



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
*Facultad de Ciencias Experimentales*

Trabajo Fin de Grado

# **Efectos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos**

**Alumno: Álvaro Ordóñez Romero**

**Febrero, 2016**



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
*Facultad de Ciencias Experimentales*

Trabajo Fin de Grado

# **Efectos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos**

**Alumno: Álvaro Ordóñez Romero**

**Febrero, 2016**

## RESUMEN

Las radiaciones han existido mucho antes de que la especie *Homo sapiens* pisará por primera vez la Tierra, y tanto es así que ya existían radiaciones en los primeros compases de la existencia del universo.

Las radiaciones pueden **interaccionar** con la materia que se encuentran a su paso depositando ciertas cantidades variables de energía en la materia que son la causa de los **efectos** en la materia.

Los efectos producidos en la materia viva son los más importantes para nuestra protección y bienestar.

La **radiación** que es capaz de alterar los átomos y moléculas, y con ello las estructuras que constituyen la materia recibe el nombre de **radiación ionizante** y tiene efectos especialmente perjudiciales sobre los seres vivos.

La ciencia que se encarga de aplicar los métodos para medir y cuantificar las dosis absorbidas por la materia se llama **Dosimetría**, veremos lo complejo que puede llegar a ser hacer medidas fiables en organismos vivos, por otro lado, estudiaremos los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos a través de la **Radiobiología**, ambas ciencias son complementarias y analizaremos su campo de estudio.

Pero para todo ello es necesario adentrarnos en el mundo atómico de las interacciones de las distintas radiaciones con la materia y analizar detalladamente los tipos de radiaciones, así como sus **fuentes**, para lo cual hemos dedicado los primeros dos capítulos de esta obra.

**Palabras clave:** radiación, interaccionar, efectos, radiación ionizante, radiobiología, dosimetría, fuentes.

## **ABSTRACT**

The radiations have existed a long before the species *Homo sapiens* could appear for the first time on Earth, and so much it is so already radiations existed in the first compasses of the existence of the universe.

The radiations can **interact** with the matter that they find in front of them, depositing certain variable quantities of energy in the matter that they are the reason of the effects on the matter.

The **effects** produced in the alive matter are the most important for our protection and well-being.

The **radiation** that is capable of altering the atoms and molecules, and with it the structures that constitute the matter receives the name of **ionizing radiation** and has specially harmful effects on alive beings.

The science that takes the mission of applying the methods to measure and to quantify the doses absorbed by the matter is called **Dosimetry**, we will see the complex thing that can manage to be to do trustworthy measures on alive organisms. On the other hand, we will study the effects of the ionizing radiations on the alive beings across the **Radiobiology**, both sciences are complementary and we will analyze their field of study.

But for all this it is necessary to enter the atomic world of the interactions of the different radiations with the matter and to analyze in details the types of radiations, as well as their **sources**, for which we have dedicated the first two chapters of this work.

**Keywords:** radiation, interact, effects, ionizing radiation, radiobiology, dosimetry, sources.



# ÍNDICE

## PÁGINAS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1.– Justificación.....	1
1.2.– Objetivo.....	1
<b>2. GENERALIDADES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES</b>	
2.1.– Introducción.....	2
2.2.- Definición de radiación.....	2
2.3.-Tipos de radiación.....	3
2.3.1. - <i>Atendiendo a la naturaleza de la radiación</i>	
2.3.1.1. – <i>Naturaleza electromagnética.....</i>	3
2.3.1.2. – <i>Naturaleza corpuscular.....</i>	7
2.3.2. - <i>Atendiendo a la interacción con la materia .....</i>	8
2.3.2.1. – <i>Radiaciones no ionizantes.....</i>	10
2.3.2.2. – <i>Radiaciones ionizantes.....</i>	11
2.4.- Fuentes de radiación ionizante.....	11
2.4.1. – <i>Fuentes de radiación natural.....</i>	12
2.4.1.1. – <i>Fuentes de origen extraterrestre.....</i>	12
2.4.1.2. – <i>Fuentes de origen terrestre.....</i>	13
2.4.2. – <i>Fuentes de radiación artificial.....</i>	14
<b>3. INTERACCIÓN DE LAS RADIACIONES CON LA MATERIA.....</b>	<b>15</b>
3.1.– Procesos de frenado comunes en partículas.....	16
3.1.1. – <i>Ionización.....</i>	16
3.1.2. – <i>Excitación.....</i>	16
3.1.3. – <i>Radiación de frenado (Bremsstrahlung).....</i>	17
3.2.– Caracterización de las partículas $\alpha$ y $\beta$	
3.2.1. – <i>Poder de frenado.....</i>	17
3.2.2. – <i>Alcance.....</i>	18
3.3.– Interacción de las partículas $\alpha$ .....	18

3.3.1. – Poder de frenado.....	18
3.3.2. – Alcance.....	18
<b>3.4.–Interacción de las partículas <math>\beta</math>.....</b>	<b>18</b>
3.4.1. – Poder de frenado.....	19
3.4.2. – Alcance.....	19
3.4.3. – Retrodispersión.....	20
<b>3.5.– Interacción de los neutrones con la materia.....</b>	<b>20</b>
<b>3.6.– Interacción de los fotones con la materia.....</b>	<b>20</b>
3.6.1. – Efecto fotoeléctrico.....	21
3.6.2. – Efecto Compton.....	22
3.6.3. – Producción de pares electrón-positrón.....	23
<b>4. DOSIMETRÍA.....</b>	<b>23</b>
4.1.– Introducción.....	23
4.2.– Exposición y Dosis absorbida.....	24
4.3.– Dosis equivalente.....	25
4.4.– Dosis equivalente efectiva.....	26
<b>5. RADIOBIOLOGÍA.....</b>	<b>26</b>
<b>5.1.– Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.....</b>	<b>26</b>
5.1.1. – Mecanismo de producción.....	26
5.1.2. – Tipos de efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.....	28
<b>5.2.– Respuesta celular a las radiaciones ionizantes.....</b>	<b>29</b>
<b>5.3.– Radiosensibilidad celular.....</b>	<b>30</b>
<b>5.4.– Respuesta sistémica a las radiaciones ionizantes.....</b>	<b>33</b>
5.4.1. – Sistema hematopoyético.....	34
5.4.2. – Sangre.....	34
5.4.3. – Piel y sistema nervioso central.....	34
5.4.4. – Tracto gastrointestinal.....	35
5.4.5. – Ojos.....	35
5.4.6. – Sistema reproductor.....	35
5.4.7. – Ovarios.....	35
5.4.8. – Hígado, pulmón y riñón.....	35

5.4.9. – <i>Huesos y cartílago</i> .....	36
<b>5.5. – Respuesta orgánica total</b> .....	<b>36</b>
5.5.1. – <i>Síndrome de la médula ósea</i> .....	36
5.5.2. – <i>Síndrome gastrointestinal</i> .....	37
5.5.3. – <i>Síndrome del sistema nervioso central</i> .....	37
<b>5.6. – Efectos estocásticos somáticos</b>	
5.6.1. – <i>Carcinogénesis</i> .....	37
<b>5.7. – Efectos hereditarios</b> .....	<b>39</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>41</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>42-46</b>

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. – Justificación**

En las últimas décadas ha habido un drástico incremento en el desarrollo y utilización de la tecnología por parte de la población, lo que ha conllevado un aumento de la exposición a radiaciones en la sociedad.

Éstas han llegado a nuestros hogares, lugares de trabajo, incluso a nuestros bolsillos desde numerosos y diversos aparatos electrónicos, conviviendo así diaria y casi permanentemente con nosotros.

Este aumento significativo de la exposición a las radiaciones y dado el desconocimiento generalizado de buena parte de la población sobre interacciones de las radiaciones ionizantes con la materia, y en particular con organismos vivos provoca una situación de asociación por parte de la sociedad de peligro con radiación, sin más distinción, esta obra intenta dar coherencia, ordenar, simplificar y clarificar de forma sencilla, amena y eficiente los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos, arrojando un poco de luz a un tema realmente tan desconocido y que convive diariamente con nosotros.

Además, debido a que en el Grado de Biología no se profundiza en el área de la Física, la oportunidad de poder llevar a cabo este Trabajo Fin de Grado me permite adquirir nuevos conocimientos complementarios a Biología y reforzar los conocimientos en Física, y no sólo a mí como autor sino a cualquier otra persona que lea esta obra.

### **1.2. – Objetivo**

Conocer el *efecto real* de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos.

## **2. GENERALIDADES DE LAS RADIACIONES IONIZANTES**

### **2.1.- Introducción**

Las radiaciones cuando se encuentran con un medio material interaccionan con él apareciendo un flujo de energía hacia la materia que absorbe parte o totalidad de la energía de la radiación.

Hay radiaciones de muy distintos tipos, así por ejemplo dependiendo de su naturaleza una radiación puede estar formada por materia o en contraposición puede ser no material (Arsuaga, Garzón y Zubiaurre, 2004), además también hay distintos tipos de radiaciones que interaccionan de forma muy distinta con la materia, desencadenando diferentes procesos.

Es por todo ello que en los apartados siguientes vamos a analizar más detalladamente el concepto de radiación y a clasificar las radiaciones teniendo en cuenta dos de sus propiedades: su naturaleza y la forma en la que interaccionan con la materia.

### **2.2.- Definición de radiación**

Según la Real Academia Española (2014) la radiación se define como: “la energía ondulatoria o de las partículas materiales que se propaga a través del espacio.”

De esta definición se deduce que para que un ente físico sea considerado una radiación se tiene que cumplir:

- 1.- Que exista un transporte de energía de un lugar a otro del espacio.
- 2.- Qué dicho transporte se produzca a través de ondas o partículas.

Obviamente en esta definición está implícito el hecho de las diferentes naturalezas que puede tener la radiación: ondas electromagnéticas o partículas.

Las primeras son producidas por la combinación de campos eléctricos y magnéticos variables y no necesitan un medio material para propagarse (García y Roqué, 1990). Como su propio nombre indica, el transporte de energía en forma de ondas electromagnéticas tiene propiedades ondulatorias pero, además, y esto fue lo difícil de comprender durante muchos años, presenta propiedades corpusculares, cuando interacciona con la materia. A este doble comportamiento se le conoce con el nombre de dualidad onda-corpúsculo de las ondas electromagnéticas.

Por otro lado, que el movimiento de partículas materiales de un lugar a otro del espacio conlleva un transporte de energía es obvio: el movimiento de cualquier

partícula material lleva asociada una energía cinética (Ferrer,2015). Sin embargo, no es tan conocida la naturaleza ondulatoria de este transporte que se denomina dualidad onda-corpúsculo de la materia.

En definitiva, puesto que tanto las ondas electromagnéticas como las partículas materiales presentan propiedades ondulatorias en su movimiento y propiedades corpusculares en su interacción con la materia, podemos decir, de forma más simplificada, que ***la radiación es la energía ondulatoria que se propaga a través del espacio.***

Aunque el concepto dual de las ondas electromagnéticas y de la materia es un hecho bien conocido en el campo de la Física Cuántica y dado que esta memoria se presenta como trabajo de fin de grado de los estudios en Biología, analizaremos más detenidamente estas propiedades en el siguiente apartado de este capítulo.

### **2.3.-Tipos de radiación**

Aunque existen diferentes formas de clasificar las radiaciones atendiendo a diferentes propiedades de las mismas aquí nos vamos a centrar fundamentalmente en dos:

- 1.- Naturaleza de la radiación.
- 2.- Interacción con la materia.

En la primera de ellas analizaremos más en detalle la dualidad tanto de las ondas electromagnéticas como de las partículas materiales. Mientras que la segunda clasificación nos va a permitir distinguir las radiaciones ionizantes, objeto de estudio en esta memoria, de las no ionizantes.

#### ***2.3.1. - Atendiendo a la naturaleza de la radiación***

##### ***2.3.1.1. – Naturaleza electromagnética***

Es bien conocido que las ondas electromagnéticas transportan energía de un lugar a otro del espacio en forma de onda, lo que hace que entren dentro de la definición de radiación dada más arriba. En el vacío la velocidad de todas las ondas electromagnéticas es  $c \approx 300000$  km/s (Arsuaga et al., 2004), estando la longitud de onda,  $\lambda$  y la frecuencia,  $f$ , de una determinada onda electromagnética relacionada mediante la expresión:

$$c = \lambda f$$

Esto hace que existan ondas electromagnéticas desde frecuencias cercanas al cero ( $f \rightarrow 0$ ,  $\lambda \rightarrow \infty$ ) a frecuencias infinitas ( $f \rightarrow \infty$ ,  $\lambda \rightarrow 0$ ) dando lugar a lo que se conoce con el nombre del espectro electromagnético, (Fig. 1).

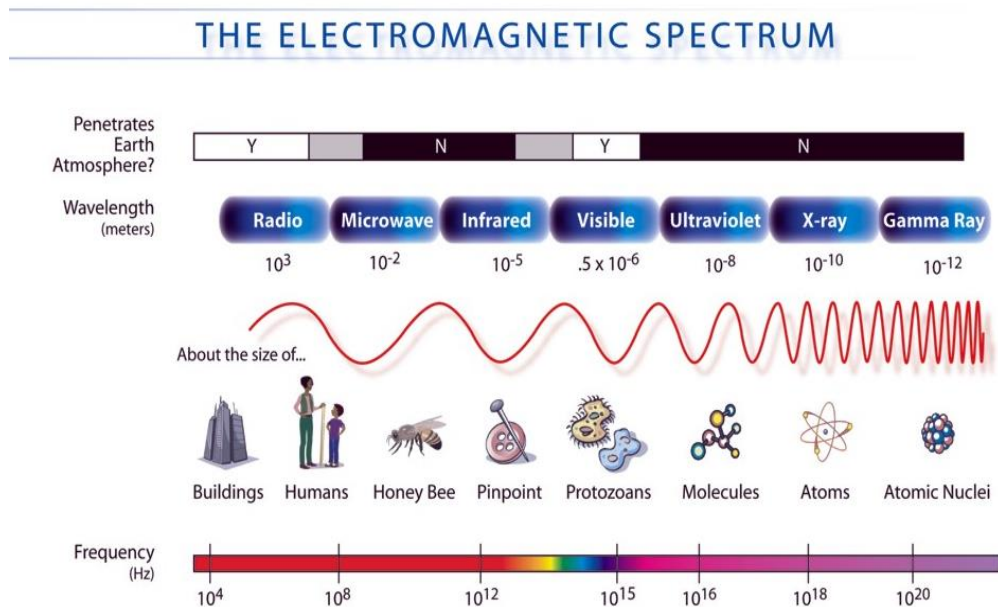


Figura 1. Espectro electromagnético.

A pesar de su naturaleza común, la forma de interacción de las ondas electromagnéticas con la materia hace que el espectro electromagnético pueda dividirse en diferentes partes.

Este hecho se debe a la relación de la longitud de onda con el tamaño de los distintos cuerpos, pues sólo cuando longitud y tamaño son similares se produce interacción entre ambas (Costa y López, 2007).

Así, longitudes de onda de  $10^{-2}$  metros, pertenecientes a microondas, interaccionan con entes de aproximadamente un tamaño similar a 1 cm, como puede ser una abeja, mientras que para longitudes del espectro superior como los rayos ultravioleta, en torno a  $10^{-8}$  metros, interaccionan con elementos de un tamaño cercano a 0,00001 mm, es decir, del tamaño de moléculas.

Es importante señalar que la división del espectro electromagnético se fundamenta en las distintas longitudes de onda asociadas a una determinada frecuencia, ambas propiedades son inversamente proporcionales, y están relacionadas como se verá más adelante con su

energía, característica, ésta última, muy importante en el comportamiento de las ondas electromagnéticas.

Lo que no es tan conocido es que a la hora de interactuar con la materia las ondas electromagnéticas presentan propiedades corpusculares.

Este descubrimiento, en el que participaron Planck, Einstein, Compton, etc, se realizó a principios del siglo XX en base a diferentes resultados experimentales que no se podían explicar considerando únicamente la naturaleza ondulatoria de las radiaciones electromagnéticas (Eisberg y Resnick, 1989).

Sin embargo se conocía una serie de fenómenos como la catástrofe ultravioleta o catástrofe de Rayleigh- Jeans, el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton, para los cuales, mediante hechos experimentales de la época, la Física clásica no tenía soluciones satisfactorias.

Los fenómenos para discernir más claramente la naturaleza corpuscular o material de las ondas son el efecto Compton y el efecto fotoeléctrico.

Para conservar el orden histórico comenzaremos con el fenómeno conocido como catástrofe ultravioleta o catástrofe de Rayleigh-Jeans (Eisberg y Resnick, 1989), los cuales propusieron la siguiente ecuación

$$I(\nu) = \frac{8\pi}{c^3} T k_B \nu^2$$

basada en el *Teorema de la equipartición* que se integra en la Física clásica, donde  $I(\nu)$  es la intensidad de la radiación para la frecuencia  $\nu$ ,  $k_B$  es la constante de Boltzmann ( $k_B \sim 1.38064852 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $T$  es la temperatura y  $c$  es la velocidad de la luz, dicho teorema postula que en equilibrio térmico la energía se distribuye en partes iguales entre sus posibles formas, con la ecuación de Rayleigh- Jeans se deduce una emisión de energía proporcional al cuadrado de la frecuencia, este hecho daba resultados experimentales satisfactorios en rangos de frecuencia bajos, sin embargo a frecuencias mayores cercanas al ultravioleta esta densidad de energía emitida es tan grande que tiende al infinito ( $E \rightarrow \infty$ ), y por lo tanto está comprometiendo la primera ley de la termodinámica, la ley de la conservación de la energía, es por lo que este fenómeno se conoce con el nombre de catástrofe ultravioleta o catástrofe de Rayleigh-Jeans.

Además si esto fuera cierto, todos los objetos deberían de emitir frecuencias pertenecientes al espectro visible, por lo que actuarían como fuentes de luz, y esto es falso. Posteriormente se realizaron hechos experimentales en el espectro de la luz visible y en el ultravioleta (Leite, 1978) que demostraron que en principio aunque ha bajas frecuencias la emisión de energía aumenta proporcionalmente al cuadrado de la frecuencia a partir de dichas frecuencias para cualquier temperatura la emisión de energía tiende a cero ( $E \rightarrow 0$ ).

De otro modo, el efecto fotoeléctrico es el cuál por el que ciertos metales, metaloides y las aleaciones expulsan electrones cuando son iluminados con una cierta luz adecuada (Jorba y Ortega, 1996a).

La física clásica en principio explicaba este fenómeno, ya que la luz transportaba energía, así que si teníamos el suficiente tiempo una luz con la intensidad que fuera, aunque esta fuese poco energética iluminando un metal, ésta energía sería acumulada por los electrones hasta que tuvieran la suficiente energía como para poder abandonar los átomos del metal.

Pero esta explicación no justificaba el siguiente hecho experimental (Arsuaga et al., 2004), cada material fotoemisor tenía una frecuencia mínima (frecuencia umbral,  $f_0$ ) por debajo de la cual por muy intensa que fuese la radiación, ni por mucho tiempo que estuviese incidiendo ningún electrón abandonaba el metal, por lo tanto, no importaba cuanta luz incidiera ni cuánto tiempo lo hiciera, si la luz no tenía una frecuencia mínima no tenía lugar el efecto fotoeléctrico.

Einstein expuso que la luz estaría formada por partículas luminosas llamadas fotones y cuya energía de cada fotón viene dada por la ecuación de Planck (Burcham, 2007),  $E = h \cdot f$ , donde E es la energía de cada fotón, h es la constante de Planck y f es la frecuencia, así que ahora se visualizaría como una partícula (fotón) chocando con el metal y transfiriéndole su energía, así para poder arrancar un electrón la frecuencia del fotón tenía una energía que debía ser igual o superior a la energía de enlace del electrón y poder arrancar este del metal, pero además si la energía era mayor no sólo se liberaría electrones del metal sino que estos lo harían con una cierta energía cinética dada por;

$$E_{c \text{ máx}} = h \times (f - f_0).$$

Con la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico y gracias especialmente a la teoría de Planck que le sirvió como punto de partida, se dio por zanjada y plenamente aceptada la dualidad onda-corpúsculo para luz y por lo tanto, para el espectro de las radiaciones electromagnéticas.

Por último señalar que en el caso del efecto Compton (Jorba y Ortega, 1996a) aún es más patente la naturaleza material de las ondas, pues en este fenómeno un fotón cuando choca con un electrón se dispersa cambiando de dirección, por ejemplo, una analogía a este fenómeno sería una pelota de tenis, que en nuestro caso sería un fotón, al lanzarla contra una pared, que sería el electrón, rebota y por lo tanto cambia de dirección, por lo que podemos visualizar que el fotón actuaría al igual que una pelota de tenis cambiando de dirección tras el impacto y con ello discerniendo por completo la naturaleza material de las ondas.

#### **2.3.1.2. – Naturaleza corpuscular**

En este tipo de radiación la energía que se transporta está relacionada, fundamentalmente, con la energía cinética de una partícula material.

Este hecho es tan fácil de visualizar cómo que cualquier cuerpo en movimiento cede parte o la totalidad de su energía cuando choca con otro, existiendo una transferencia de energía. Lo que no es tan claro, en este caso, es que ese transporte de energía se realice mediante una onda. En general, si queremos representar el desplazamiento de una partícula de un lugar a otro del espacio lo hacemos mediante una línea curva, que represente su trayectoria, pero no se nos ocurre dibujar una onda, Luis De Broglie fue el primero que en 1924 postula una doble naturaleza para los electrones.

En su Tesis Doctoral, *Recherches sur la théorie des quanta (Investigaciones sobre la teoría cuántica)*, usando los principios de la Física Cuántica y la teoría de la relatividad de Einstein le asoció a cada electrón una longitud de onda dada por la siguiente ecuación:  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \times v}$

donde h es la constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  J x s) y p (cantidad de movimiento) que es igual a la masa por la velocidad (De Broglie, 1963).

Posteriormente, este hecho fue experimentalmente comprobado en 1961 por Claus Jönsson que utilizó una variante del experimento de la doble

rendija, propuesto por Thomas Young en 1801, y obtuvo para un haz de electrones un patrón de interferencias propio de una onda (Eisberg y Resnick, 1989).

A continuación ilustramos el experimento que en 1961 realizó Jönsson. Se puede observar en la parte superior como los electrones al pasar por una primera lámina con una doble rendija se comportan al igual que ondas, revelando en la lámina final un patrón de interferencias, mientras que lo lógico sería pensar que la materia se comportara como habitualmente estamos acostumbrados a observarla y se revelarían sólo dos zonas de impactos, una por cada rendija, como se puede observar en la zona inferior de la imagen.

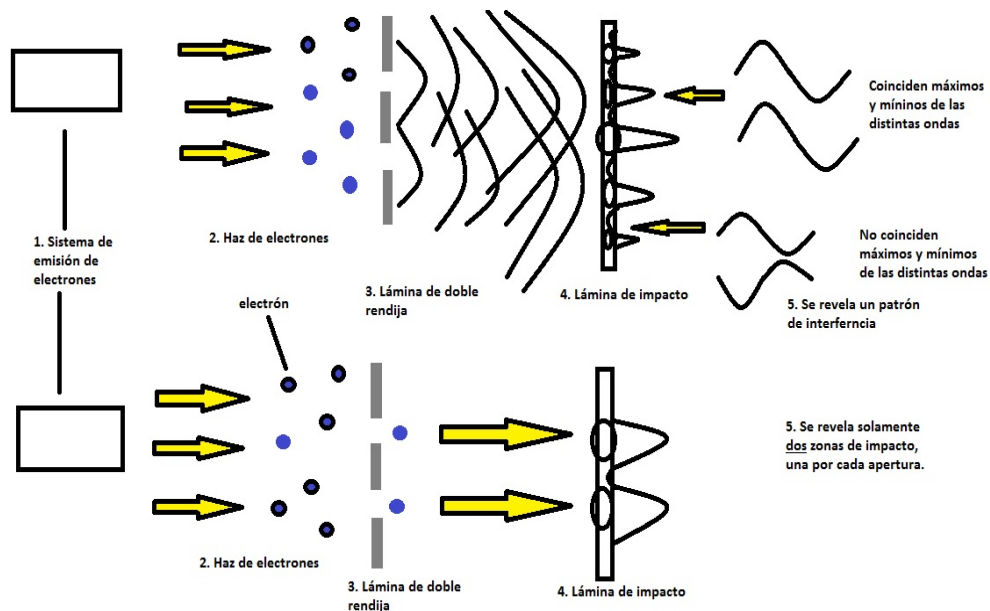


Figura 2. Experimento de Claus Jönsson.

Según esta ilustración (Fig.2) cualquier partícula material se mueve en realidad como una onda pero el valor de  $h$  ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s}$ ), es tan pequeño que la longitud de onda asociada a objetos materiales de tamaño cotidiano resulta indetectable. Esto explica, por ejemplo, porque somos incapaces de ver el comportamiento ondulatorio de una pelota de béisbol cuando la lanzamos, la masa es tan grande que tiene una longitud de onda que no podemos apreciar de ninguna forma.

### 2.3.2. - Atendiendo a la interacción con la materia

Como hemos visto en el apartado anterior además de poder clasificar la radiación atendiendo a su naturaleza corpuscular (material) o

electromagnética (no material) también podemos clasificarla atendiendo a su interacción con la materia. En este sentido una clasificación sería la típica división del espectro electromagnético que hemos visto en el apartado anterior.

Nosotros, sin embargo, vamos a clasificar las ondas electromagnéticas en dos grandes grupos: ionizantes, que serán el objeto principal de estudio de este trabajo, y no ionizantes.

A continuación vamos a detallar los conceptos necesarios para comprender mejor dicho fenómeno.

*La ionización es el proceso por el cuál un átomo pierde uno o varios electrones y la energía necesaria para arrancar un electrón de un átomo en estado fundamental y gaseoso es lo que se conoce como energía de ionización (Casabó,1996).* El fenómeno de la ionización va a depender de tres aspectos fundamentales: el tipo y la energía de la radiación y la materia con la cuál interacciona.

*La radiación que tiene suficiente energía como para poder ionizar los átomos de la materia cuando interacciona con ésta se le denomina radiación ionizante.*

*Por otro lado, la radiación no ionizante es aquella que no tiene la suficiente energía para ionizar la materia cuando incide en ella (Arsuaga et al., 2004).*

Como se desprende de estas definiciones el que un determinado tipo de radiación sea o no ionizante no depende únicamente de ella sino de la sustancia con la que esté interaccionando. Así, por ejemplo, la radiación de microondas es capaz de ionizar el aluminio y, por tanto, es ionizante para este material, pero no lo es para la materia viva, por lo tanto lo que nos atañe en los apartados siguientes es hacer una clasificación de radiaciones ionizantes o no ionizantes para la materia viva y no para la materia en general.

Señalar por último, que como se arroja de los conceptos anteriormente descritos y de la siguiente ecuación;  $E = h \cdot f$ , propuesta por Einstein en la explicación del efecto fotoeléctrico (Rodríguez y Cervantes, 2006) del apartado anterior, se deduce que la energía de una radiación es directamente proporcional a su frecuencia, así que las ondas electromagnéticas de mayor frecuencia son más energéticas que las ondas de menor frecuencia, y por lo

tanto es más probable que al interactuar con la materia arranquen electrones y que se produzca el fenómeno de ionización.

#### **2.3.2.1. – Radiaciones no ionizantes**

Las radiaciones no ionizantes son básicamente radiaciones electromagnéticas de baja frecuencia como ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible o radiación ultravioleta.

La interacción de las radiaciones no ionizantes con la materia viva puede clasificarse en dos tipos distintos, esta clasificación depende de si analizamos la interacción de las radiaciones con los electrones de los átomos que constituyen la materia, a nivel subatómico, o si por el contrario, analizamos dichas interacciones con el átomo o molécula como conjunto, a nivel atómico o molecular.

- 1) Nivel subatómico
- 2) Nivel atómico o molecular

A nivel subatómico el proceso que ocurre fundamentalmente es el fenómeno de excitación (Delgado, 2010), mediante el cual se produce interacción entre radiaciones electromagnéticas de baja frecuencia con los electrones que forman la materia, estos electrones pasan a un nivel energético superior pero cuando regresan a sus orbitales previos, esa diferencia de energía es emitida en forma de radiación electromagnética, en cualquier caso, de muy baja frecuencia, que nosotros percibimos en forma de calor. En el capítulo posterior analizaremos el fenómeno de excitación más detalladamente.

Por otro lado, a nivel atómico o molecular, podemos analizar dichas interacciones entre radiaciones electromagnéticas de baja frecuencia y moléculas como un aumento en las vibraciones de las moléculas que forman la materia, y que vamos a poder percibirlo como un aumento en la temperatura de la materia.

En ambos casos podemos comprender que el único fenómeno físico que producen las radiaciones electromagnéticas de baja frecuencia o no ionizantes es un aumento de la temperatura en la materia viva.

Por último destacar que la radiación ultravioleta pudiendo ser cuestión de debate por su inclusión o no dentro de las radiaciones ionizantes, señalar que la UV-B (290-320nm) y la UV-A (320-400nm) tienen capacidad

oncogénica, siendo la UV-B debido a su mayor energía, la que posee una capacidad oncogénica mayor, esto es debido a la formación de dímeros de pirimidina que da lugar a errores durante la transcripción cuando estos no son corregidos (Aguilar y Becerra, 2001), por lo tanto es posible dilucidar de lo anteriormente expuesto que en ningún caso se produce ionización en la materia viva, incluso la UV-C (200-290nm), la radiación ultravioleta más energética, tampoco es capaz de producir ionización, además hay que añadir el hecho de que este tipo de radiación no es capaz de atravesar la atmósfera.

Por consiguiente nosotros no incluiremos la radiación ultravioleta como ionizante para los organismos vivos.

#### **2.3.2.2. – Radiaciones ionizantes**

La Organización Mundial de la Salud (2011) las define como “La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma o rayos X) o partículas (partículas alfa y beta o neutrones)”.

Una forma de radiación ionizante muy importante es el proceso de desintegración de ciertos isótopos inestables que son capaces de transformarse o decaer a núcleos atómicos más estables, lo que se conoce como estado estacionario, al decaer se produce una liberación de energía, este proceso se conoce con el nombre de radiactividad y estos elementos reciben el nombre de radionucleidos (Tello, 2008).

Siguiendo la definición de la OMS las radiaciones ionizantes puede ser portadas en forma de ondas electromagnéticas como son los rayos X y los rayos gamma o en forma de partículas, en las que se diferencian las partículas alfa, beta y neutrones.

Se hicieron muchos experimentos (Sánchez del Río, 2015) para demostrar que los rayos  $\alpha$  son núcleos de átomos de Helio, los rayos  $\beta$  eran positrones o electrones, los neutrones partículas subatómicas que forman junto a los protones los núcleos de todos los elementos y los rayos  $\gamma$  y los rayos X radiación electromagnética.

#### **2.4. - Fuentes de radiación ionizante**

En este subapartado estudiaremos los distintos orígenes o fuentes de emisión de radiación ionizante. Luego los diferentes tipos de fuentes causantes de emisión

de radiación ionizante puede tener un origen natural (Desimoni, Errico y Montes, 2012), independiente a las actividades del ser humano, lo que llamamos fuentes de radiación natural, y por el contrario, tenemos una serie de radiaciones ionizantes con un origen artificial causadas por la actividad de los seres humanos que pueden producir un aumento a la exposición existente de las radiaciones por fuentes naturales y que se clasifican como fuentes de radiación artificial.

#### **2.4.1. – Fuentes de radiación natural**

Dentro de las fuentes de radiación natural podemos encontrar dos fuentes dependientes de su origen, así podemos dividir las fuentes de radiación natural en terrestres, cuando la fuente se encuentra en la Tierra o extraterrestre, cuando la fuente se encuentra fuera del planeta.

Pero aun siendo más concretos podemos diferenciar dentro de las fuentes de origen extraterrestre, la radiación cósmica, radiación procedente del cosmos, que está formada por partículas con gran energía, lo que recibe el nombre de radiación cósmica primaria, o procede de isótopos formados por la interacción de las radiaciones cósmicas con la atmósfera terrestre, lo que llamamos radiación cósmica secundaria (Chiron de la Casinière, 2008).

##### **2.4.1.1. – Fuentes de origen extraterrestre**

Los rayos cósmicos primarios se clasifican según el origen en dos: rayos cósmicos solares y rayos cósmicos galácticos.

Los rayos cósmicos solares llamados así porque se producen dentro del Sistema Solar.

Son producidos por el ciclo del Sol que es de 11 años por lo que su emisión hacia la Tierra es variable, por el contrario, los rayos cósmicos galácticos son las emisiones que proceden fuera del sistema solar.

Los rayos cósmicos solares son principalmente protones y partículas  $\alpha$ , estas oscilan con el ciclo solar y se producen máximos en erupciones solares violentas aunque es poco significativa la dosis que consigue llegar a la superficie terrestre debido a la baja energía de estas partículas.

Los rayos cósmicos galácticos son principalmente protones 90% y partículas  $\alpha$  de alta energía (Jorba y Ortega, 1996b). La intensidad media de este tipo de rayos ha sido constante durante millones de años.

Los rayos cósmicos primarios interaccionan con los elementos de la atmósfera dando lugar a la radiación cósmica secundaria formada por

nucleones (partículas formadas por neutrones y protones), piones, kaones y mesones (partículas formadas por quarks que constituyen los hadrones) y a nucleidos cosmogénicos, que se analizarán más adelante, la inestabilidad y la interacción de estas partículas da lugar a una radiación cósmica terciaria.

Tanto los nucleones como los mesones interaccionan nuevamente con la atmósfera y finalmente son atenuados, pero el comportamiento de estos es muy distinto entre ellos, así que mientras los nucleones son estables y pierden su energía principalmente por ionización, los mesones son muy inestables y producen pares electrón-positrón y electrones Compton que posteriormente debido a la radiación de frenado de los electrones origina nuevos fotones que daría lugar a reacciones en cascada.

Por lo tanto la reacción cósmica que llega a la superficie terrestre y que podemos observar es muy distinta de la naturaleza de los elementos iniciales que las originaron.

Antes de explicar los nucleidos cosmogénicos vamos a definir lo que se entiende en general por nucleido (Bulbulian, 1987), un nucleido es cada una de las posibles agrupaciones de los protones y los neutrones, como son los diferentes isótopos de un elemento.

Los nucleidos cosmogénicos como hemos mencionado anteriormente se producen por la interacción de los rayos cósmicos primarios con los elementos de la atmósfera dando lugar a otras especies nucleares algunas de ellas radiactivas.

Las más representativas son el  $^{14}\text{C}$  y el  $^3\text{H}$  que son elementos emisores de partículas  $\beta$  de energía baja.

#### **2.4.1.2. – Fuentes de origen terrestre**

La principal fuente son los radionucleidos primordiales, estos son nucleidos radiactivos, son aquellos radioelementos que estaban presentes en la formación de la Tierra y que su período de semidesintegración es lo suficientemente grande para llegar a nuestros días, por lo que su período de semidesintegración es 1010 años (Garzón, 1987). La dosis recibida en la superficie terrestre por estos radioelementos es muy semejante en toda la superficie, excepto en localizaciones específicas donde existen afloramientos de ciertos materiales especialmente radiactivos.

Principalmente la dosis que recibimos son de las cadenas radiactivas naturales encabezadas por el Torio ( $^{232}\text{Th}$ ) y el Uranio ( $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$ ), principalmente por el  $^{238}\text{U}$  pues su abundancia isotópica es mayor (Desimoni et al., 2012).

De otro modo existen ciertas actividades industriales que modifican la radioactividad natural normal recibida, por ejemplo la potabilización de aguas que conlleva una disminución de Ra y otros radioelementos presentes en el agua. La combustión de combustibles fósiles que son más bajos en  $^{14}\text{C}$  emite  $\text{CO}_2$  a la atmósfera con niveles  $^{14}\text{CO}_2$  más bajos que el  $\text{CO}_2$  presente en el aire y por lo tanto dando a una disminución de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera.

Otras actividades aumentan la exposición a las radiaciones naturales como volar en aviones por parte de la tripulación y pasajeros que aumenta la dosis recibida de rayos cósmicos al existir menor densidad de capa atmosférica que los proteja de la radiación (Baer, 2012).

#### **2.4.2. – Fuentes de radiación artificial**

La desintegración de radionucleidos llevado a cabo mediante reacciones nucleares a través de la tecnología creada por el hombre tales como reactores nucleares, explosivos nucleares o aceleradores de partículas, entre otros, son el origen de la radiación artificial principalmente (Radvanil, 1987), pero también hay equipos como los tubos de rayos X que pueden directamente producir radiaciones ionizantes.

Estas fuentes de radiación artificial se añaden a la ya existente radiación natural, aumentando las radiaciones ionizantes recibidas.

Tanto los reactores nucleares como los aceleradores de partículas son los únicos que producen productos radiactivos en cantidades significativas (Tanarro, 1986).

Los reactores nucleares son dispositivos que llevan a cabo en su interior reacciones controladas de fisión de núcleos en cadena que son bombardeados con neutrones de baja energía cinética que aumentan la probabilidad de fisión del núcleo, liberándose una gran cantidad de energía térmica.

Estos neutrones son moderados gracias a los llamados elementos moderadores que son materiales formados por núcleos ligeros, como el

grafito, agua natural, etc...al colisionar sucesivamente los neutrones rápidos con este tipo de materia son ralentizados.

En algunos reactores nucleares se utilizan materiales absorbentes cuando se tiene una alta reactividad de la carga inicial de combustible (Tanarro, 1970), estos materiales se llaman así porque absorben neutrones ralentizando el proceso de fisión en cascada, estos materiales absorbentes también reciben el nombre de veneno nuclear, pueden incluso llegar a parar la actividad del reactor, un ejemplo de este tipo de materiales es el  $^{135}\text{Xe}$ .

Si la energía térmica es utilizada para calentar agua y producir vapor que a su vez mueve una turbina y que mediante un alternador produce corriente eléctrica, este reactor de producción de energía se llama central nuclear.

Los aceleradores de partículas como su nombre indican aceleran partículas cargadas mediante campos electromagnéticos y permiten desarrollar tipos específicos de reacciones nucleares, son utilizadas en medicina, irradiar alimentos para su conservación, síntesis de radionucleidos así como para investigación básica.

Mientras que los productos radiactivos son en los reactores nucleares desechos indeseados en los aceleradores de partículas suele ser la obtención de estos isótopos radiactivos el objetivo principal.

Otras fuentes como explosiones nucleares y accidentes nucleares completan los principales orígenes de radiaciones artificiales.

### **3. INTERACCIÓN DE LAS RADIACIONES CON LA MATERIA**

La interacción con la materia es representativa de las radiaciones tanto electromagnéticas como corpusculares (Alcaraz y Sánchez, 2003). Las radiaciones al interactuar con los átomos que constituyen la materia pierden parte o totalidad de su energía que es absorbida por el medio material que atraviesan. Esta absorción de energía es la causante de los distintos efectos en la materia, entre otros, sobre la materia viva.

Tanto los métodos de medida como de detección de las radiaciones se basan en la interacción de las radiaciones con la materia. Es por ello muy importante conocer los principales mecanismos de interacción de las radiaciones con la materia, así podemos minimizar los riesgos de las radiaciones o poder incrementar los efectos nocivos en los casos que nos sea de utilidad.

En la primera parte de este capítulo analizaremos los mecanismos de pérdida de energía de las partículas cargadas en su interacción con la materia, así como veremos, posteriormente, con más detalle las características más importantes de la interacción de las partículas  $\alpha$  y  $\beta$  con la materia y el caso especial de los neutrones.

### **3.1. – Procesos de frenado comunes en partículas**

Cuando una partícula cargada penetra en un medio material se produce una interacción electromagnética con los átomos constituyentes de la materia y esto conlleva a una pérdida de energía por parte de la partícula hasta su final neutralización. Las interacciones pueden verse como colisiones de estas partículas con los electrones de los átomos que forman la materia y pueden ser de dos tipos; elástico e inelástico (Tipler, 1994).

Tipo elástico: la energía cinética total se conserva.

Tipo inelástico: la energía es absorbida por el átomo que se excita o se ioniza.

Las interacciones que neutralizan las partículas cargadas con la materia son fundamentalmente tres procesos (ionización, excitación, radiación de frenado), el mayor predominio de un proceso u otro depende del tipo de partícula, de su energía y del material que atraviesa.

#### **3.1.1. – Ionización**

Si las partículas que atraviesan el material colisionan inelásticamente puede transferir parte o totalidad de su energía a un electrón si esta energía es superior a la energía de enlace, el electrón puede escapar y se origina un catión y un electrón libre, lo que se conoce como par iónico (Wichmann, 1988), este proceso recibe el nombre de ionización, si el electrón a su vez tienen la suficiente energía puede interaccionar con otros electrones de otros átomos circundantes produciendo nuevas ionizaciones en lo que se conoce con el nombre de ionización secundaria.

#### **3.1.2. – Excitación**

En este proceso la partícula que interacciona con los electrones del átomo no es lo suficientemente energética y por lo tanto no es mayor a la energía de enlace del electrón pero esta energía transferida si es suficiente para que el electrón del átomo pase a un nivel energético mayor, si esto ocurre se le denomina proceso de excitación (Arsuaga et al., 2004). El átomo vuelve a su estado fundamental mediante la emisión de radiación electromagnética.

### **3.1.3. – Radiación de frenado (*Bremsstrahlung*)**

De acuerdo con la electrodinámica clásica, una partícula cargada y acelerada emite una radiación electromagnética, (Bush, 1971) cuando un electrón pasa cerca de un núcleo atómico se produce una interacción con él debido a la atracción del núcleo positivo y el electrón negativo, originando una deflexión en este último y por lo tanto la emisión de radiación y una consiguiente pérdida de energía. Este fenómeno fue hallado entre 1888 y 1897 por Nicola Tesla en su laboratorio cuando trabajaba con altas frecuencias.

## **3.2.–Caracterización de las partículas $\alpha$ y $\beta$**

### **3.2.1. – Poder de frenado**

Como hemos visto anteriormente una partícula cargada pierde su energía por ionización, excitación o radiación de frenado cuando interacciona con los átomos que constituyen la materia. Si las energías medias de ionización y excitación son pequeñas en comparación con la de la partícula cargada, ésta sólo perderá una pequeña cantidad de energía cinética en cada colisión, aún perderá menos energía cuando la partícula sea pesada, además teniendo en cuenta que el número de electrones es muy grande en un medio material, las interacciones de la partícula con los electrones es también elevado por lo que podemos considerar que la partícula cargada pierde energía de forma continua. Hasta el momento en que la partícula tenga poca energía cinética y empiezan a ser importantes los encuentros individuales, y es por ello que en este recorrido final de la partícula este modelo de pérdida de energía continuo deja de ser válido (Burcham, 2007). Para cuantificar la pérdida de energía de forma continua de una partícula se define el poder de frenado.

*El poder de frenado se define como la energía perdida por la partícula por unidad de longitud de su recorrido (Galindo y Pascual, 1989).*

En general podemos decir que la importancia del poder de frenado por excitación, ionización y radiación de frenado va a depender de la partícula, de su energía y de la materia en la que incide, por lo tanto el poder de frenado por excitación o ionización será alto para partículas cargadas pesadas como es el caso por ejemplo de las partículas  $\alpha$  y electrones de baja energía, mientras que la radiación de frenado será importante para electrones con alta energía.

### **3.2.2. – Alcance**

Para cualquier partícula cargada que incide en la materia, se define el *alcance* como *la penetración máxima en dicho medio material* (Jorba y Ortega, 1996a).

Las partículas pesadas, como las partículas  $\alpha$ , sufren pocas fluctuaciones al atravesar la materia debido a su elevada masa, y por lo tanto, su recorrido es prácticamente rectilíneo, coincidiendo así con su alcance. Es por ello, que para partículas iguales de la misma energía el alcance es prácticamente el mismo.

Sin embargo las partículas  $\beta$ , son partículas ligeras, que al atravesar un medio material sufren desviaciones al interactuar con los átomos y núcleos que constituyen la materia, dando lugar a recorridos con grandes fluctuaciones (González, 2004), por lo tanto, en este tipo de partículas ligeras el recorrido de la partícula no coincide con su alcance, así que incluso partículas idénticas con la misma energía presentan distintos recorridos, y por lo tanto diferentes alcances.

### **3.3. – Interacción de las partículas $\alpha$**

Las partículas  $\alpha$  interactúan con la materia por ionización en un 80%. Tienen un alto nivel de ionización del material que atraviesan pues pierden energía muy rápidamente, así que producen muchos pares de iones, la ionización específica (Burcham, 2007), ionización producida por unidad de recorrido de la partícula, aumenta a medida que la partícula  $\alpha$  penetra en el medio hasta un valor máximo poco antes de que finalice su recorrido.

#### **3.3.1. – Poder de frenado**

Las partículas  $\alpha$  son núcleos de Helio-4, por lo tanto, son másicas y pierden fundamentalmente toda su energía por colisiones con los electrones de los átomos que forman el material que penetra (Tipler, 1994), originando una gran cantidad de pares de iones.

#### **3.3.2. – Alcance**

Como son partículas con bastante masa su trayectoria es prácticamente rectilínea y la penetración en el material coincide con la longitud del recorrido.

### **3.4. – Interacción de las partículas $\beta$**

Las partículas  $\beta$  son electrones y positrones, partículas cargadas con muy poca masa, por lo tanto su interacción con la materia será mediante procesos de ionización, de excitación y especialmente de radiación de frenado.

### 3.4.1. – Poder de frenado

En las partículas  $\beta$  es especialmente importante la radiación de frenado o *bremsstrahlung*, ya que los electrones perderán la mayor parte de su energía a través de este fenómeno al interaccionar con los núcleos, con carga positiva, de los átomos que forman la materia. La importancia de la radiación de frenado frente a la ionización y excitación no sólo viene determinada por la energía de los electrones sino también por el número atómico (Z) del medio material en el que inciden. De forma aproximada mediante la siguiente ecuación (Jorba y Ortega, 1996a) se puede establecer la importancia relativa del poder de frenado mediante ionización/excitación en relación a la radiación de frenado.

$$r = \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{radiación}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ioni/exci}} \sim \frac{E(Mev)Z}{750}$$

Siendo E la energía medida en MeV, y Z, el número atómico.

Así por ejemplo podemos calcular el poder de frenado por ionización/excitación en relación a radiación de frenado para electrones de 6 MeV en el hierro (Z=26) y en el plomo (Z=82).

En el hierro:  $r = \frac{6 \times 26}{750} = 0.208$

En el plomo:  $r = \frac{6 \times 82}{750} = 0.648$

Se observa que el poder de frenado mediante radiación es más del doble en el plomo (54.7%) que en el hierro (20.8%).

### 3.4.2. – Alcance

El alcance de penetración de estas partículas cuando interacciona con una material es difícil de definir pues presenta numerosas fluctuaciones y no sigue un recorrido rectilíneo debido al proceso de frenado por radiación que tiene mucha importancia como hemos comentado antes en estas partículas, además en una emisión de haz de rayos  $\beta$  hay partículas con diferentes cantidades de energía y por lo tanto las más energéticas tendrán una mayor

penetración que las menos energéticas, pues necesitan un mayor número de encuentros antes de neutralizarse.

### **3.4.3. – Retrodispersión**

Las partículas  $\beta$  al atravesar un material pueden incidir sobre los núcleos atómicos de dicho material cambiando bruscamente de dirección (ángulo de dispersión) si el ángulo que forma es mayor a  $90^\circ$  se denomina retrodispersión (Galindo y Pascual, 1989).

La retrodispersión depende fundamentalmente de las propiedades del material y el espesor, así si el material está compuesto por átomos de  $Z$  elevados y es espeso será mucho mayor el número de partículas  $\beta$  retrodispersadas.

### **3.5. – Interacción de los neutrones con la materia**

Los neutrones no se suelen generar durante la radioactividad a no ser que se produzcan por fisión espontánea (Mataix y Rivadulla, 2002), al ser neutros no interaccionan con los demás elementos y tienen una capacidad de penetración muy alta, la formación de neutrones libres queda por lo tanto relegado casi exclusivamente a las reacciones nucleares, los neutrones por lo tanto no ionizan directamente y por lo tanto interaccionan con los núcleos que atraviesan por medio de fuerzas nucleares.

### **3.6. – Interacción de los fotones con la materia**

En este apartado veremos las radiaciones electromagnéticas X y gamma, así como el caso particular de su interacción con la materia.

Como todo sabemos los rayos X se producen por la transición entre dos estados energéticos de un átomo mientras que los rayos gamma se producen por la transición entre dos estados energéticos de un núcleo. Aunque ambas son radiaciones electromagnéticas la diferencia de una y de otra cuando interaccionan con la materia reside casi exclusivamente en la cantidad de energía de cada radiación (Alcaraz y Sánchez, 2003), como vimos en apartados anteriores las radiaciones electromagnéticas se pueden comportar con propiedades típicas de la materia, y por lo tanto igual que una partícula (corpúsculo), y estas partículas reciben el nombre de fotones.

Los fotones no pueden ionizar por sí mismos la materia, pues son partículas sin carga, pero si a través de electrones secundarios que liberan.

La energía de los fotones viene dada por:

$$E=h f$$

Donde h es la constante de Planck, que ya la hemos visto anteriormente, cuyo valor es  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J x s}$  y f es la frecuencia de dicha radiación.

Los fotones no pueden ionizar directamente a la materia pues son partículas sin carga, pero si mediante los electrones secundarios que se liberan.

Son tres los procesos de interacción de los fotones con la materia, el predominio de un proceso u otro dependerá de la energía del fotón, estos efectos ocurrirán con predominio de menor a mayor energía del fotón incidente en el siguiente orden: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares.

### **3.6.1. – Efecto fotoeléctrico**

El fotón incidente pasa la totalidad de su energía a un electrón de un átomo, convirtiéndose este en un fotoelectrón, este escapa con una energía cinética igual a la diferencia de las energías del fotón y de enlace (Fig.3).

Por ejemplo cuando un fotón con suficiente energía procedente de radiación X se encuentra con un electrón de capas cercanas al núcleo (capas k y L) es capaz de arrancarlo, este electrón absorbe la totalidad de la radiación y como hemos mencionado antes pasa a llamarse fotoelectrón, por lo tanto al dejar un orbital cercano al núcleo sin electrón, el electrón de la capa superior ocupará esa posición y a su vez el vacío que deja este será ocupado por otro electrón de la capa superior, y así sucesivamente, por lo tanto el átomo sufrirá una reordenación que le conlleva una des-excitación y emitirá una radiación secundaria en forma de rayos X (radiación X característica) que a su vez puede interaccionar con otros electrones liberándolos, este último fenómeno es lo que se conoce como electrones de Auger. Tanto el electrón liberado, como los rayos X o en su defecto los electrones de Auger son los responsables de los efectos ionizantes sobre la materia (Rodríguez y Cervantes, 2006).

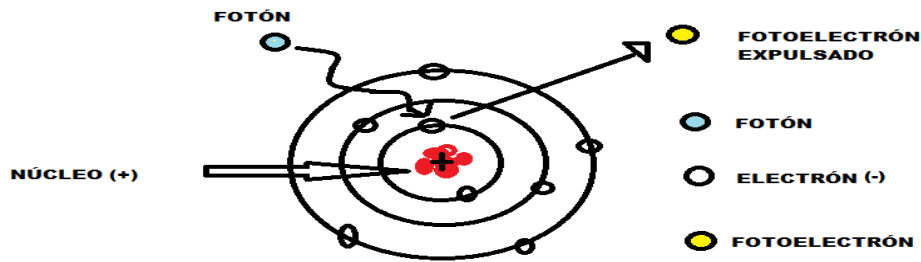


Figura 3. Efecto fotoeléctrico. Fotón incidiendo en un electrón cercano al núcleo y dando lugar a un fotoelectrón.

### 3.6.2. – Efecto Compton

Colisión elástica entre un fotón y un electrón, el fotón dependiendo del ángulo de dispersión queda con una longitud de onda distinta pero siempre mayor que la inicial, pues pierde energía después del encuentro con el electrón, por lo tanto a mayor ángulo de dispersión mayor longitud de onda. La energía pasa al electrón en forma de energía cinética, si esta es mayor que la energía de enlace el electrón quedará liberado (Fig.4), este proceso ocurre en los electrones de las capas más alejadas del núcleo donde su energía de enlace es menor (Cassini, Levinas y Pringe, 2013). La principal diferencia con el efecto fotoeléctrico es que en éste el electrón es absorbido y por lo tanto desaparece y toda la energía es transferida al electrón, mientras que en el efecto Compton el fotón sólo es dispersado y sólo una parte de energía es transferida al electrón.

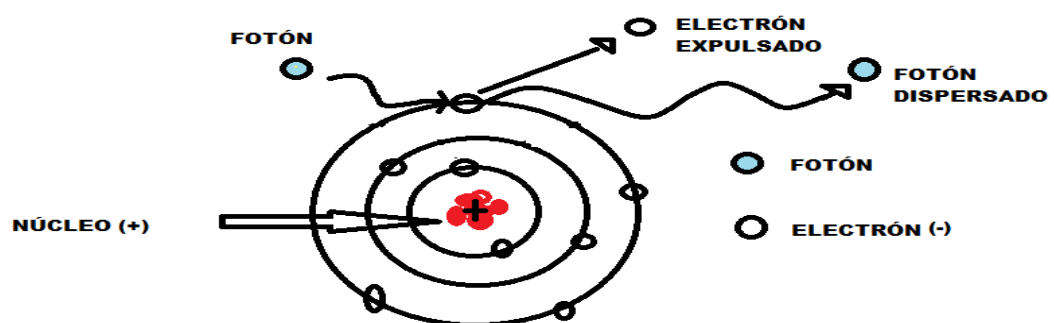


Figura 4. Efecto Compton. Fotón incidiendo sobre electrón alejado del núcleo y dando lugar a la expulsión del electrón del átomo y quedando el fotón dispersado en una longitud de onda mayor a la de origen.

### 3.6.3. – Producción de pares electrón-positrón

Consiste en la transformación de la energía de un fotón cuando interactúa con el núcleo de un átomo en la producción de un par electrón-positrón (Fig.5), este proceso recibe el nombre de materialización. Para que esto se lleve a cabo es necesario que el fotón tenga como mínimo una energía igual o superior a 1,022 MeV. La energía tiene que ser igual o superior a 1,022 MeV porque es igual a la masa del par electrón-positrón que se produce, por lo tanto a energías inferiores es imposible que se llevara a cabo el proceso de materialización (Burcham, 2007). Por ello la producción de pares sólo se lleva a cabo para fotones de muy alta energía, como por ejemplo los procedentes de los rayos gamma.

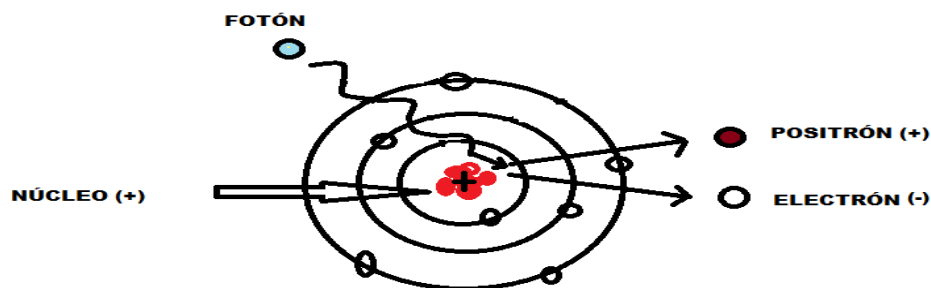


Figura 5. Producción de pares electrón-positrón. Fotón superior o igual a 1,022MeV interactuando en zonas cercanas al núcleo atómico y dando lugar a un positrón y un electrón.

## 4. DOSIMETRÍA

### 4.1.–Introducción

El uso de las primeras fuentes radiactivas en el campo científico puso de manifiesto la toxicidad de las radiaciones, así surgió la necesidad de conocer los efectos que estas tendrían sobre la materia y en especial sobre los organismos vivos. Por lo tanto, surgió la necesidad de medir y detectar las radiaciones para poder protegernos de ellas.

El estudio de las cuestiones anteriores son abordadas por tres disciplinas interrelacionadas: Dosimetría, Radiobiología y Protección Radiológica.

Los organismos internacionales más importantes encargados de estas tres disciplinas son:

ICRP (International Commission on Radiological Protection)

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)

ICRU (International Commission on Radiation Units)

ICRM (International Commission on Radiation Measurements)

La Dosimetría fija las unidades y magnitudes más adecuadas y se encarga de medir la dosis absorbida por la materia de radiaciones ionizantes tanto de manera indirecta como directa (Cura, Gayete y Pedraza, 2009).

Cuando una radiación ionizante incide sobre la materia parte o totalidad de la energía es absorbida por ésta, así dependiendo de la energía absorbida por la materia dependerán igualmente los efectos producidos, por lo tanto del daño biológico ligado a la capacidad de ionización surgen nuevos conceptos; exposición y dosis absorbida.

#### **4.2.–Exposición y Dosis absorbida**

El término exposición es una magnitud física que hace referencia a la ionización de una masa de aire seco en condiciones estándar, es decir, a 20°C y a 1 atmósfera. La unidad de medida es el Roentgen (R), que es la exposición necesaria para crear  $2.58 \times 10^{-4}$  C pares de iones en 1 kg de aire en condiciones estándar, por ello  $1R = 2.58 \times 10^{-4}$  C/Kg (Mirabent, 2009).

Inicialmente el Roentgen se utilizaba para medir los efectos que las radiaciones ionizantes producían sobre la materia, y en especial sobre la materia viva.

Cuando se estudió más profundamente la interacción de las radiaciones ionizantes con la materia, así como los distintos tipos de esta radiación, comprendieron que el Roentgen estaba limitado a los rayos X en una masa de aire, por lo tanto esta unidad de medida tenía claros inconvenientes, pues entre otros, sólo medía la formación de pares de iones en aire en condiciones estándar y no servía para la ionización de cualquier materia, no diferenciaba entre los distintos tipos de radiación, no diferenciaba en la interacción exclusiva de cada radiación ionizante con la materia como tampoco entre las diferentes energías que tiene cada radiación ionizante.

Esta serie de inconvenientes hace que no sea aplicable a otros tipos de radiación ni a otras materias.

Esto dio lugar a una nueva magnitud conocida como dosis absorbida, que es la energía depositada por las radiaciones ionizantes en cualquier medio. Su unidad de medida es el Gray (Gy), esta magnitud física es igual a 1Julio de energía depositada en 1 Kg de materia, por lo tanto  $1 \text{ Gy} = \text{J/kg}$  (Jorba y Ortega, 1996a), mencionar que en otras literaturas se puede encontrar en vez del Gy como

unidad de medida de la dosis absorbida el rad, pero se encuentra en desuso, de todas formas 1 rad es igual a la centésima parte de 1 Gy;  $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$ .

Con esta nueva unidad de medida si se tiene en cuenta la interacción de la radiación ionizante con cualquier tipo de materia, pero tiene un serio inconveniente, y es que no diferencia entre los efectos de los distintos tipos de radiaciones, pues no es igual 1Gy de rayos X que 1 Gy de neutrones, siendo este último mucho más nocivo, surge así una nueva magnitud, llamada dosis equivalente.

### **4.3.-Dosis equivalente**

La dosis equivalente mide los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los tejidos vivos. En principio los daños producidos en un sistema biológico por radiaciones ionizantes van a depender de la transferencia lineal de energía (LET), por lo que tenemos que distinguir entre los distintos tipos de radiación, a mayor energía depositada en el tejido mayor daño biológico, por lo tanto radiaciones con LET altas o muy altas producen daños más graves. En general partículas cargadas pesadas como partículas  $\alpha$  y neutrones tienen una LET alta, mientras que electrones rápidos y las radiaciones fotónicas tienen bajo LET.

Por otro lado, la distribución de energía es un factor muy importante, pues no es lo mismo que las radiaciones ionizantes lleguen a la piel o que sean capaces de atravesarla llegando a tejidos más vulnerables, así pues las radiaciones ionizantes más penetrantes son más perjudiciales que las superficiales (Borrás, 2009). Así como cada tipo de radiación ionizante para la misma energía depositada en un tejido tiene efectos muy distintos, surge el factor de calidad o de peso (WR) publicado por la ICRP, este es un parámetro que se aplica a las dosis de distintas radiaciones para evaluar y comparar entre sí los respectivos efectos.

La dosis equivalente se expresa en Sievert, también se usa el rem pero está en desuso,  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ .

Como se puede observar 20 Gy de rayos X tiene los mismos efectos biológicos que 1 Gy de neutrones de 1 MeV.

Pero la dosis equivalente tiene un inconveniente, no tiene en cuenta las diferentes estirpes celulares que forman un organismo vivo, ya que dependiendo de la estirpe celular será más o menos sensible a las radiaciones ionizantes, lo que nos da una nueva magnitud física, la dosis equivalente efectiva.

#### **4.4.–Dosis equivalente efectiva**

Es una magnitud física que al igual que la anterior también se mide en Sievert y en contraste con la anterior tiene en cuenta el tejido u órgano que reciba radiación ionizante, así surge un factor de peso específico ( $W_T$ ) para cada órgano o tejido, este factor es mayor para órganos más sensibles a las radiaciones (Cura et al., 2009). Tanto la dosis equivalente como la dosis equivalente efectiva es la utilizada para el control dosimétrico de los individuos expuestos a las radiaciones ionizantes, (Carlyle, 2013).

### **5. RADIOBIOLOGÍA**

Una vez comprendidos los apartados anteriores nos adentraremos en la radiobiología.

La radiobiología se encarga del estudio de los daños que producen las radiaciones ionizantes sobre la materia viva, los mecanismos de reparación de los tejidos frente a estos daños así como la funcionalidad final del tejido después de haberse producido la interacción con radiaciones ionizantes (Latorre, 1979).

#### **5.1.– Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes**

Son aquellas lesiones producidas exclusivamente por estas radiaciones en las personas.

La ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica) diferencia tres términos:

Cambio: después de la interacción materia viva-radiación ionizante se puede producir un cambio en la conformación molecular.

Daño: Anomalía estructural que puede llegar a lesión o no.

Lesión: efecto biológico producido por la radiación que puede ser transmitido a la descendencia o no.

##### **5.1.1. – Mecanismo de producción**

Cuando se produce una interacción entre las radiaciones ionizantes y la materia viva se produce una transferencia de energía hacia esta última. Esta interacción es al azar, por lo tanto se rige por dichas leyes y por lo tanto es un fenómeno de probabilidad.

Esta interacción dura  $10^{-17}$  a  $10^{-15}$  segundos.

La interacción por parte de las radiaciones ionizantes sobre la materia viva no es selectiva por lo que puede interaccionar sobre cualquier estructura de un organismo vivo (Jorba y Ortega, 1996b).

Si consideramos desde el punto de vista físico a la célula como un compartimento estanco podemos diferenciar claramente dos partes las macromoléculas que están en el interior (lípidos, proteínas...) y agua. Por lo tanto podemos clasificar en dos tipos la interacción de las radiaciones ionizantes con la materia; directa e indirecta que varían una de otra en la interacción de las radiaciones con las macromoléculas (interacción directa) o con el agua (interacción indirecta).

La absorción de energía por parte de la materia que forman los organismos vivos puede provocar excitación de los átomos o ionización. Frecuentemente cabe pensar que la excitación de los átomos produce menos alteraciones que la ionización y esto es así mientras que la energía de excitación sea menor que la energía de enlace entre los distintos átomos que forman las moléculas.

### **Por acción directa**

Las macromoléculas pueden ionizarse o excitarse.

Acción directa por excitación; se produce una interacción y con ello una absorción de energía por parte de la materia viva los electrones pasan a niveles energéticos superiores pero estas moléculas son inestables por lo que pueden volver a su estado de equilibrio mediante la emisión de fotones perdiendo así el exceso de energía, pero si la energía absorbida ha sido lo suficientemente intensa se puede romper un enlace covalente originando dos radicales libres con un electrón desapareado.

Acción directa por ionización; se produce por la pérdida de uno o más electrones originando una macromolécula anómala.

Tanto en la excitación indirecta por excitación como por ionización se va a originar radicales libres con electrones desapareados que son muy reactivos y extremadamente inestables y van a interaccionar con otras moléculas produciendo alteraciones, en ocasiones peligrosas para la salud.

### **Por acción indirecta**

Acción indirecta por excitación: Se rompe la molécula de agua y da lugar a dos radicales HO y H ambos con electrones desapareados.

Acción indirecta por ionización: La ionización produce HOH<sup>+</sup> y un electrón libre, este último reacciona con otra molécula de agua dando lugar a HOH<sup>-</sup>. Tanto el HOH<sup>+</sup> como el HOH<sup>-</sup> son inestables y se disocian en otros iones y radicales libres.

Los iones pueden originar de nuevo agua pero los radicales libres pueden interaccionar con otras moléculas produciendo modificaciones.

Veamos por lo tanto más detalladamente la formación de radicales libres.

La formación de radicales libres (Galle y Paulin, 2003) y su posible posterior reacción con el oxígeno provoca peróxidos, que son sustancias altamente tóxicas para el organismo, también los radicales libres pueden reaccionar con otras moléculas estables alterándolas y produciendo cambios en su funcionalidad. Es por ello que el efecto de los radicales libres y su facilidad de difusión hacen que los efectos de radiaciones puedan tener consecuencias en tejidos alejados de donde se produjo la interacción con estos. Existe la conjetura de que esta formación de peróxidos por radiaciones lleve a la muerte celular. La formación de radicales es sumamente rápida del orden de  $10^{-12}$  segundos.

#### **5.1.2. – Tipos de efectos biológicos de las radiaciones ionizantes**

Se clasifican en dos: somáticos y hereditarios.

Somáticos: cuando los efectos biológicos aparecen en el individuo irradiado.

Hereditarios: cuando los efectos biológicos aparecen en la descendencia.

Existe un período latente después de una exposición a las radiaciones ionizantes que es muy variable desde unos pocos minutos hasta varios días, así que este tipo de proceso será temprano o tardío mientras que los efectos biológicos hereditarios serán exclusivamente tardíos (Latorre, 1979).

##### *Efectos biológicos somáticos*

Los efectos biológicos somáticos a su vez se dividen en dos estocásticos o aleatorios y directos o deterministas

Estocásticos o aleatorios: donde la gravedad de los daños es independiente de la dosis, por lo tanto no hay umbral pero si existe una mayor probabilidad cuanto mayor es la dosis.

Directos o deterministas: donde existe un umbral por encima del cuál es seguro que existe un daño causado por la radiación y su gravedad es mayor cuanto mayor es la dosis recibida.

##### *Efectos biológicos hereditarios*

Los efectos hereditarios son estocásticos.

Sin embargo no existen efectos biológicos específicos producidos por la interacción con las radiaciones ionizantes, lo que hace difíciles distinguir este agente de otros que producen las mismas lesiones.

## **5.2. – Respuesta celular a las radiaciones ionizantes**

Existen tres respuestas a nivel celular frente a las radiaciones ionizantes. Muerte no mitótica, muerte reproductiva y retraso mitótico (Ortega y Jorba, 1996b).

**Muerte no mitótica**, la célula muere en interfase, sucede para radiaciones desde 0,5 Gy para linfocitos hasta 5Gy para otras células, por lo que en la mayoría de los casos la radiación debe ser bastante intensa. La hipótesis actual baraja la posibilidad de que se deba a una lesión mitocondrial irreparable aunque también podría ser un cambio en la permeabilidad de la membrana.

**Muerte reproductiva**, se produce cuando la célula es incapaz de replicarse, aunque en principio puede llegar a dividirse unas pocas veces finalmente es incapaz, se le considera como muerta sobre todo en los tejidos en los que existe un equilibrio entre células jóvenes y células que mueren por senescencia, se cree que se debe a lesiones en el material genético. Aparece a dosis bajas.

**Retraso mitótico**, aparece cuando la célula se encuentra en fase G2 más tiempo de lo habitual, pero finalmente pasa a la fase de mitosis, se produce a las dosis más bajas, se desconoce los mecanismos celulares que estarían alterados y que produciría este desfase.

Es importante recordar que el índice mitótico es la cantidad de células que se encuentran en mitosis respecto del total de un tejido o un cultivo celular. Si irradiamos un tejido con dosis muy bajas se produce un retraso mitótico que posteriormente entraran a la vez en mitosis junto a otras que no habían sido afectadas produciéndose una sobrecarga mitótica, por lo tanto esta primera irradiación podemos decir que actuaría como sincronizador.

En este caso el índice mitótico es superior al de preirradiación.

Si aumentamos la dosis el índice mitótico después de la sobrecarga mitótica será menor que el preirradiación pues muchas células habrán entrado en muerte reproductiva. Si aumentamos aún más la dosis no habrá sobrecarga mitótica porque muchas células habrán entrado en muerte reproductiva o mueren en interfase.

Los cambios morfológicos celulares se presentan generalmente en el núcleo tanto para dosis bajas como para dosis altas, siendo en estas últimas también característico la alteración de la estructura mitocondrial celular.

### **5.3. – Radiosensibilidad celular**

Como quedó demostrado experimentalmente por Bergonié y Tribondeau en 1906, las células indiferenciadas y que presentan una mayor actividad mitótica son más sensibles a las radiaciones que aquellas células diferenciadas y con un menor número de divisiones y por lo tanto, menor tensión biológica, por ejemplo la radiosensibilidad de células neoplásicas o tumorales es superior al tejido normal (Gil, 2010).

La única excepción a esta regla es el linfocito que es una célula madura que no se divide en circunstancias normales.

-Clasificación dependiente de la radiosensibilidad celular

#### *Radiosensibilidad muy alta*

- Células foliculares ováricas
- Células hematopoyéticas
- Espermatogonias
- Linfocitos
- Células del epitelio intestinal

#### *Radiosensibilidad alta*

- Células del epitelio esofágico
- Células del epitelio de la vejiga urinaria
- Células de la mucosa gástrica
- Células del epitelio epidérmico
- Células de las membranas mucosas

#### *Radiosensibilidad intermedia*

- Epitelio renal, hepático, pulmonar, tiroideo, pancreático, suprarrenal.
- Fibroblastos
- Osteoblastos y condroblastos
- Células endoteliales vasculares

#### *Radiosensibilidad baja*

- Células musculares
- Células sanguíneas
- Células maduras del cartílago

- Neuronas
- Células del tejido conectivo

Otra clasificación elaborada por *Rubin y Cassaret* establece la radiosensibilidad celular de acuerdo a la función, estirpe y la actividad mitótica de la célula, lo que la hace más práctica.

*Células intermitóticas vegetativas (VIM)*. Son las más indiferenciadas y las que presentan una actividad mitótica superior, son por lo tanto las más radiosensibles.

*Células intermitóticas diferenciadas (DIM)*. Son células más diferenciadas que las anteriores por lo que son menos radiosensibles.

*Células de tejidos pluripotenciales*. Tienen una radiosensibilidad intermedia, pertenecen a este grupo la mayoría de las células endoteliales que forman los vasos sanguíneos.

*Células postmitóticas reversibles (RPM)*. Son células que no se dividen aunque tienen la capacidad de hacerlo tienen una vida media larga y son bastante radioresistentes.

*Células postmitóticas fijas (FPM)*. No tienen capacidad de división y están totalmente diferenciadas las células del músculo estriado y las neuronas son un ejemplo de este grupo. Son las más radioresistentes.

### ***Radiosensibilidad condicional***

*Ancel y Vitemberg* complementaron la teoría de radiosensibilidad de las distintas estirpes celulares de *Bergonié y Tribondeau*.

En la radiosensibilidad condicional además de tener en cuenta el tipo de célula, así como su grado de diferenciación se contempla unos factores que modifican la respuesta celular. Los factores se pueden clasificar dependiendo de su naturaleza en físicos, químicos y biológicos.

#### ***Factores físicos que influyen en la respuesta celular***

Se refiere a las características de la radiación

Las características de la radiación van a ser decisivas en la respuesta celular obtenida, así para altas dosis de radiación se producen daños celulares si la tasa es baja puede dar tiempo a que los mecanismos de reparación celular puedan actuar y subsanar los daños, pero con una tasa mayor no va a dar tiempo suficiente para que los mecanismos celulares puedan subsanar los daños y existirá una mayor muerte celular, por el contrario a baja dosis y con una baja

tasa es mucho más probable que los daños sean muchos menores y además los mecanismos de reparación celular puedan reparar los daños ocasionados, este último mecanismo de fraccionar la radiación a bajas dosis es la base de la radioterapia.

Dependiendo de la radiación ionizante que interacciona con la célula podemos diferenciar entre varios tipos de radiaciones dependiendo de su transferencia lineal de energía (TLE), que es la energía depositada por la radiación ionizante en su interacción con la materia (Cura et al., 2009), así por ejemplo, los rayos X o los rayos gamma tiene baja TLE, mientras que los protones o neutrones tienen alta TLE, en general, las radiaciones electromagnéticas tienen baja TLE mientras que las radiaciones de partículas tienen alta TLE.

Por ello, como es lógico, las radiaciones de mayor TLE causan más daño en la materia viva.

La misma dosis de distintos tipos de radiación no producen los mismos efectos biológicos, por ejemplo los rayos X y los neutrones, un Gy de rayos X producen un daño menor que 1 Gy de neutrones, por lo tanto se define como eficacia biológica relativa a la dosis necesaria de una radiación en cuestión para que nos dé la misma fracción de supervivencia de un mismo tejido o cultivo celular comprándola con otra radiación conocida (rayos X).

#### *Factores químicos*

Hay compuestos químicos que pueden aumentar (radiosensibilizadores) o disminuir (radioprotectores) la radiosensibilidad, dentro del grupo de compuestos químicos que aumentan la radiosensibilidad encontramos el oxígeno, cuando el oxígeno está presente en la zona irradiada aparece una mayor muerte celular, debido a la formación de peróxidos al reaccionar con los radicales libres aunque también existe la teoría de que el oxígeno bloquea los mecanismos de reparación celular. Lo que sí está constatado es que una mayor presencia de esta molécula disminuye la fracción de supervivencia, el efecto es máximo a 20 mm de Hg y no aumenta con una presión superior.

Como radioprotectores destacan las aminas que poseen grupos sulfhidrilos, SH, su acción consiste en neutralizar los radicales libres y tienen que estar presentes cuando se produzca la irradiación (Rivera, 2010).

### *Factores biológicos*

Los factores biológicos se limitan a las distintas fases biológicas de la célula (Jorba y Ortega, 1996b), dependiendo en la fase que se encuentre será más o menos radiosensible.

Fase G2 y Fase M: Grado alto de radiosensibilidad.

Fase G1: Grado medio de radiosensibilidad.

Fase S: Grado bajo de radiosensibilidad.

Dentro de los factores biológicos se encuentran los factores ambientales que modifican la radiosensibilidad, la temperatura y la hidratación, una mayor hidratación produce un mayor aumento de radicales libres, así como la hipertermia produce una mayor radiosensibilidad.

### **5.4. – Respuesta sistémica a las radiaciones ionizantes**

Es la respuesta de un organismo vivo después de haberse producido una interacción con las radiaciones ionizantes, habiéndose producido daño o lesión sobre un órgano, tejido o estirpe celular.

Como hemos mencionado con anterioridad no existen unas lesiones características de las radiaciones ionizantes por lo que tampoco existirá una respuesta específica para estas.

La curación dependerá fundamentalmente del tipo de irradiación y del tejido en que se produce. En general tejidos formados por células con alta tasa mitótica y poco diferenciadas serán mucho más sensibles a la irradiación que células que se dividen poco y bien diferenciadas, el segundo factor más importante después de éste, es el factor físico, anteriormente mencionado, el tipo de radiación, así para radiaciones altas en TLE y cuanto mayor sea las tasas y la dosis se producirá más lesiones y más graves, y por lo tanto, más difícil su curación.

Podemos diferenciar entre dos mecanismos para subsanar los daños producidos; la regeneración y la reparación. Durante la regeneración se produce la sustitución de las células muertas del tejido por otras que se dividen y que no habían sido afectadas. Este tipo de mecanismo se observa en radiaciones bajas (0-1Gy) y la poseen tejidos que tienen células indiferenciadas (**DIM** o **VIM**). Sin embargo hay otro tipo de curación característica de células diferenciadas (**RPM** y **FPM**) que tienen poca o ninguna actividad mitótica, la reparación, en este tipo de mecanismos no hay posibilidad de regeneración así que el tejido parenquimatoso lesionado será sustituido por fibrosis (cicatriz) perdiendo así el órgano

dependiendo de la lesión su funcionalidad total o parcial. Se suele dar en irradiaciones altas (>10) y moderadas (1-10).

#### *Respuesta de distintos órganos a irradiación baja y fraccionada*

A continuación se va a detallar la respuesta de varios órganos a la irradiación baja y fraccionada, los datos son obtenidos de muchos pacientes que desgraciadamente han tenido que verse sometidos a radioterapia (Jorba y Ortega, 1996b).

##### **5.4.1. – Sistema hematopoyético**

La médula ósea está formada por células **DIM** y **VIM** y por lo tanto muy radiosensibles, por lo que para dosis bajas se dará lugar a la depresión del sistema por muerte de los eritroblastos (dan lugar a los eritrocitos), los mieloblastos y los megacarioblastos, siendo los eritroblastos los más radiosensibles, se puede llegar a una pérdida total de células hematopoyéticas dando lugar a una aplasia medular y a una fibrosis generalizada en la médula.

##### **5.4.2. – Sangre**

En la sangre se refleja los daños producidos en la médula ósea, para dosis muy bajas se produce la muerte de los linfocitos, las plaquetas y los hematíes, al encontrarse las células de la médula ósea en muerte reproductiva o muerte no mitótica no se puede proceder a la regeneración por medio de nuevas células, poniéndose la vida del paciente en peligro ya que se está llevando a cabo una depresión del sistema inmunológico, una menor oxigenación tisular (hipoxia), y un menor número de plaquetas que puede dar lugar a hemorragias no controlables.

##### **5.4.3. – Piel y sistema nervioso central**

La piel es el órgano que mayores dosis soporta junto con el sistema nervioso central, las células más sensibles de la piel son las células **VIM** de la capa basal germinal que sustituyen a las células más superficiales que se pierden por descamación. En la piel se suele producir un enrojecimiento de la piel por vasodilatación (eritema) acompañado de edema subcutáneo para dosis de 10Gy. Se necesitan dosis de 50Gy para producir necrosis y ulceraciones. El folículo piloso es el más radiosensible junto con las glándulas sebáceas 3-5Gy se produce alopecia temporal por encima de esta irradiación a 7Gy se produce alopecia permanente.

Los daños producidos en el sistema nervioso central originan lesión vascular cerebral y son siempre a dosis altas, pues son células **FPM**. La dosis se encuentra entre 15-30 Gy.

#### **5.4.4. – Tracto gastrointestinal**

La capa basal germinal del tracto está formada por células del tipo **VIM** y por lo tanto son muy radiosensibles, originando en la mucosa úlceras, edemas y hemorragias. Cuando se produce la curación de una úlcera se hace por fibrosis, originando una cicatriz y dando lugar a estenosis y a obstrucciones intestinales tardías.

#### **5.4.5. – Ojos**

En los ojos se origina por irradiación la formación de cataratas por la muerte de las células endoteliales que forman la capa anterior del cristalino (células **VIM**) y que son muy radiosensibles, es una lesión que aparece después de seis meses de la irradiación. La edad es un factor crítico, siendo a edades más tempranas el daño mayor.

#### **5.4.6. – Sistema reproductor**

En los testículos las espermatogonias (**VIM**, **DIM**) son muy radiosensibles para dosis bajas se produce esterilidad temporal, para dosis de 2Gy/año o 3,5-6Gy se produce esterilidad permanente. No se produce una disminución en la testosterona ya que las células intersticiales son menos radiosensibles.

En los ovarios dosis moderadas pueden producir esterilidad, falta de estrógenos, atrofia y disminución drástica de otras hormonas femeninas.

#### **5.4.7. – Aparato cardiovascular**

La irradiación afecta principalmente a la permeabilidad de las células endoteliales de los vasos que conlleva a la formación de edemas y hemorragias. El proceso inicial de la lesión en el endotelio conllevará la formación de un coágulo que dará lugar a trombos y obstrucción de los vasos con la consiguiente muerte del tejido por falta de oxígeno. La reparación de los vasos origina hipertrofia de la pared vascular dando lugar a estenosis y un flujo sanguíneo insuficiente que más tarde da lugar a fibrosis en el tejido. El corazón y grandes vasos sólo se ven afectados a dosis altas.

#### **5.4.8. – Hígado, pulmón y riñón**

Las células que forman estos órganos son distintas pero su radiosensibilidad es muy semejante, están formados por células **RPM** y los daños provocados

por la irradiación viene determinados por los daños en los vasos capilares. La reparación de estos órganos se hará por fibrosis, así que dependiendo de la gravedad y la extensión del daño en el órgano se puede llegar a insuficiencia hepática, insuficiencia respiratoria crónica o insuficiencia renal crónica.

#### **5.4.9. – Huesos y cartílago**

En niños y adolescentes la irradiación sobre estos tejidos es más dañina pues afecta a células como osteoblastos y condroblastos que son células **DIM**, pudiendo afectar el crecimiento, en adultos los efectos están provocados por lesiones en los vasos y una insuficiencia de irrigación que conlleva a una falta de oxígeno y finalmente a necrosis, este hecho puede producir que si el hueso en cuestión tiene que soportar alguna fuerza pueda con más facilidad fracturarse debido a su debilitamiento estructural.

### **5.5. – Respuesta orgánica total**

La respuesta orgánica total son los síntomas que se produce tras una irradiación aguda en todo el organismo.

La dosis letal para los humanos es de 50/60, lo que quiere decir que el 50% de los adultos morirán en 60 días con una dosis de 3-5 Gy.

Esta respuesta tiene tres fases bien diferenciadas que por orden de aparición son la fase prodrómica, fase latente y fase de enfermedad manifiesta.

La primera fase se desarrolla para dosis bajas es la primera en aparecer y se conoce con el nombre de NVD que hace referencia a los procesos característicos de esta fase, náuseas, vómitos y diarreas. También pueden aparecer cuadros neuropsicológicos, insomnio, cefaleas, etc. Aparece a dosis de 0,5 Gy.

Si la dosis es superior a 1Gy se da lugar entonces las tres fases: en la segunda fase, la fase latente se caracteriza por su asintomatología, sin embargo aunque el enfermo no presenta síntomas en los tejidos siguen progresando las lesiones hasta que se hacen evidentes. Los datos obtenidos son exclusivamente de accidentes nucleares por lo que los tiempos que nos refiramos a continuación son aproximaciones.

Se clasifican dependiendo del sistema que tenga síntomas más manifiestos en tres síndromes: Síndrome de la médula ósea, Síndrome gastrointestinal y Síndrome del sistema nervioso central (Jorba y Ortega, 1996b).

#### **5.5.1. – Síndrome de la médula ósea**

*Fase prodrómica:* aparece en unas horas.

*Fase latente:* dependiendo de la dosis entre unos pocos días y tres semanas.  
*Fase de enfermedad manifiesta:* Aparece una depresión generalizada de todas las células de la médula ósea, existe una mayor probabilidad de infección por cualquier agente patógeno debido a la disminución de glóbulos blancos y linfocitos, mayor riesgo de hemorragias y una disminución en el número de glóbulos rojos. Las hemorragias acentúan aún más la anemia. La fecha límite para sobrevivir está en la quinta semana si el paciente empieza a regenerar la médula quizás pueda sobrevivir, por el contrario el desenlace será mortal. Se requiere de trasplante de médula ósea así como de transfusiones de sangre completas.

#### **5.5.2. – Síndrome gastrointestinal**

*Fase prodrómica:* se inicia pasadas sólo unas horas es muy violenta.

*Fase latente:* entre el segundo y el quinto día.

*Fase de enfermedad manifiesta:* se producen diarreas y vómitos que no se pueden detener con ningún tratamiento actual, se acompaña con fiebre muy alta. Se debe a la radiosensibilidad de las células de la mucosa intestinal se producen úlceras, hemorragias y finalmente perforaciones que producen peritonitis, el paciente muere por septicemia entre el tercer día y el décimo cuarto después de la exposición.

#### **5.5.3. – Síndrome del sistema nervioso central**

*Fase prodrómica:* se inicia en el instante y dura escasos momentos.

*Fase latente:* algunas veces pasa desapercibida, en el mejor de los casos dura unas horas.

*Fase de enfermedad manifiesta:* se produce una intensa hipertensión intracraneal por los edemas producidos por los vasos sanguíneos, se manifiesta alrededor de 4 horas después de la interacción con la radiación inicial, se produce ataxia, convulsiones y coma, después del coma y pasados de 1 a 5 días el paciente muere.

### **5.6. – Efectos estocásticos somáticos**

#### **5.6.1. – Carcinogénesis**

El único efecto estocástico somático comprobado en el hombre es el cáncer. Las radiaciones ionizantes actúan como inductores de tumores tanto benignos como de otros de carácter maligno, se empezó a sospechar tras ver el aumento de ciertos colectivos que trabajaban cerca de fuentes de radiación

ionizante, posteriormente se comprobó que para dosis altas por encima de 1Gy se producía un aumento del número de tumores en comparación con el resto de la población (Pérez, 2010).

El mecanismo por el cuál la radiación induce la formación de tumores se desconoce y este puede ser de cualquier tipo, puede ser el mismo mecanismo inducido por otro agente biológico, químico o físico. Las mutaciones somáticas en el ADN inducidas por cada Gy se estiman en 105. Se conoce que 1 de cada 4 personas mueren de cáncer, y que de esta proporción sólo una pequeña fracción de las muertes por tumores corresponde a la inducción por radiaciones. Los tumores producidos por radiación siempre tienen un período de latencia largo. La probabilidad de sufrir un cáncer radioinducido aumenta con la dosis altas, superior a 0,2Gy, a dosis bajas es muy difícil comprobar si las radiaciones inducen la aparición de tumores pues se compara con población no irradiada con pacientes que están sometidos a radioterapia y por lo tanto previamente no sanos, además existen otros agentes físicos, químicos y biológicos propiamente carcinogénicos.

Actualmente no hay bases cuantitativas para conocer la aparición de tumores a bajas dosis de radiación y por lo tanto aún hoy se sigue extrapolando de estimaciones efectuadas para altas dosis (Real, 2010).

Según en las últimas comprobaciones de los afectados por las bombas de Hiroshima y Nagasaki cuando la dosis es superior a 0,2 Sv se produce un aumento significativo de tumores en la población (Ortega y Jorba, 1996b), para dosis inferiores es insignificante y por lo tanto no concluyente.

Hay distintos factores que influyen en el aumento o disminución de aparición de tumores; el tipo de radiación, la edad o el sexo.

### ***Tipo de radiación (carcinogénesis)***

Las radiaciones de alta TLE aumentan el riesgo de aparición de cáncer. Tasa bajas de alta TLE contribuyen a un mayor riesgo carcinogénico que una única dosis de alta TLE. Experimentalmente se han descrito agentes químicos que influyen en el aumento de la inducción de tumores por parte de las radiaciones como el aceite de crotón, opuestamente existen otros agentes que lo disminuyen como la vitamina A.

### **Edad**

La edad es muy importante en los individuos irradiados para padecer un mayor riesgo carcinogénico, siendo mayor en los individuos más jóvenes. Los niños menores de 10 años irradiados a 1Gy tienen una probabilidad más alta de muerte por cáncer que los adultos.

### **Sexo**

El sexo también tiene un papel fundamental existiendo una mayor incidencia en mujeres que en hombres, excepto para la leucemia. Las mujeres son más susceptibles al cáncer de mama y tiroides que los hombres pero también son las mujeres en condiciones naturales más susceptibles a estos tipos de tumores, quizás por factores hormonales.

Los últimos estudios demuestran que existe un mayor número de muertes de mujeres por tumores que de hombres, concretamente un 20% más de mujeres.

### **5.7.– Efectos hereditarios**

Cuando las radiaciones ionizantes inciden sobre las gónadas de un individuo pueden dañar el contenido genético de los gametos, si esta alteración es lo suficientemente grave el gameto muere, sin embargo si la alteración producida en el gameto no es lo suficientemente grave como para producirle la muerte, el gameto puede llevar a cabo el proceso de fecundación y transmitir las anomalías genéticas al nuevo individuo en forma de mutaciones cromosómicas o genómicas.

Dependiendo de la gravedad de las mutaciones se puede ver afectada la viabilidad de los descendientes.

Los efectos hereditarios son estocásticos y por lo tanto la gravedad de la lesión no va a depender de la dosis, no así la probabilidad para que ocurra dicho acontecimiento que aumenta con la dosis.

Hay que tener en cuenta que la radiación ionizante no origina nuevas mutaciones, sino que aumenta el número de las ya preexistentes, espontáneas o inducidas por otros agentes (Pérez, 2010).

Tanto altas tasas como radiaciones de alta TLE tienen una mayor capacidad mutagénica. Por lo tanto tenemos que tener en cuenta que las radiaciones no producen nuevas mutaciones.

Además tenemos que añadir el hecho de que las mutaciones provocadas por las radiaciones ionizantes en las células germinales son prácticamente indistinguibles de las mutaciones originadas espontáneamente (Jorba y Ortega, 1996b). Como consecuencia esto origina un problema en los diversos estudios que se realizan en las poblaciones, generalmente en poblaciones humanas, conocer el grado de implicación directa de las radiaciones ionizantes sobre las células germinales, excluyendo al resto de factores ajenos a las propias radiaciones que pueden alterar los resultados.

Por ello, es difícil tomar medidas directas de los efectos hereditarios producidos por radiaciones ionizantes, sin embargo es inequívoca la relación entre el tiempo de exposición a las radiaciones ionizantes y el aumento en la probabilidad de sufrir efectos hereditarios.

## 6. CONCLUSIONES

Con todo lo anteriormente mencionado tenemos que considerar:

**Primero:** Las radiaciones ionizantes en los seres vivos quedan restringidas a rayos X y rayos gamma, respecto a radiación electromagnética, y a partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  y neutrones, coincidiendo por lo tanto con la OMS.

**Segundo:** Aparatos electrónicos o dispositivos como smartphones, routers, microondas, teléfonos inalámbricos, transformadores, torretas de telefonía móvil, etc *no* pueden provocar efectos ionizantes en los seres vivos, pues las radiaciones producidas por estos aparatos, no tienen la suficiente energía para poder ionizar la materia viva.

**Tercero:** Las radiaciones ionizantes son inductoras de tumores, en contra de la creencia popular, no originan nuevas mutaciones, exclusivamente ponen de manifiesto las ya preexistentes, y los efectos somáticos estocásticos son las más difíciles de predecir pues no presentan dosis umbral.

**Cuarto:** La parte de la sociedad más sensible a las radiaciones ionizantes, incluso a las menos energéticas, son los niños, como hemos visto las células indiferenciadas son las más sensibles junto a los linfocitos, por ello debe ser esta parte de la población la menos expuesta a este tipo de radiaciones.

**Quinto:** El Gobierno podría aumentar la difusión de información entendible y amena a la sociedad de las verdaderas repercusiones de las radiaciones ionizantes para que la población pueda ser capaz de diferenciarlas de las radiaciones no ionizantes, así se evitaría el miedo irracional al uso de ciertos productos que en principio producen radiaciones no ionizantes y se confunden con los efectos de las radiaciones ionizantes.

**Sexto:** Creación de normativas que regulen la edificación de nuevas urbanizaciones en localizaciones donde existan afloramientos de elementos radiactivos, ya que puede suponer una intensificación natural de radiaciones ionizantes para los nuevos inquilinos de la casas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, J., y Becerra, M. M. (2001). Radiación ultravioleta y cáncer de piel. Consejos preventivos. *Radiobiología*, 1(2), 15-17.
- Alcaraz, M., y Sánchez, R. (2003). Interacción de la radiación con la materia. En F.G. Graf (Ed.), *Bases físicas y biológicas del radiodiagnóstico médico*. (pp. 23-32). Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Alfonseca, M. (1998). *Diccionario Espasa. 1000 grandes científicos*. Madrid, España: Espasa-Calpe.
- Alonso, A., Barrachina, M., Caro, R., Cerrolaza, J.A., Granados, C., López, M., et al.. (1973). *Léxico de términos nucleares*. Madrid, España: JEN.
- Alpen, E. (1998). *Radiation biophysics*. San Diego, Estados Unidos: Academic Press.
- Amis, M. (2005). *Los monstruos de Einstein*. Barcelona, España: Minotauro.
- Arsuaga, J.M., Garzón, B., y Zubiaurre, S. (2004). *Química*. Madrid, España: Anaya.
- Baer, C. (2012). *Plan de Negocio de Dosimetría Personal*. Barcelona, España: Editorial Académica Española.
- Barceló, M. L., Cara, M., y Martínez, E. (2010). Riesgos asociados a los distintos tipos de radiación. *Radiobiología*, 10, (1-2), (220-224).
- Batalla, M. (2009). Irradiación corporal total en trasplante de precursores hematopoyéticos. *Radiobiología*, 9, (1), (194-199).
- Beltrán, J. (1977). *Ley periódica y sistema periódico de los elementos de Mendeleiev*. Barcelona, España: Reverté.
- Borrás, C. (2009). Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. (FMC) *Formación médica continuada en atención primaria*, 19, (2), (68-77).
- Buker, J. (1999). *Física, la naturaleza de las cosas*. México DF: International Thomson Editores.
- Bulbulian, S. (1987). *La Radiactividad*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Burcham, W.E. (2007). *Física Nuclear*. Barcelona, España: Reverté.
- Bush, R. (1971). Las leyes de la conservación de la mecánica. En W.A. Benjamin (Ed.), *Estructura de la materia*. (pp. 41-59). Barcelona, España: Reverté.

- Carlyle, S. (2013). *Manual de Radiología para técnicos. Física, biología y protección radiológica* (10mo ed.). Barcelona, España: Elsevier.
- Casabó, J. (1996). *Estructura atómica y enlace químico*. Barcelona, España: Reverté.
- Cassini, A., Levinas, L., y Pringe, H. (2013). Einstein y el efecto Compton. *Scientiae Studia*, 11, (1), (5-38).
- Chiron de la Casinière, A. (2008). *La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera*. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.
- Costa, J., y López, F. (2007). *Interacción electromagnética. Teoría Clásica*. Barcelona, España: Reverté.
- Cramer, H. (1968). *Teoría de probabilidades y aplicaciones*. Madrid, España: Aguilar.
- Crouch, S., Holler, J., y Skoog, D. (2008). *Principios de análisis instrumental*. México: Cengage Learning Latin America.
- Cura, J. L., Gayete, P., y Pedraza, S. (2009). *Radiología esencial*. Madrid, España: Médica Panamericana.
- De Broglie, L. (1949). *Ondas, corpúsculos y mecánica ondulatoria*. Madrid, España: Espasa-Calpe.
- De Broglie, L. (1963). *Recherches sur la théorie des quanta: Réédition du texte de 1924*. California, Estados Unidos: Mason.
- Delgado, J. (2010). *Fisicanova. Una aproximación a la realidad*. Bucaramanga, Colombia: Fisicanova.
- Desimoni, J., Errico, I., y Montes, M.L. (2012). *Radioactividad en el medio ambiente*. Barcelona, España: Editorial Académica Española.
- Díaz, C. (2004). *Física: Mecánica, Termodinámica, Electromagnetismo, ondas. Física cuántica y nuclear*. Madrid, España: Mc-Graw-Hill.
- Eisberg, R., y Resnick, R. (1989). *Física cuántica*. México: Limusa.
- Feinberg, G. (1986). *Claves ciertas: física cuántica, biología molecular y el futuro de la ciencia*. Barcelona, España: Salvat.
- Fernández, J. (2009). *El universo de las radiaciones*. Buenos Aires, Argentina: Eudeba.

- Ferrer, A. (2015). *Física nuclear y de partículas*. Valencia, España: Universitat de València.
- Galindo, A.; Pascual, P. (1989). *Mecánica cuántica*. Barcelona, España: Eudema.
- Galle, P., y Paulin, R. (2003). *Biofísica: radiobiología, radiopatología*. Barcelona, España: Masson.
- García, M., y Roqué, X. (1990). *Heinrich Hertz. Las ondas electromagnéticas*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Garzón, L. (1987). *Radioactividad y medio ambiente*. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.
- Gil, J.M. (2010). *Radiobiología para profesionales sanitarios: radiosensibilidad vs radiorresistencia. Respuestas bioquímica, celular y tisular*. Madrid, España: MAD.
- González, V. M. (2004). *Física fundamental* (3ra ed.). México: Progreso.
- Herráez, M.A. (1967). *Estructura de las moléculas*. Barcelona, España: Reverté.
- Jorba, J., y Ortega, X. (1996a). *Radiaciones ionizantes. Utilización y riesgos I*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Jorba, J., y Ortega, X. (1996b). *Radiaciones ionizantes. Utilización y riesgos II*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Jou Mirabent, D. (2009). *Física para ciencia de la vida*. Madrid, España: Mc-Graw-Hill.
- Krane, S. (1995). *Introductory Nuclear Physics*. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Kühnel, W. (2010). *Atlas color de Citología e Histología* (11vo ed.). Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.
- Lahera, J. (2004) *Bohr: de la teoría atómica a la física cuántica*. Madrid, España: Nivola.
- Latorre, E. (1979). *"Radiobiología médica"*. Madrid, España: Editorial AC.
- Leite, J. (1978). *Fundamentos de Física Atómica*. México: Trillas.
- Mataix, C., y Rivadulla, A. (2002). *Física cuántica y realidad*. Madrid, España: Complutense.

- National Aeronautics and Space Administration. (2007). *The electromagnetic spectrum*. [Figura]. Recuperado de:  
[http://mynasadata.larc.nasa.gov/images/EM\\_Spectrum3-new.jpg](http://mynasadata.larc.nasa.gov/images/EM_Spectrum3-new.jpg)
- Organización Mundial de la Salud. (2015). *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección*. Recuperado de:  
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>
- Ortiz, J. M. (1947). *Citología general: los fundamentos citológicos de la biología*. Madrid, España: Labor.
- Pérez-Navarro, A., y Rodríguez, L. (2005) *Estudio de los electrones desacoplados en el Tokamak TJ-I: determinación de sus características de confinamiento a partir del análisis de su radiación de frenado*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Pérez, M.R. (2010). Radiaciones ionizantes y salud. *Revista de Salud Ambiental*, 10, (1), (1-3).
- Radvanil, P. (1987). *La radioactividad artificial*. Barcelona, España: Salvat.
- Real Academia Española. (2015). *Radiación*. Recuperado de:  
<http://dle.rae.es/?id=V0nSwmt>
- Real, A. (2010). Riesgos derivados de la exposición a dosis bajas de radiación ionizante Risks of low dose ionising radiation exposures. *Revista de Salud Ambiental*, 10, (1), (43-48).
- Rivera, E. (2010). Radioprotectores. *Radiobiología*, 10, (1/2), (225-229).
- Rodríguez, M. A., y Cervantes, J. (2006). El efecto fotoeléctrico. *Ciencia Ergo Sum*, 13, (3), (303-313).
- Sánchez del Río, C. (2015). *Física cuántica*. Madrid, España: Pirámide D.L..
- Strathern, P. (1999). *Bohr y la teoría cuántica*. Madrid, España: Siglo XXI.
- Tanarro, A. (1970). *Instrumentación nuclear*. Madrid, España: JEN.
- Tanarro, A. (1986). *Radiaciones Ionizantes*. Madrid, España: JEN.
- Tello, E. (2008). Radionúclidos y cánceres. En S. López (Ed.), *Casi todo lo que usted desea saber sobre los efectos de la energía nuclear en la salud y el medio ambiente*. (pp.97-112). Barcelona, España: El Viejo Topo.
- Tipler, P. (1994). *Física*. Barcelona, España: Reverté.

Ynduráin, F. (1997). El Electrón: una de las partículas fundamentales de la naturaleza. *Arbor*, 158, (622), (205-228).

Wichmann, E. (1988). *Física cuántica*. Barcelona, España: Reverté.