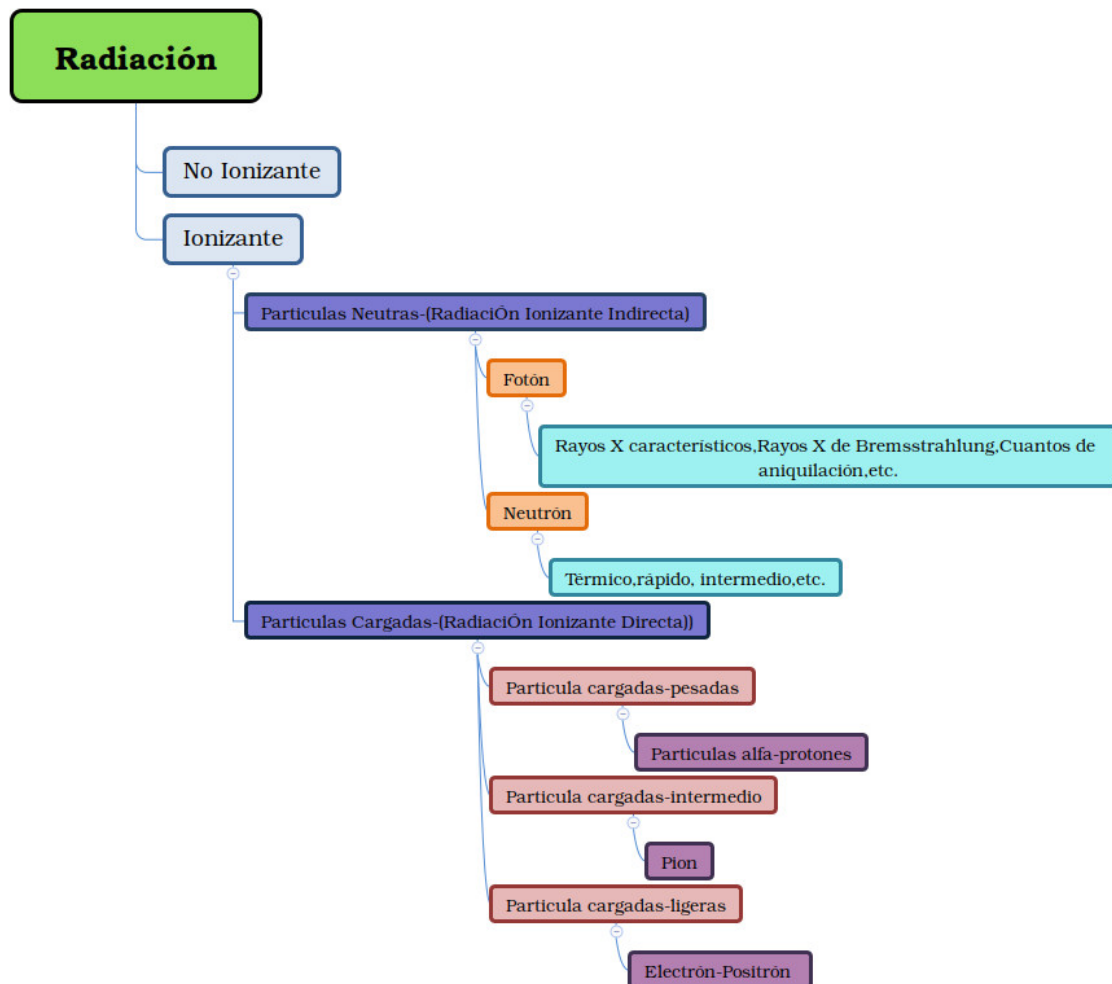
## 2.6 clasificación de la radiación

### 2.6.1 Grupos de clasificación

- Radiación particulada como partículas alfa y beta, radiación, la cual puede (partículas alfa o beta) o no estar cargada (neutrones).
- Radiación electromagnética, como rayos X o rayos gamma
-

## 2.7 Clasificación de la radiación

Existen dos categorías principales de clasificación, ionizante y no ionizante, dependiendo de la capacidad con que cuente para ionizar la materia. Como se muestra en la Figura 1.0



■ Figura 1.0 Clasificación de la Radiación

- **Radiación No Ionizante:** Su energía es baja comparada con aquella energía de ionización de los átomos o moléculas de quien absorbe dicha radiación, Ej: Luz visible, ultravioleta, ondas de radio y microondas.
- **Radiación Ionizante:** Su energía supera el potencial de ionización de los átomos o las moléculas de quien absorbe. Ej: Partículas alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), rayos (x) y gamma ( $\gamma$ ).

### 2.7.1 Clasificación de Radiación Ionizante

Según su clasificación directa o indirecta las radiaciones se emplean en el área de la medicina, para el tratamiento de las enfermedades: en la rama de oncología, radiología, radioterapia, y en el diagnóstico de las mismas en las ramas de imágenes y medicina nuclear con uso de radionuclidos.

**Según la forma de ionizar.**

- **Radiación Ionizante Directa:** Abarca partículas que se encuentran cargadas como los protones, electrones o partículas alfa ( $\alpha$ ) en este proceso de ionizar se involucran las interacciones



de Coulomb entre la partícula que se encuentra cargada y los electrones de los átomos.

- **Radiación Ionizante Indirecta:** Abarca partículas que no se encuentran cargadas como (*fotones, neutrones o neutrinos*), que cuando atraviesan e interactúan con la materia producen partículas ya cargadas quienes ionizan los átomos y depositan energía mediante interacciones de Coulomb con los electrones orbitales de los átomos.

### 2.7.2 Clasificación de la Radiación ionizante Directa

La radiación ionizante directa interactúa con la materia mediante la fuerza de Coulomb, lo que causa los electrones de los átomos y moléculas se repelen o atraigan con respecto a sus cargas.

Se compone de aquellas partículas cargadas:

- Electrones energéticos (Negatrones),
- Positrones, protones.
- Partículas alfa
- Mesones cargados, muones e iones pesados.

### 2.7.3 Clasificación de la radiación de fotones bajo ionización indirecta

Para el uso específico en el área de la medicina es importante resaltar algunas de las categorías asociadas a los fotones, en donde una de las tres existentes *ultravioleta (UV)* tiene uso acotado en los procedimientos médicos llevados a cabo según la especialidad, puesto que en imágenes y tratamientos suelen fotones de energías mayores (*rayos X* y *rayos gamma ( $\gamma$ )*),

#### Categorías de los fotones con respecto al origen

- Cuantos de aniquilación: Resultan de la aniquilación de positrón y electrón.
- Rayos X característicos: Se emiten gracias al uso de elementos pesados, cuando sus electrones realizan mudanzas entre los niveles más bajos de energía atómica.
- Rayos gamma ( $\gamma$ ): Se obtienen gracias a elementos radiactivos donde se genera una desexcitación de un nucleón de un estado excitado a uno con menor energía o en la descomposición de isótopos radiactivos.
- Rayos X de Bremsstrahlung: Se generan por interacciones de tipo Coulomb entre el electrón que incidente y el campo nuclear del material.
- Radiación magnética de bremsstrahlung y ciclotrón: Resulta cuando las partículas cargadas son aceleradas en una trayectoria curva u órbita.

## 2.8 Interacción de partículas cargadas con la materia

Al interactuar las partículas con la materia ocasionan efectos que dependen de la clase de partículas, el medio y sus componentes con el que se relaciona. Por el lado de las partículas se tiene en cuenta, masa y carga eléctrica puesto que la interacción es distinta si se encuentran cargadas no. Aquellas partículas cargadas, principalmente asociado a colisiones coulombianas pierden energía al relacionarse con la materia, colisiones debido a la interacción entre aquellas cargas asociadas a las partículas que inciden y las cargas de protones y electrones de los átomos respectivamente. Estas colisiones se dan por medio de 3 clases de interacciones:

- Colisión inelástica: Las partículas interactúan con los electrones cediendo energía en proporciones pequeñas, dicha energía puede inducir el electrón huya de la atracción del núcleo ocasionando la ionización del átomo o en otro caso que el electrón pase de un estado menos ligado excitando al átomo

- Colisión elástica: Las partículas colisionan con los átomos, lo que genera la desviación en su trayectoria, permitiendo así, ceder parte de su energía pero esta vez en términos de energía cinética. Ocasionalmente no alteración atómica ni nuclear en el medio.
- Colisión radiactiva: Razón del fundamento físico de la producción de rayos X, allí se aceleran los electrones que se frenan bruscamente en un material con un alto número atómico. En esta colisión las partículas cargadas "frenan." se "desvían" cuando interactúan con los átomos del medio, lo que permite la emisión de ondas electromagnéticas, o sea radiación es comúnmente llamada radiación de frenado. Dicho proceso se da con mayor probabilidad en las proximidades del núcleo atómico gracias a las desviaciones de la partícula incidente causadas por las cargas eléctricas del núcleo

### 2.8.1 Rango de partículas cargadas

6.8

Desde el concepto experimental el rango de una partícula que se encuentra debidamente cargada es aquel que suministra el espesor que aquella pueda penetrar, el cual obedece a la masa, la energía cinética, carga de la partícula y estructura del medio. Al penetrar dichas partículas el medio material específico sufren una serie de colisiones con los átomos que lo componen, pero teniendo en cuenta el espacio vacante relativo en el interior del átomo, aquellas colisiones por choques directos entre los núcleos o electrones y la partícula son muy poco probables. Puesto que como se mencionó anteriormente el proceso que sobresale es la colisión coulombiana, aquella que se da debido a las fuerzas eléctricas entre la partícula que incide, los electrones y los núcleos del medio.

Cuando traspasan la materia, aquellas partículas que se encuentran cargadas, en el proceso pierden casi continuamente por radiación y por colisiones ionizantes su energía, sufriendo numerosas deflexiones como consecuencia de la dispersión elástica. Los efectos de esta dispersión se denotan en un porcentaje más alto para aquellas partículas con carga ligera como los electrones comparado con las partículas de carga pesada ya que ellas no tienen pérdidas por efectos de la radiación, puesto que solo transfieren cantidades bajas de energía en colisiones particulares, experimentando desviaciones con ángulos pequeños atribuyéndoles una trayectoria rectilínea.

Algunos de los rangos de uso cotidiano se relacionan por ejemplo, con la longitud de la trayectoria de una partícula cargada como la distancia total a lo largo de la trayectoria real de la partícula hasta que se detiene, sin importar la dirección en la que se mueva, por otro lado, el rango proyectado, se define como la suma de las longitudes de aquellas trayectorias individuales que se proyectan en la dirección de la partícula que incide.

## 2.9 Produccion Bremsstrahlung

Dentro de los mecanismos por los cuales existe pérdida de energía por medios radiactivos. Existe aquel que experimentan los electrones bajo un campo coulombiano pues sufren pérdida de energía en forma de espectro continuo más conocido como radiación de frenado o Bremsstrahlung.

El poder de frenado total de aquellas partículas ligeramente cargadas se define como la suma de las ayudas radiactivas y de colisiones como se muestra a continuación:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_T = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_r \quad (2.9.1)$$

Este tipo de producción es de uso considerable en el área de la física médica puesto que la mayor parte de los haces de radiación usados en los procedimientos de radioterapia y radiología se producen

por medio de interacciones bremsstrahlung con electrones de un solo valor energético con objetivos sólidos, objetivos tales como aceleradores lineales y equipos de rayos X, principales fuentes usadas en estos servicios.

Un electrón que golpee con una energía cinética dada a un objetivo específico sufrirá distintas interacciones varias con los átomos de dicho objetivo antes de que su energía cinética ( $E_k$ ) se desvanezca en el mismo. Aquellas interacciones de electrones con un átomo objetivo se describen como:

- Cuando incide con el núcleo de un átomo objetivo respectivamente esto produce eventos de dispersión tipo elástica y a su vez puede conseguir una pérdida de radiación acompañada de la producción de bremsstrahlung.
- Al existir una interacción del electrón incidente con el electrón orbital de un átomo objetivo esto provoca inicialmente una pérdida por impacto de colisión y la ionización del átomo objetivo quien puede estar acompañada de un electrón con energía definido como rayo delta. Luego de la pérdida de colisión en un objetivo de rayos X esta es seguida por una emisión de rayos X característicos y electrones de Auger. Electrones de Auger que se denominan como aquel proceso en el cual los electrones con ciertas energías características son despedidos de los átomos, respondiendo a la mudanza descendente de otro electrón del átomo.

Aquella intensidad máxima perteneciente a los rayos X se producen en un ángulo peculiar  $\theta_{\max}$ , el cual depende de la energía cinética de los electrones incidentes;

- En el rango de energía de diagnóstico (50 kVp a 350 kVp), los tubos de rayos X se utilizan para la producción de rayos X y la mayoría de los fotones se emiten a 90° desde la dirección de desaceleración de electrones en el objetivo. El ángulo característico  $\theta_{\max}$  es igual a 90°.
- En el rango de radioterapia de mega voltaje (4 MV y superior), las guías de onda de aceleración se utilizan para la aceleración de electrones y la producción de rayos X, la mayoría de los fotones se emiten en la dirección de desaceleración de electrones en el objetivo. El ángulo característico  $\theta_{\max}$  es entonces  $\sim 0^\circ$  y el objetivo se conoce como de transmisión.

Aquellos haces de rayos X que se producen en los objetivos de rayos X son distintos y contienen fotones de varias energías que van desde 0 hasta un  $h\nu_{\max}$  de energía máxima que es equivalente a la energía cinética de los electrones, quienes golpean al objetivo.

## 2.10 Interacción materia-energía (fotones)

Los fotones son partículas diminutas a quienes se les atribuye el transporte de energía en forma de radiación, son capaces de estimular electrones de los átomos logrando así el salto a orbitas de nivel superior, sin dejar de lado la característica de incitar la ionización de aquellos átomos. Donde parte de esa energía asociada a los fotones que inciden se usa para transmitir la energía cinética  $E_k$  a aquellos electrones propios del material.

Si tenemos fotones con un solo valor energético en un haz e inciden sobre cierto material con espesor característico, si se deseara medir cuantos de ellos logran atravesar el material e impactar con el detector, se pueden dar eventos u opciones tales como:

- Las partículas traspasen cierta parte de energía y al chocar cambien su dirección, logrando que el detector en su medición encuentre menos cantidad de fotones, a lo que se le atribuye en nombre de atenuación, fenómeno que involucra los efectos de procesos como la dispersión y absorción de dichas partículas.
- Las partículas sigan su trayectoria, logren atravesar el material y sin que exista ninguna interacción lleguen al detector.
- Las partículas interactúen con el medio, entreguen energía en su totalidad al material evitando la llegada de las partículas (fotones) al detector.

Debemos recordar que los fotones hacen parte de la radiación de tipo indirectamente ionizante, debido a que cuando interactúa con la materia provoca ionizaciones, allí es donde únicamente aquellos fotones que son absorbidos transfieren al medio su energía. Mientras que otros de ellos, quienes interactúan con el medio, logran desviarse de la trayectoria sin ceder energía pero si dispersándose.

Aquellos procesos donde los fotones interactúan con la materia obedecen a los siguientes aspectos:

- Energía de la radiación que incide.
- Tipo de material donde la radiación incide.

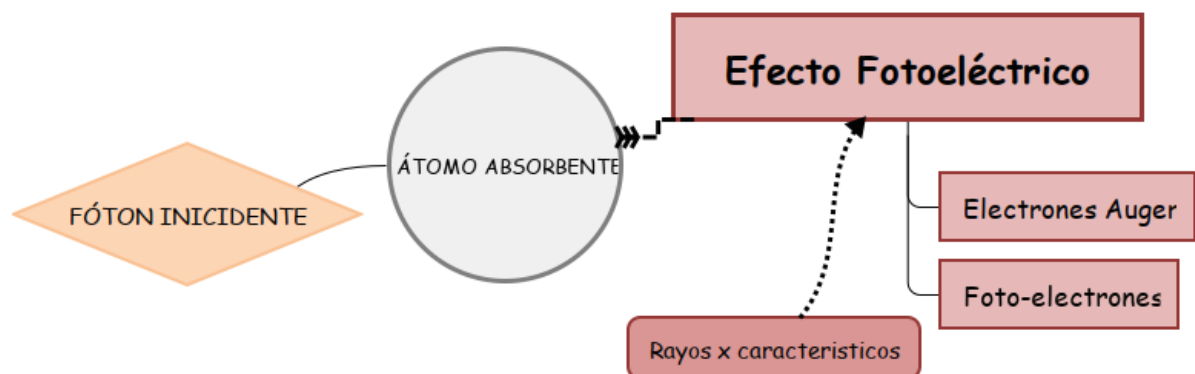
### Interacciones fotónicas de importancia en el área de física médica

- Física presente en la atenuación y dispersión de haces de fotones en tejidos de importancia, imágenes y dosimetría de radiación.
- Necesario e importante en dosimetría de radiación: todos los aspectos físicos que se involucren en los procesos de: planificación del tratamiento, suministro de dosis y prescripciones de dosis en procedimientos clínicos.
- Física presente en la transferencia de energía de fotones a partículas cargadas de luz en un absorbente y absorción de energía en tejidos.
- Física presente en la producción de neutrones: Seguimiento, planificación y evaluación de los procedimientos específicos en estos procesos puesto que representa un peligro potencial para la salud de los pacientes y el personal involucrado con el uso de linacs de alta energía.

### Efecto Fotoeléctrico

En este fenómeno existe una emisión de electrones provenientes de las superficies de los metales cuando incide luz sobre las mismas, los electrones emitidos llevan consigo una  $E_k$  máxima la cual no depende de la intensidad de radiación que incide, siendo esta una de las principales características del fenómeno seguido de:

- Los fotones cuentan con una energía proporcional a la frecuencia de la onda que se le asocia. La  $E_k$  max que se obtiene depende solo de  $\nu$  (frecuencia de la radiación que incide).
- Existe intercambio de energía entre radiación-materia siempre y cuando se realice en múltiplos de un cuanto de energía.
- Un electrón en reposo absorbe un fotón de energía  $E_f = h\nu$  ( $\nu$  frecuencia de la onda y  $h$  la constante de Planck).
- Existe una emisión de electrones y una transferencia de energía fotón-electrón instantánea.

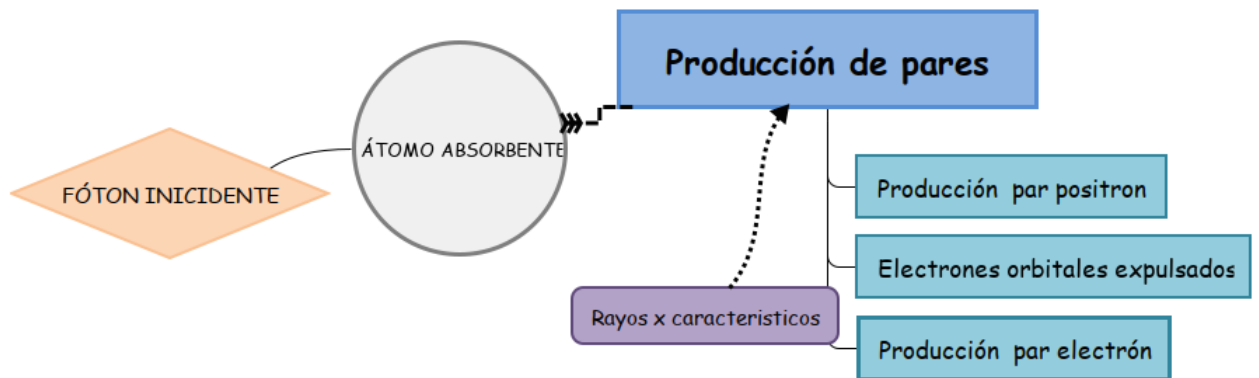


### Producción de Pares (Electron-Positron)

Esta es una de las formas en la que los fotones interactúan con la materia siempre y cuando ellos tengan una energía ( $E=h\nu$ ) mayor que la energía de masa de un electrón en reposo mas un positrón.

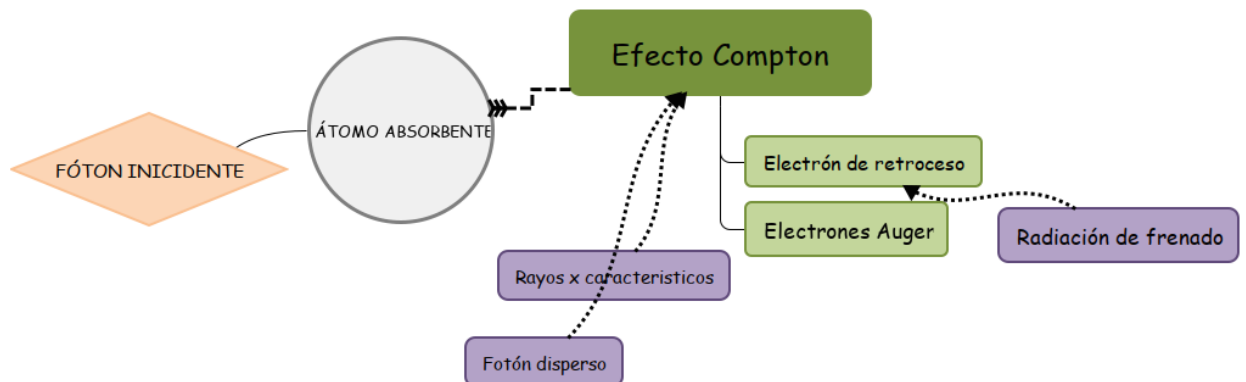
- Considere que la energía de masa en reposo del electron es de 0,511 MeV y para que exista una interacción de producción de pares la energía debe ser igual o mayor que 1,022MeV.

La energía de masa en reposo del electrón es 0,511 MeV, así que por encima de 1,022MeV de energía fotónica, es posible la producción de pares. Para energías de fotón muy por encima de este umbral, la producción de pares se convierte en el modo dominante de la interacción de los rayos X y los rayos gamma con la materia.



### Efecto Compton

En este fenómeno cuando la radiación electromagnética incide sobre las superficies la longitud de onda a salir es mayor con respecto a los valores con los que ingreso.



#### 2.10.1 Interacción en un absorbente

En este caso los fotones al atravesar el medio material consiguen sufrir interacciones varias con los átomos propios del medio, interacciones que implican a los electrones o cualquier núcleo del medio en sí.

Aquellas interacciones con los núcleos se pueden dar directamente fotón-núcleo a lo que se denomina *fotodesintegración* o por otro lado se puede dar interacciones entre el campo electrostático del núcleo y el fotón, proceso llamado *producción de pares*.

Cuando se generan interacciones fotón-electrón, se atribuye a que se den por Efecto Compton, Dispersión de Thomson, Efecto Fotoeléctrico o dispersión de Rayleigh. Procesos que se relacionan mas adelante.

Para estimar lo que sucede con el fotón luego de interactuar con la materia, existen dos posibles eventos:

- El fotón se dispersa con dos posibles eventos: El fotón que se efectúa contiene la energía equivalente del fotón que insidido causando la no liberación de partículas cargadas con luz en la debida interacción y entro del otro evento posible se contempla, aquel fotón dispersado contiene una energía en proporciones bajas con respecto al fotón incidente, pero aquella energía se encuentra en exceso se cede a un electrón
- El fotón se extingue absorbiéndose totalmente permitiendo que una fracción de su energía se traslade a partículas cargadas de luz tales como positrones o electrones.

Estas partículas cargadas *positrones* y *electrones* que se producen o se liberan en el medio gracias a las interacciones relacionadas con los fotones, pueden consignar energía en el medio mediante interacciones de Coulomb con electrones proceso conocido como pérdida de ionización o pueden irradiar energía cinética  $E_k$  en forma de fotones también mediante interacciones de Coulomb con los núcleos del medio proceso llamado pérdida de radiación.

A continuación se muestra algunas relaciones físicas relacionadas con el tema en mención.

Cantidad	Definición	Unidad	Conversion	Aspectos
<b>Exposición (X)</b>	X	2	1	Suma de todas las cargas electricas de los iones de un
<b>Kerma (K)</b>	k	1	/	/
<b>Dosis (D)</b>	D	1	1Gy=100rad	Energía depositada-Unidad
<b>Dosis Equiv (H)</b>	H	1 Sv	1 Sv=100 rem	D $\omega$ R: Dosis multiplicada por un factor de p
<b>Actividad (A)</b>	A	1	Bq	Bq: becquerel. Ci: Curie. $\lambda$ Constan

**Cuadro 2.10.1:** Medidas y unidades de radiación.

Dentro de radiación ionizante entran como una de las categorías los fotones energéticos los cuales pueden interactuar con la materia de formas distintas.

Interacción
<i>Dispersion de Thomson</i>
<i>la dispersión de Rayleigh</i>
<i>Dispersion Compton</i>
<i>Efecto fotoeléctrico</i>
<i>Producción de pares nucleares.</i>
<i>Producción triplete</i>
<i>Fotodisintegración</i>

**Cuadro 2.10.2:** Posibles interacciones radiación-materia en los fotones.

- Las probabilidades de interacción radiación-materia con fotones, dependen de la energía del fotón incidente  $h\nu$  y del número atómico  $Z$  del absorbedor.

Dentro del área de física médica y dosimetría de radiación, las interacciones de los fotones con el átomo del absorbente se clasifican de la siguiente manera según su nivel de importancia:

- Interacciones de los fotones con el átomo del absorbente

Interacciones de mayor importancia	Importancia Moderada
Efecto fotoeléctrico.	Dispersión de Rayleigh
Dispersión Compton por electrón "libre".	/
Producción de pares en el campo del núcleo y producción de tripletes.	/

Menor importancia	Interacciones insignificantes
Efecto fotonuclear.	Dispersión de Thomson por electrón
Dispersión de Thompson por electrón "libre".	Compton que dispersa por electrón
/	Producción de mesones
/	Dispersión elástica de fotones por la producción de pares nucleares

## 2.11 Interacción de partículas cargadas

Los átomos inicialmente se encuentran neutros eléctricamente hablando. En este proceso cuando una partícula que se encuentra cargada golpea un electrón orbital lo expulsa del átomo, lo que ocasiona la formación de un par de iones. Puesto que la eliminación de este electrón del átomo disminuye el número total de cargas negativas por uno, deja el átomo con una carga positiva, y este ion por sí mismo consiste en:

- El átomo cargado positivamente
- El electrón cargado negativamente Y son estas partículas que de esta manera son capaces de crear pares iónicos a quienes se les llama radiación ionizante.

Son las partículas cargadas (beta y alfa) los tipos más comunes dentro de la mayor parte de las aplicaciones, interacciones que se tratan a continuación.

### 2.11.1 Partículas Alfa

Esta partícula es un núcleo de helio que ha sido desprendido de sus electrones orbitales, se emite desde un átomo radiactivo con una velocidad de aproximadamente  $1/20$  de la velocidad de la luz y con energías entre 4 a 9 MeV. Dichas partículas provocan ionizaciones en la materia cuando son desviados por la carga positiva de un núcleo y arrastran los electrones orbitales (atraídos por la carga positiva del alfa) junto con ellos, estas partículas desencadenan excitaciones a lo largo de su trayectoria al atraer electrones orbitales internos hacia órbitas externas. Es así como se da energía fuera del átomo como radiación fluorescente o rayos X de baja energía, cuando los electrones vuelven a caer en las vacantes orbitales internas.

Ya que las partículas alfa tienen una masa relativamente grande (2 neutrones y 2 protones), una carga eléctrica alta ( $2+$ ) y baja velocidad, creando muchos pares de iones en una longitud de camino muy corta a lo que llamamos ionización específica que por la característica anteriormente mencionada es muy alta y es esta la razón por la cual pierde toda su energía en una distancia muy corta.

Su alcance en el medio (aire) es de algunos centímetros, incluso para las partículas alfa con energías considerables. Considerando el rango limitado en materia, esta no presenta peligro de radiación externa para el ser humano.

Muchas partículas alfa no pueden penetrar la capa protectora de la piel. En el caso de que se presente lo contrario e ingrese al cuerpo, rodeado de tejidos vivos, el daño será en el área local en la que se deposita este emisor alfa. Es por esto que a nivel interno son peligrosas y debe evitarse la ingesta.

### 2.11.2 Partículas Beta

Estas partículas se emiten desde el núcleo de un átomo con naturaleza radiactiva con un rango amplio de energías hasta un valor máximo. En el caso cuando se emite una beta que está por debajo de este valor máximo, el neutrino se lleva el resto de la energía.



Dichas partículas beta, igual que las partículas alfa, pierden su energía por ionización y excitación, su masa ( $1/7300$  de un alfa) sigue siendo muy pequeña y contiene una carga baja aproximada de ( $1/2$  de la de un alfa), es por esto que las interacciones tienen lugar en intervalos menos frecuentes. Estas partículas beta no producen muchos pares de iones por centímetro de trayectoria como las partículas alfa y, por esta razón, tienen un alcance mayor en la materia. Este rango de la partícula beta en la materia depende de su energía y la composición específica del material.

- **Producción de rayos X de Bremsstrahlung:** Para este caso en particular las partículas beta pueden interactuar con el núcleo de un átomo y dar lugar a rayos X, método llamado Bremsstrahlung (Radiación de frenado), que sucede cuando una partícula beta de velocidad alta. La interacción eléctrica que se da entre la partícula beta negativa y el núcleo cargado positivamente hace que ocurra la desviación de la partícula beta de su camino original deteniéndose por completo, esta desviación causa un cambio en la velocidad de la partícula beta con la emisión de rayos X de diversas energías. Las probabilidades de producción de Bremsstrahlung aumenta con el aumento del número atómico del absorbente, dichas partículas (beta) poseen una energía de más de 70 keV para lograr penetrar la capa que protege la piel y es la razón por la cual representan un peligro externo. Pero a su vez la partícula beta también puede constituir un peligro interno, esta partícula tiene un mayor rango en el tejido en comparación con la partícula alfa debido a su baja ionización específica, por esta razón, entrega menos energía por unidad de volumen de tejido, siendo no tan efectiva para causar daño como una partícula alfa.

### 2.11.3 Interacción de rayos X y rayos gamma

En términos de protección radiológica los rayos X y los rayos gamma son idénticos, difieren únicamente en su lugar de origen. Aquellos rayos gamma se emiten con energías discretas desde los núcleos que se encuentran excitados. Estos rayos X se emiten desde fuera del núcleo; es decir, un electrón de capa externa reemplaza a un electrón de capa inferior faltante y se produce una radiografía característica, o la interacción de partículas beta hace que se produzca la radiación de Bremsstrahlung.

La energía que maneja un rayo X característico es aproximadamente igual a la diferencia en los niveles de energía de los electrones, pero la radiación Bremsstrahlung produce un espectro continuo de energías hasta un valor máximo. Esos rayos X  $\gamma$  no tienen carga, tampoco interactúan por fuerzas electrostáticas como en el caso de partículas cargadas, que causan la ionización de la materia directamente a lo largo de su recorrido. Aún así los rayos X y gamma tienen suficiente energía para liberar partículas cargadas secundarias (los electrones) de la materia a través de una de tres interacciones básicas:

- **Efecto fotoeléctrico** Interacción de fotones de rayos X o  $\gamma$ , así como otros fotones (la luz), por lo que toda la energía del fotón se transfiere a un electrón de capa interna (casi siempre la capa K), expulsando el átomo y dejando el átomo con una vacante de capa interna. Esta vacante de capa interna crea una energía de excitación que corresponde a la energía de unión (BE) del fotoelectrón expulsado.
- **Efecto Compton** Los fotones con energías mucho mayores que la energía de unión (BE) de los electrones en un átomo pueden interactuar a través de interacciones de dispersión en las que se conserva la energía cinética total del sistema. En esta interacción, el electrón aparece al fotón como un electrón libre, donde su energía de unión es igual a 0, ( $BE = 0$ ). En este proceso, el fotón disperso y el electrón Compton comparten la energía del fotón incidente (gamma). La energía cinética (KE) llevada por el electrón Compton puede depositarse localmente, o sea, ser absorbido de manera inmediata por el entorno. Aún así, la energía transportada por el fotón disperso Compton no se deposita localmente. Por lo tanto, este fotón disperso puede contribuir significativamente a la dosis fuera de un aparato de protección.

- Producción en pares. Los fotones gamma( $\gamma$ ) de alta energía transpasan su energía principalmente por producción de pares. Un haz de rayos X o gamma de energía alta que pasa cerca de un núcleo desaparece súbitamente, es allí cuando un electrón y un positrón aparecen en su lugar. Esta interacción debe tener lugar en un campo eléctrico, generalmente el del núcleo, para conservar el impulso o momentum.

Dado que ambas partículas se crean a partir de la energía proporcionada por el fotón que incide, el proceso es posible energéticamente hablando, solo si  $E_\gamma$  es mayor que 1.022 MeV, que es la suma de la energía de masa en reposo de un electrón y un positrón (0.511 MeV cada uno).

- Energía de masa en reposo que se denomina como la cantidad de energía que se liberaría si una partícula de masa  $m$  se convierte en energía, viendolo posible si recordamos la famosa teoría de Einstein de que  $E = mc^2$ , donde:

$E$  = energía de fotones (en julios, se puede convertir a MeV)

$m$  = masa en reposo de dos electrones (en kilogramos)

$c$  = la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m / seg)

Cuando el positrón se pone mas lento, perdiendo su energía cinética, se somete a la aniquilación del positrón combinándolo con un electrón. Esto produce dos fotones con energías de 0.511 MeV cada uno, emitidos a  $180^\circ$  uno del otro. Esta radiación de aniquilación representa la energía de masa en reposo de dos electrones, que se convierte en energía en su máxima expresión en forma de fotones.

## 2.12 Cantidades unidades de Radiación

Es de gran importancia comprender las distintas cantidades y unidades que se utilizan al referirse a la radiación, junto con las unidades que al transcurrir el tiempo han cambiado.

### 2.12.1 Tasa de conteo

Se define como el número, la cantidad de interacciones de radiación que ocurren en el detector en un período de tiempo determinado. Esta medida se trabaja en unidades como cps (conteos por segundo) o cpm (conteos por minuto). Es mas útil para medir la radiación de partículas, aunque tambien puede usarse para pequeñas cantidades de rayos X o radiación gamma.

Es común ver la tasa de conteo medida en dps (desintegraciones por segundo) o dpm (desintegraciones por minuto), aunque esta no es realmente una tasa de conteo real. Las mediciones trabajadas en dps o dpm han tenido en cuenta la eficiencia de los detectores para para lograr estimar la verdadera tasa de desintegración.

### 2.12.2 Exposición

Se establece como la medida de la cantidad de carga eléctrica que producen los fotones en una masa de aire. Esa carga eléctrica proviene de la producción de pares de iones, que el detector recoge y mide como corriente. Se puede medir como una tasa (exposición por unidad de tiempo), para aquellas fuentes que emiten radiación continuamente, o como una exposición integrada total, para fuentes como tubos de rayos X que emiten radiación en un solo pulso.

La unidad tradicional utilizada para la exposición es el roentgen (R). 1 R es la cantidad de radiación requerida para liberar una unidad de carga electrostática (de cualquier signo) en  $1 \text{ cm}^3$  de aire a temperatura y presión estándar (STP). Esto equivale a aproximadamente  $2.08 \times 10^9$  pares de iones. En unidades SI,  $1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C / kg}$ .

### 2.12.3 Dosis absorbida

Se establece como medida de la energía que se deposita en un material por todos los tipos de radiación. La unidad tradicional es el rad (dosis de radiación absorbida), que es igual a 100 ergios / gramo. La unidad SI para la dosis absorbida es el grey (Gy), igual a 1 joule / kg. 1 Gy = 100 rads. Es difícil de medir directamente, por lo que es frecuente que se calcule a partir de otras cantidades, como la exposición. Para calcularla, es necesario conocer el factor de conversión correcto para el material de interés. Se debe tener en cuenta que en la protección radiológica, el roentgen y el rad con frecuencia se usan indistintamente ya que, en el tejido, son aproximadamente iguales. Aun así el roentgen es una unidad de exposición y se aplica solo a las radiaciones x o gamma.

### 2.12.4 Dosis equivalente

“HT” es una cantidad calculada a partir de la dosis absorbida que tiene en cuenta que algunos tipos de radiación son más nocivas para el tejido biológico que otros. Es igual a la dosis absorbida en un tejido de cada tipo de radiación ( $D_{R,T}$ ) multiplicada por un factor de ponderación de radiación ( $W_R$ ) para ese tipo de radiación, sumado a todos los tipos de radiación presentes:

$$H_T = \sum_R W_R X D_{R,T} \quad (2.12.1)$$

La unidad aconstumbrada utilizada para la dosis equivalente es el rem. La unidad SI es el sievert (Sv), y 1 Sv = 100 rem. El factor de ponderación de la radiación no tiene unidades; sin embargo, se usa una unidad diferente para la dosis equivalente para que sea fácilmente distinguible de la dosis absorbida.

### 2.12.5 Dosis efectiva

Esta cantidad tiene en cuenta que los diversos órganos y tejidos del cuerpo humano responden a la radiación de manera distinta. Se usa principalmente en protección radiológica, y está destinado a comparar el riesgo de efectos estocásticos asociados con una exposición no uniforme a la radiación con el de una exposición uniforme en todo el cuerpo.

<sup>1</sup> La DE se calcula multiplicando la dosis equivalente (HT) para cada órgano / tejido por el factor de ponderación de tejido para ese órgano / tejido ( $w_T$ ), sumado a todos los órganos / tejidos del cuerpo:

$$H_T = \sum_T w_T x H_T \quad (2.12.2)$$

Esta variable sigue siendo medida en rem o sievert.

### 2.12.6 Dosis efectiva comprometida

La CED o CEDE es una cantidad que calcula la dosis total que un sujeto recibiría durante toda la vida de una ingesta de material radiactivo. Se debe tener en cuenta que la tasa de dosis generalmente disminuye con el tiempo, dependiendo de la vida media de la sustancia y la velocidad a la que el cuerpo lo elimina.

### 2.12.7 Dosis efectiva total

Es básicamente igual a la suma de la dosis de radiación externa más la dosis de radiación interna:

$$TED = ED + CED \quad (2.12.3)$$

<sup>1</sup> Un efecto estocástico es un efecto sobre la salud que ocurre al azar y para el cual la probabilidad del efecto se supone que ocurre, en lugar de su gravedad, como una función lineal de la dosis.

### 2.12.8 Parámetros físicos del haz de radiación a utilizar en un tratamiento

La selección del haz de radiación y debida prescripción de dosis para el tratamiento con radiación según el tipo de afección debe obedecer a ciertos factores ejemplo de ello son aquellos que tienen injerencia con la física, por ejemplo:

Según el diseño de la máquina, energía del haz, dosis de profundidad, tamaño, entre otros. • Densidad de la ionización que se produce en el tejido a causa del haz de radiación usado en el tratamiento.

### 2.13 Propiedades de la Radiación Electromagnética

Recordemos que cuando tratamos con cargas eléctricas inmóviles estas producen campos eléctricos, pero cuando las cargas se encuentran en movimiento, producen campos eléctricos y a la vez magnéticos que cuando sufren cambios regulares y recurrentes producen RM (Radiación Electromagnética) quien permite conducir energía. Cuenta con las siguientes características:

- No contiene posee masa en estado de reposo
- Transmite una energía  $hf$  con longitud de onda  $\lambda$  y momento  $p = h/\lambda$ , siendo  $h$  la constante de Planck.

Cuando se trata de la liberación de un electrón en un metal se necesita una mínima energía según el material, denotada como la función trabajo  $\phi$ , teniendo en cuenta esto, Einstein formula que debe existir una energía cinética máxima ( $E_k$ ) con la que el electrón es despedido de la superficie del mismo por un fotón con energía  $hf$ , expresada de la siguiente manera:

$$E_k = hf - \phi$$

Donde la  $\Phi$ , es la cantidad mínima de energía necesaria requerida para estimular fotoemisión de electrones en la superficie de un metal, quien también depende de las características del mismo, estimando la no dependencia con la intensidad radiación que incide.

Es importante recordar a partir de lo antes mencionado que a aquella emisión de electrones en las superficies metálicas se le conoce como Efecto Fotoeléctrico

HASTA AQUI!

#### 2.13.1 Influencia de la geometría en la determinación de coeficientes de atenuación

$\mu$  Coeficiente de atenuación, el cual se establece de manera experimental a partir de la técnica de geometría de *haz estrecho* que comprende una fuente de fotones de una sola energía colimados estrechamente y un detector igualmente colimado.

Para un medio indiferenciado, este coeficiente de atenuación  $\mu$  es constante u uniforme, deduciendo así la siguiente relación Matemática, válida para haces de fotones con una sola energía.

$$I = I(X) = I(0)e^{-\mu x} \quad (2.13.1)$$

- Cuando se hace uso de un haz extenso o amplio en términos geométricos para establecer coeficientes de atenuación y secciones transversales en la atenuación del haz de fotones, en este caso la lectura disminuye gracias a la disminución del haz primario en el absorbente y se incrementa por la radiación que se dispersa desde el absorbente hacia el detector específico. El factor de acumulación que permite interpretar aquellos fotones secundarios que se dispersan desde el absorbente hacia el detector se define como:

$$B = \frac{I_B(X)}{I_N(X)} \quad (2.13.2)$$

- Donde  $I_B(X)$  es la señal medida por el detector para un espesor del absorbedor específico cual sea en geometría de haz amplio ancho.
- $I_N(X)$  es la señal de geometría de haz estrecho para el espesor del absorbedor específica.

## 2.14 Detectores de Radiación Ionizante

Es importante generar medidas efectivas para estimar dosis apropiadas en un procedimiento médico, lo que se conoce comúnmente como *dosimetría* ya sea para preparar las áreas físicas donde se realizarán los procesos o la estimación de dosis en trabajadores ocupacionalmente expuestos, según sea el caso se referencia como: *Dosimetría de área* y *Dosimetría personal*

En la área de radiología el personal a cargo de la protección radiológica es el encargado de clasificar a los trabajadores, según el riesgo de exposición a radiación ionizante para así, instaurar medidas de control por medio de la vigilancia dosimétrica, individual o del ambiente de trabajo según sea el caso.

Para realizar una debida tasación de dosis en tejido asociado a la piel se puede determinar haciendo uso de dosímetros de termoluminiscencia o cámaras de ionización. Los TLD *dosímetros termoluminiscentes* gracias a sus pequeños tamaños posibilitan la ubicación sobre el cuerpo de la persona obteniendo una medida de la radiación difusa, mientras que las cámaras de ionización gracias a su tamaño mucho más considerable que el dosímetro no es colocado cerca de la piel. Estos son algunos de los casos donde es más necesario el uso de detectores para detectar la presencia de un campo de radiación ionizante en procesos médicos puesto que no es percibida mediante los sentidos u órganos del ser humano, una de las razones por las cuales es necesario hacer uso de ellos como dispositivos de detección para tener un porcentaje alto en protección radiológica.

Cuando la radiación interactúa con la materia esta transfiere energía, generando efectos posibles de medir, tales como: Alteraciones biológicas, excitación de luminiscencia en sólidos, ionización de la materia o de gases.

Los detectores de radiación ionizante son dispositivos que se ubican en un medio donde existe un campo de radiación, se constituye de un material sensible a este tipo de energía radiación y un sistema que transforma dichos efectos en un valor correspondiente a la lectura. En seguida se describen aquellos detectores que podemos encontrar en el servicio de radiología:

- **Cámaras de ionización:** Estos dispositivos recogen las cargas que son liberadas por las radiaciones cuando ionizan un gas, dichas cargas se recolectan mediante un par de electrodos entre los que existe una diferencia de potencial para no permitir se produzca el fenómeno de la recombinación. (Detección para niveles de radiación mayores a 1 mR/h, eficientes en la detección partículas alfa o beta)
- **Contador proporcional:** Para poder evidenciar pulsos individuales, es necesario aumentar el voltaje por arriba de los 1000V, así el campo eléctrico acelera los electrones y estos generan ionizaciones secundarias, aquellos electrones secundarios acelerados producen nuevas ionizaciones que generan cascada de ionizaciones, detectando la llegada de la partícula inicialmente pero no su energía. Se usa para la detección de rayos X y electrones de baja energía.
- **Contador Geiger-Muller:** Es un detector de ionización, que funcionan gracias a una alta tensión en una determinada región en donde por un solo evento se crea un pulso de avalancha. Detección de niveles bajos de radiación.
- **Detector de centelleo:** Consta de una sustancia que emite luz cuando es golpeada por una partícula ionizante. Utilizado principalmente para formación de imágenes (gammagrafía).
- Estos dispositivos miden dosis en regiones donde existen variaciones significativas debido a la región de la acumulación de un haz de alta energía. (Usado en la Monitorización personal)

## 2.15 Protección Radiológica

La protección radiológica tiene como fin garantizar los cuidados óptimos de personas y del medio ambiente contra aquellos efectos perjudiciales que puede acarrear la exposición a radiaciones de tipo ionizante.

Mediante acciones o actividades tales como; sistema de rayos X en aplicaciones médicas de Radio diagnóstico como radiología dental o tomografía computarizada e intervencionismo, existe una exposición a la radiación ionizante ocupacionalmente hablando, niveles de exposición que se necesitan evaluar y cuantificar ya que este campo (salud) contribuye en gran parte la exposiciones de una población en general.

Es por esto que entidades como la Comisión Internacional de Protección Radiológica establecen normas y sugieren recomendaciones en la aplicación de técnicas radiológicas que beneficien a la población evitando el mayor riesgo posible en la dosis de exposición ocupacional. Es importante tener en cuenta que debe existir respectivamente una razón clínica con visto bueno que por lo menos estimule en llevar a cabo el procedimiento con mas beneficios que riesgos para el paciente o trabajador expuesto, luego de que se justifique médicamente la practica, esta debe convenir la dosis mas baja que se pueda mediante una proceso determinado de optimización.

Los límites de dosis para trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes en Colombia es tan relacionados de la siguiente manera:

Exposición a Radiaciones Ionizantes	
Tipo de Exposición	Limite
Dosis equivalente al año en	
Piel	500 mSv
Cristalino	150 mSv
Dosis efectiva	
Un año	50 mSv
Promedio en 5 años	20 mSv

**Cuadro 2.15.1:** Valores establecidos de exposición de radiación ionizante según la comisión internacional de protección radiológica.

Recordemos que para lograr obtener mediciones de la dosis de radiación ionizante y conocer si existe algún tipo de daño biológico es imprescindible disponer de magnitudes y unidades óptimas tales como;

- Dosis efectiva: Dosis equivalente ponderada por el factor de ponderación de tejido. Sievert(Sv)-Julio/kilogramo. (1 Sv(SI) = 100 Rems).
- Dosis equivalente: Dosis absorbida ponderada por el factor de ponderación de la radiación. Sievert (Sv)-Julio/kilogramo.
- Dosis absorbida: Energía absorbida por unidad de masa. Gray (Gy)-Julio/kilogramo. (1Gy(SI)equivale a 100 rads)

Con respecto los datos tenidos en cuenta como limite de exposición a la radiación, es necesario revisarse mínimo una vez al mes los datos que reportan los instrumentos de medida respectivamente *Dosímetros* y evaluar riesgos. Según el tipo de radiación al que se encuentre se requiere el uso de delantales y guantes plomados (usados con mayor frecuencia en procedimientos de rayos X), dotación especial que previene la entrada de parte de la radiación que incide a los órganos del cuerpo humano.

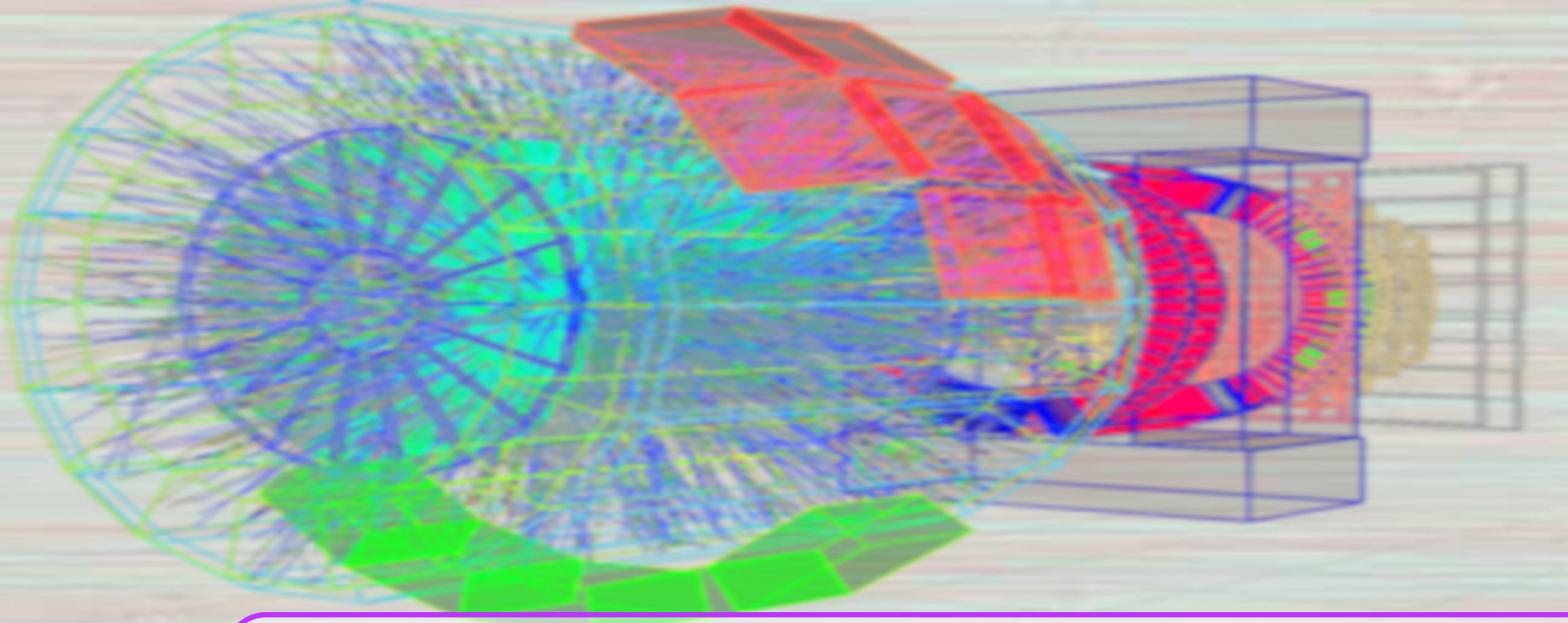
Se consideran trabajadores expuestos, individuos que por la condición en que se desarrolla su trabajo, se encuentran sometidas a exposición de radiación ionizante capaz de entrañar dosis

---

superiores en relación a los límites de dosis para el público.







## 3. Simulación e Interacción electromagnética

Dentro de los avances producidos dentro del área de la ciencia, las arquitecturas computacionales y los procesos, tanto como su implementación en problemas asociados a la física abarcan cada vez mas espacio dentro de su uso y aprovechamiento en proyectos multidisciplinarios tales como: **Física médica, física de partículas, ingeniería, construcción, etc.**

### 3.1 Aspectos asociados al modelo electromagnético desde la versión simulada

### 3.2

### 3.3

Geant4 es un conjunto de múltiples herramientas que permiten simular el paso de partículas a través de la materia, Geant4 divide su trabajo en categorías de clase, las cuales incluyen geometrías, eventos, procesos, seguimiento, interfaces de usuario, visualización, entre otros. Plataforma de simulación desarrollada por la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN), la cual se encuentra escrita en lenguaje C++. Como método computacional es un conjunto de herramientas orientado a objetos para la simulación en Física de Altas Energías, medicina nuclear, imágenes médicas y terapia.

Geant4 aprovecha técnicas de software y la tecnología orientada a objetos con el fin de corroborar resultados físicos presentes en una simulación referente al transporte de partículas mediante una geometría con distintas configuraciones donde se involucran detectores y distintos tipos de materiales.

### 3.4 Diseño de herramienta computacional GEANT4

Esta herramienta **GEANT4** basa su estructura en la programación orientada a objetos (POO) que usa objetos que logren manipular datos o información de entrada para la obtención de datos de salida particulares. Para definir y diseñar acertadamente el programa principal, se necesita establecer los siguientes aspectos dentro de la simulación.

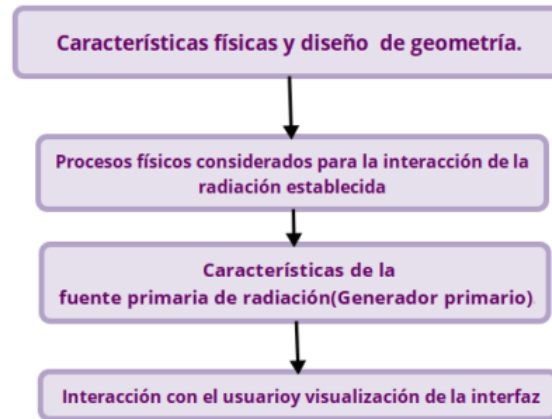


Figura 3.4.1: Aspectos importantes dentro de la simulación

### 3.5 Modelo implementando Geant4

Esta herramienta hace uso de funciones que permiten el acceso a procesos físicos incorporados en la simulación y a conjuntos de datos, librerías, información de los eventos, entre otros de los que se compone dicho proceso, lo que se constituye como una característica principal de la misma. Dentro del modelo físico y geométrico establecido en la herramienta, se comprende la extensión que permite visualizar trayectorias de partículas, impactos, geometría, detectores creados y eventos que persisten. Una de estas extensiones, la geometría, permite realizar una descripción detallada de un gran entorno (entorno madre), lo que en este caso es práctico en aplicaciones como estas, médicas, donde hacen parte de ese entorno una fuente, detector, paciente o phantom.

Con respecto a los procesos se establece que estos, no dependen del tipo de partícula tratada y tampoco de los procesos físicos que intervienen en la simulación, dentro de las posibilidades que se pueden dar en los procesos se tiene:

- Generar cambios en las cantidades físicas.
- Generar partículas secundarias.
- Suspende, pospone o mata un proceso

y en su seguimiento, los procesos pueden actuar en cualquiera de los tres intervalos de espacio-tiempo, ya sea en reposo, a lo largo del step, (mientras transcurre) o en un punto finalizando el proceso, (al final de un step).

Dentro de la lógica de funcionamiento de Geant4 que permite el recrear estos casos, en su núcleo, al momento de realizar el modelamiento de los procesos que intervienen en la gestión de la simulación, se hace uso de los siguientes elementos:

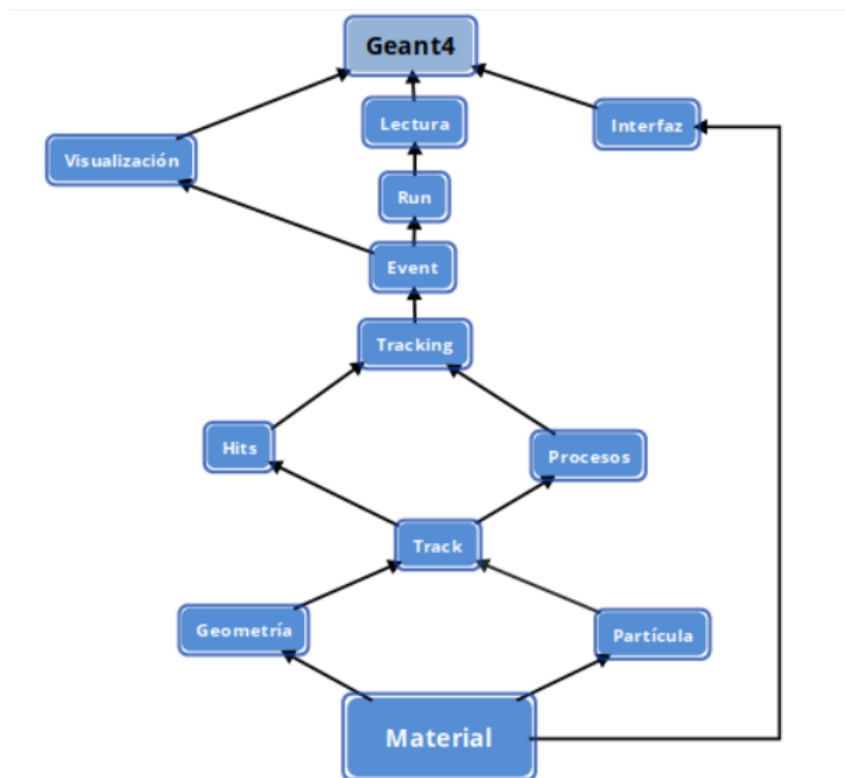
- Event: Consiste en la unidad básica de la simulación ejecutada mediante Geant4, la cual comprende la interacción de los primarios y secundarios producidos.
- Run: Una recopilación de eventos (event loop), los cuales comparten una descripción física y una geometría en particular.

- **Track:** Elemento responsable de generar una "pistas o fotografías instantáneas" de aquellas variables físicas asociadas a las partículas que se encuentran procesándose.
- **Step:** Este elemento guarda información de los cambios que tuvieron las variables físicas en las partículas procesadas.

Los procesos de transporte de partículas en el modelo geométrico son llevados a cabo mediante la categoría tracking, quien permite la evolución de un estado asociado a un Track proporcionando información en los volúmenes sensibles.

La categoría Track contiene clases para tracks y steps, utilizadas en procesos que se implementan a partir de modelos basados en interacciones físicas. En la categoría de Event se ejecutan los eventos en términos de track y el Run gestiona las colecciones de eventos que comparten un haz y un detector específico. Por último en la categoría de lectura se acumulan dichos datos para luego ser analizados.

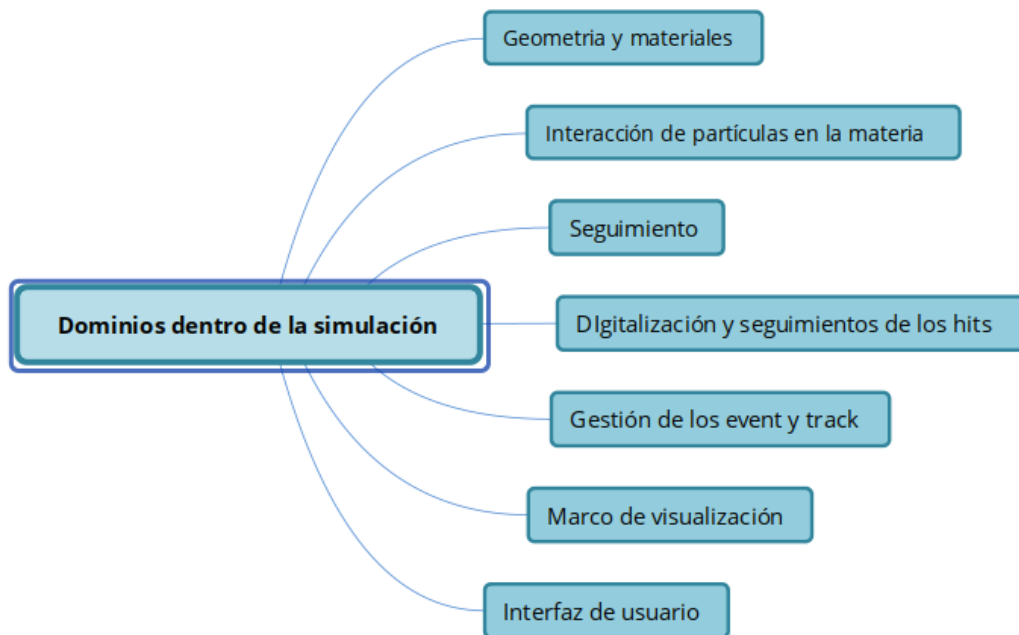
Los elementos anteriormente mencionados se representan mediante las siguientes clases:



**Figura 3.5.1:** Diagrama de herramientas en Geant4.

### 3.5.1 Procesos incorporados en Geant4.

Los campos claves presentes en simulaciones donde se establece el paso de partículas a través de la materia son:



Dentro del paquete de herramientas que ofrece Geant4, el usuario está en capacidad de crear geometrías de materiales y formas distintas para así definir aquellos elementos "sensitive volume" quienes registran la información "hits" necesaria para una posterior lectura desde el detector.

- **Run:** está representada por la clase **G4Run** de la cual se derivan las siguientes:
  - G4RunManager:** Clase de administrador
  - G4UserRunAction:** Clase de usuario opcional
- **Event:** está representada por la clase **G4Event** quien tiene como objeto a la entrada, listar las partículas y a la salida, coleccionar las trayectorias, de la cual se derivan las siguientes clases:
  - G4EventManager:** Clase de administrador
  - G4UserEventAction:** Clase de usuario opcional
- **Track:** está representada por la clase **G4Track** de la cual se derivan las siguientes:
  - G4TrackingManager:** Clase de administrador
  - G4UserTrackingAction:** Clase de usuario opcional
- **Particle:** está representada por 3 tipos de clase:
  - G4Track:**  
Posición, información geométrica, entre otros.  
Rastreo de partículas
  - G4DynamicParticle:**  
Propiedades dinámicas-físicas de las partículas, impulso, energía, etc.  
Representa una partícula individual.
  - G4ParticleDefinition:**  
Representa las propiedades estáticas de las partículas
  - G4ProcessManager:**  
Describe los procesos que comprometen a las partículas  
Todos los objetos **G4DynamicParticle** del mismo tipo de partícula comparten la misma clase **G4ParticleDefinition**
- **Step:** esta representada por la clase **G4Step** de la cual se derivan las siguientes:
  - G4SteppingManager:** Clase de administrador
  - G4UserSteppingAction:** Clase de usuario opcional.
 Un punto está representado por las clases **G4StepPoint**

### 3.6 Geometría

Dentro de este concepto se describe una estructura a partir del manejo autónomo de figuras geométricas por parte del usuario, esquemas que se acomodan a las necesidades y objetivos de la simulación, diseño geométrico donde a través de e se propagan partículas eficientemente.

Para diseñar la geometría inicialmente debe existir un objeto en el cual se definan las dimensiones del mismo y la forma del volumen teniendo en cuenta la clases para originarlo, en el caso de una esfera la clase asociada sería **G4Sphere**. Lo que se conoce como **Solid Volume**

Una vez se haya generado este objeto se establecen los siguientes volúmenes:

- Logical Volumen: Quien tiene como función esencial definir el material, el cual es definido a partir de la clase **G4Material**.
- Physical Volumen: Define la rotación del volumen original, el número de copias y la posición respecto al volumen madre.
- World o volumen madre: Contiene al volumen que se este definiendo siendo este el volumen mas grande entre los mencionados anteriormente.

En los procesos físicos que se realizan en Geant4 se describe la interacción de las partículas con materiales y/o un volumen determinado. Mediante siete(7) categorías principales, que son las siguientes:

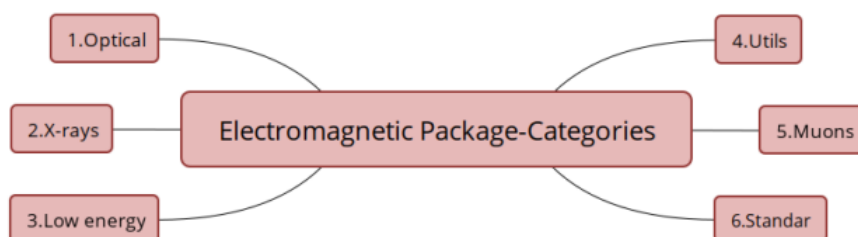
- Electromagnetic
- Hadronic
- Photolepton-hadron
- Decay
- Optical
- Transportation
- Parameterization

Procesos, modelos, categorías que el usuario puede elegir a conveniencia según el tipo de partícula.

### 3.7 Procesos Físicos

Dentro de la física electromagnética planteada en Geant4 se manejan las interacciones de tipo electromagnético de partículas como: Fotones, leptones, hadrones e iones.

- Conjunto de categorías de clase relacionadas al paquete electromagnético.



- 1. Establece un código determinado para fotones ópticos
- 2. Se establece un código específico con respecto a la física de rayos X.
- 3. Proporciona modelos alternativos a energías mas bajas con respecto a las tratadas en la categoría estándar
- 4. Grupo de clases usadas por las otras categorías.
- 5. Interacciones con muones.

- 6. Manejo de procesos básicos para las interacciones de positrones, electrones y fotones y hadrones.

### **3.8 Manejo de la información (Adquisición e implementación de datos).**