



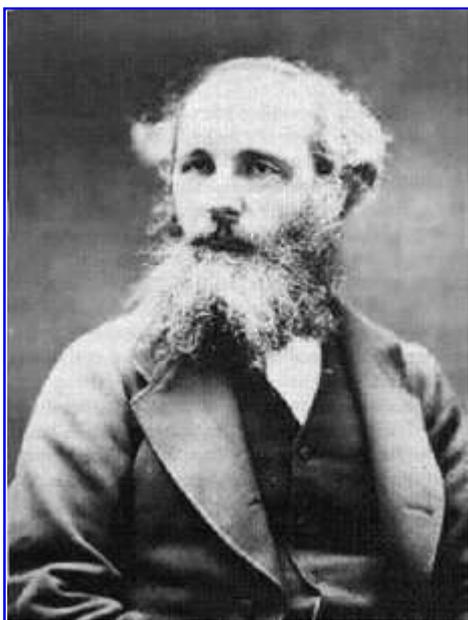
MINISTERIO DE EDUCACIÓN

DINFOCAD/UCAD

DINESST/UDCREES

**PLANCAD  
SECUNDARIA 2000**

**CIENCIA, TECNOLOGÍA  
Y AMBIENTE**



Fascículo Autoinstructivo

4.4

**EFEECTO COMPTON**

**Producción y Publicación:**  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN  
DINFOCAD/UCAD/PLANCAD  
Van de Velde 160 San Borja  
Lima.

**Autoría:**  
UNIVERSIDAD PERUANA  
CAYETANO HEREDIA  
Facultad de Educación

**Equipo de Trabajo:**  
Alina Gómez Loarte  
Luis Huamán Mesía  
Carmen Lauro Guzmán  
César Quiróz Peralta  
Adela Rodríguez

**Corrección de Estilo:**  
Miguel Incio Barandiarán

**Diagramación:**  
Rosa Támara Sarmiento

**Revisión de textos:**  
PLANCAD:  
Jorge Jhoncon Kooyip  
UDCREES:  
Elizabeth Quinteros Hajar  
Héctor Yauri Benites

# Índice

<b>I. Ondas electromagnéticas</b>	
1.1. Definición	1
1.2. Ondas electromagnéticas	4
1.3. Energía transmitida por ondas electromagnéticas	5
1.4. Presión de radiación	5
1.5. Energía solar	6
<b>II. El espectro de ondas electromagnéticas</b>	<b>7</b>
<b>III. El efecto fotoeléctrico</b>	<b>12</b>
3.1. Radiación del cuerpo negro e hipótesis de Planck	12
3.2. Efecto fotoeléctrico	14
<b>IV. Rayos X y efecto Compton</b>	<b>16</b>
4.1. Producción de rayos X	16
4.2. Difracción de rayos X	16
4.3. Efecto Compton	17
Evaluación	23
Respuestas	25
Claves	26
Bibliografía	27

# I. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

## 1.1 DEFINICIÓN

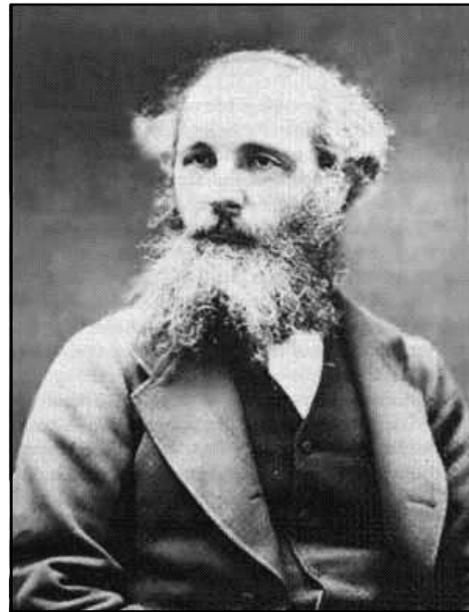
Son ondas que se pueden propagar a través del espacio vacío.

### **James Clerk Maxwell (1831-1879)**

*James Clerk Maxwell es considerado como el más grande físico teórico del siglo XIX. Nacido en Edimburgo, en el seno de una familia escocesa muy conocida, ingresó a la universidad de esa ciudad a la edad de 15 años, época en la cual descubrió un original método para dibujar un óvalo perfecto. Maxwell obtuvo su primera cátedra en 1856 en Aberdeen. Esto fue el principio de una carrera durante la cual desarrollaría la teoría electromagnética de la luz, la explicación de la naturaleza de los anillos de Saturno y en la que contribuiría a la teoría cinética de los gases.*

*El desarrollo de la teoría electromagnética de la luz de Maxwell duró muchos años y empezó con el artículo "acerca de las líneas de fuerza de Faraday", en el cual Maxwell amplió la teoría de Faraday de que los efectos eléctricos y magnéticos son resultado de campos de fuerza alrededor de los conductores y los imanes. Su siguiente publicación, "Acerca de líneas de fuerza física", incluyó una serie de artículos que explicaban los efectos conocidos de la naturaleza del electromagnetismo.*

*Otras contribuciones importantes de Maxwell a la física teórica fueron en el área de la teoría cinética de los gases. En ésta amplió el trabajo de Rudolf Clausius, quien, en 1858, había demostrado que un gas debe componerse por moléculas en constante movimiento chocando con otras y con las paredes del recipiente. Esto dio lugar a la distribución de velocidades moleculares de Maxwell, además*



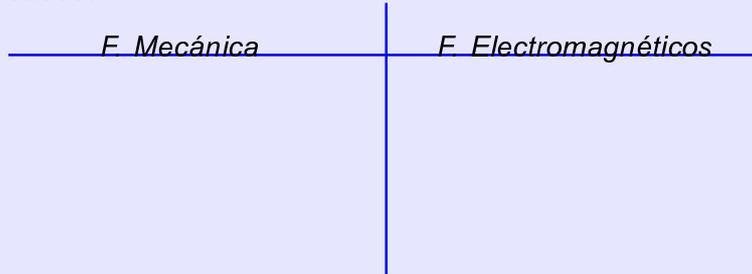
*de importantes aplicaciones a la teoría a la viscosidad, la conducción del calor y la difusión de gases.*

*La exitosa interpretación de Maxwell al concepto de Faraday del campo electromagnético culminó en la ecuación de campo que lleva el nombre de Maxwell. Una extraordinaria habilidad matemática combinada con una gran intuición, permitieron a Maxwell encabezar la vanguardia en el estudio de las dos más importantes áreas de la física en esa época. Maxwell murió de cáncer antes de cumplir 50 años.*

En base a las leyes de Faraday (ver fascículo 4.3) y a los fenómenos electro magnéticos, se propusieron 4 ecuaciones conocidas como las ecuaciones de Maxwell en honor a J.C. Maxwell; se dice que son tan fundamentales para los fenómenos electromagnéticos como lo son las leyes de Newton para los fenómenos mecánicos.

**Investiga:**

¿Podrías mencionar cuáles son los fenómenos mecánicos y fenómenos electromagnéticos?



Estas ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de ondas electromagnéticas.

*Las ondas electro magnéticas son patrones de recorrido de campos eléctrico y magnéticos.*

Estas ondas viajan a la velocidad de la luz.

**Recuerdas:**

¿Cuál es la velocidad de la luz?

.....  
.....

Además, esta teoría muestra que estas ondas son irradiadas por cargas eléctricas.

**Las ecuaciones de Maxwell**

James Clerk Maxwell resumió las propiedades conocidas de los fenómenos eléctricos y magnéticos en cuatro ecuaciones:

La **primera ecuación** relaciona el campo eléctrico  $E$ , que atraviesa una superficie  $A$  (por ejemplo una esfera), con la carga eléctrica  $Q$  contenida dentro de la superficie.

La **segunda ecuación** relaciona el campo magnético  $B$ , que atraviesa una superficie  $A$ , con la carga magnética contenida en la superficie, y afirma que dicha carga es nula, es decir, que no existen cargas magnéticas.

La **tercera ecuación** describe dos formas de inducir un campo magnético  $B$  en una espira circular  $I$ . Una de ellas implica el movimiento de cargas en una corriente eléctrica  $\dot{E}$ , y la otra implica un flujo eléctrico variable.

La **cuarta ecuación** describe la forma de inducir un campo eléctrico  $E$  mediante un flujo magnético variable. La variación de un flujo depende de la variación del campo ( $E$  o  $B$ ) y de la superficie  $A$  atravesada por el mismo.

(Ley de Gauss)

(Carga magnética nula)

$$\int B \cdot dA = 0$$

(Ley de Ampère)

$$\int B \cdot dl = \mu_0 \left( I + \epsilon_0 \frac{d\Psi}{dt} \right)$$

(Ley de Faraday)

$$\int E \cdot dS = dQ_b / dt$$



*Todos estos términos parecen algo complicado.*

$$\int E \cdot dA = Q / \epsilon_0$$

Puede que la explicación matemática sea algo compleja, pero se debe rescatar lo que nos ayuda a entender cómo pueden inducirse los campos magnéticos mediante un flujo magnético o por un flujo eléctrico variable.

Ahora voy entendiendo. Electricidad y Magnetismo no son dos fenómenos independientes.



### Del fascículo 4.3:

¿Cómo se relacionó por primera vez magnetismo con electricidad?

-----  
-----  
-----

## 1.2 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las ondas electromagnéticas se diferencian de las mecánicas porque no necesitan un medio para propagarse, es decir, pueden propagarse a través del vacío. Las bases teóricas de los fenómenos electromagnéticos están dadas por las llamadas "Leyes de Maxwell".

¿Cuántas son?

---

---

¿En resumen que nos quieren decir?

---

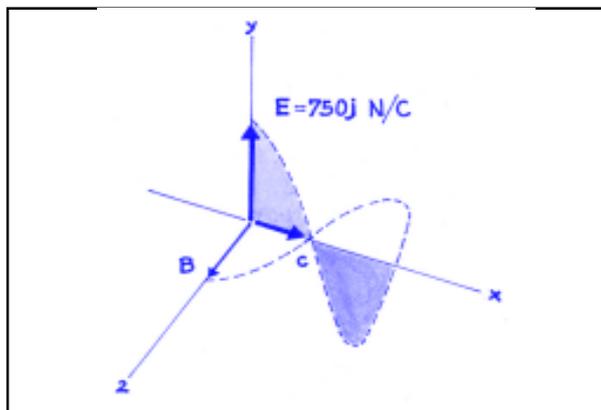
Es decir, proporcionan el importante vínculo entre los campos eléctrico y magnético. La luz es una onda electromagnética constituido por un campo magnético y otro eléctrico que vibran perpendicularmente entre sí.

Pero tal vez lo más importante es que predicen también la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz, lo cual fue confirmado por Heinrich Hertz, que generó y detectó la onda electromagnética y descubrió que la velocidad de una onda de radio era la misma que la de la luz.

Las aplicaciones del descubrimiento de las ondas electromagnéticas incluyen la radio, la televisión y el radar.

Maxwell tuvo como logro en el campo teórico el de unificar los temas de la luz y electromagnetismo, desarrollando la idea de que la luz es una forma de radiación electromagnética.

En una palabra, las ondas electromagnéticas, están compuestas por campos eléctricos y magnéticos.



Estas ondas son cargas oscilantes, que forman ángulos rectos entre sí y también ángulos rectos con la dirección de la propagación de la onda.

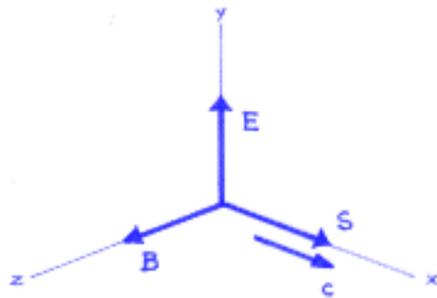
### 1.3 ENERGÍA TRANSMITIDA POR ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las ondas electromagnéticas transmiten energía y cuando se propagan a través del espacio transfieren energía a los objetos situados en su trayectoria.

El flujo de energía de una onda electromagnética se describe por medio de un vector S, denominado vector Poynting, según la expresión:

$$S = E \times B$$

Esta expresión representa la tasa a la cual la energía fluye a través de una superficie perpendicular a lo largo de la dirección de la onda.



La unidad de S es el  $J/s \ m^2 = W/m^2$

donde: J = joule

W = watt

### 1.4 PRESIÓN DE RADIACIÓN

Las ondas electromagnéticas se transportan como energía, por ello, se deduce que una onda ejerce presión sobre una superficie cuando incide sobre esta.

Maxwell dedujo que la presión equivale a:

$$P = \frac{S}{C}$$

Donde P = presión

S = flujo de energía

C = velocidad de la luz

Ahora bien, se define como:

#### Cuerpo negro

A aquella superficie que absorbe toda la energía que se le emite, es decir, nada se refleja.

### Cuerpo reflector

A aquella superficie que refleja el total de la energía que recibe, de modo que su transferencia de energía es el doble que el transferido al cuerpo.

$$P = 2C$$



### 1.5 ENERGÍA SOLAR

El sol entrega aproximadamente 1000 W/m<sup>2</sup> de flujo electromagnético.

¿Cómo se podría calcular la potencia total incidente en un techo de 10.00 x 20 m<sup>2</sup>?

$$P = S \cdot A = (1000 \text{ w/m}^2)(10.00 \times 20 \text{ m}^2)$$

$$P = 2.0 \times 10^5 \text{ W}$$

Si bien al simple cálculo podríamos deducir que esta potencia total podría ser más que suficiente para suministrar energía eléctrica a una casa, existen, sin embargo, consideraciones en contra de esta posibilidad de obtención de energía como son:

- Los días nublados
- Ubicación geográfica
- Almacenamiento de energía

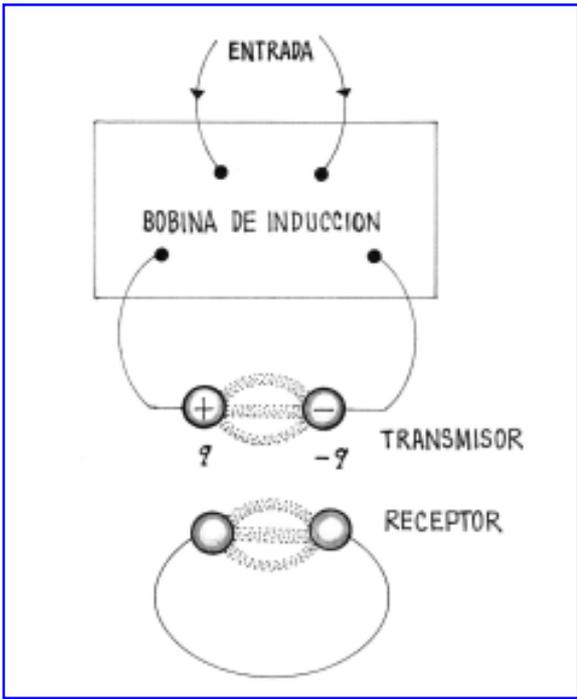
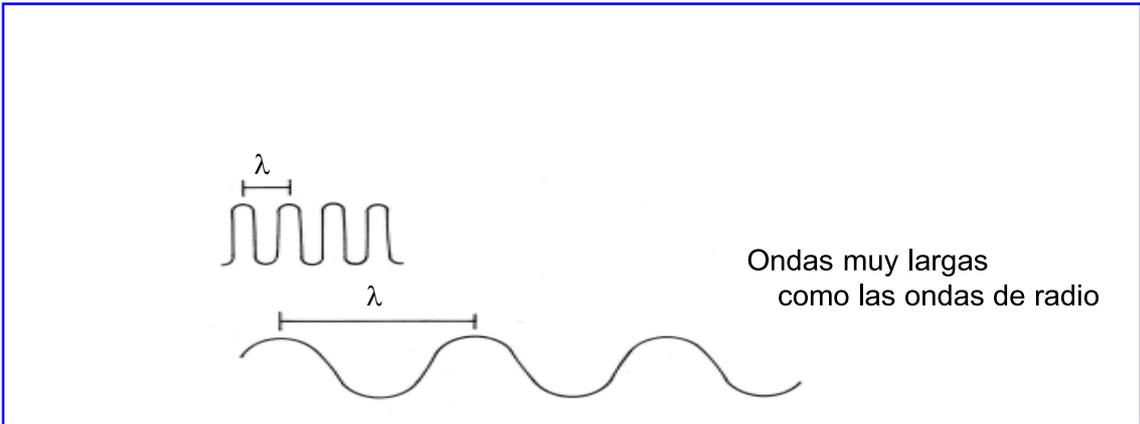
#### Ejercicio

Ahora bien los "paneles solares" son grandes cuerpos negros, ¿podrías encontrar la presión de radiación ejercida sobre el techo en cuestión?

-----  
-----

-----  
-----

## II. EL ESPECTRO DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS



Las ondas viajan a través del vacío. Las ondas pueden tener diferente amplitud, así tenemos:

Ondas muy cortas como las onda gamma

La amplitud de una onda se denomina *longitud de onda* ( $\lambda$ ) y se mide en diversas unidades de longitud, las ondas más largas pueden medir desde varios metros hasta kilómetros, en tanto las más cortas se miden en nanómetros ( $10^{-18}$  nm).

Las ondas electromagnéticas son producidas por corrientes oscilantes, tal como lo demostró Heinrich Rudolf Hertz en 1887, con un aparato experimental como el que se muestra en la figura siguiente:

En él, dos electrodos esféricos estaban conectados a una bobina de inducción, conformando el transmisor.

La bobina emitía cortos sobrevoltajes a las esferas: cargando a una positiva y a otra negativa, generando de este modo una chispa entre las esferas.

Conforme se ionizaba el aire en el espacio entre las esferas, se establecía una oscilación entre las cargas.

Cuando el experimentador ajustaba la frecuencia del receptor para igualar la del transmisor, entonces las esferas que conformaban el receptor generaban también una chispa.

De esta manera, Hertz demostró que la corriente oscilante producida en el receptor era producida por ondas electromagnéticas irradiadas por el transmisor.

El número de veces que una onda oscila en 1 segundo, se denomina **frecuencia**.

Las frecuencias de emisión de ondas ( $f$ ) son medidas en unidades denominadas Hertz ( $H_2$ ), la cual es una medida del tiempo también expresada como  $S^{-1}$ , así, por ejemplo, las ondas de radio tienen una frecuencia de  $10^7$  Hz.

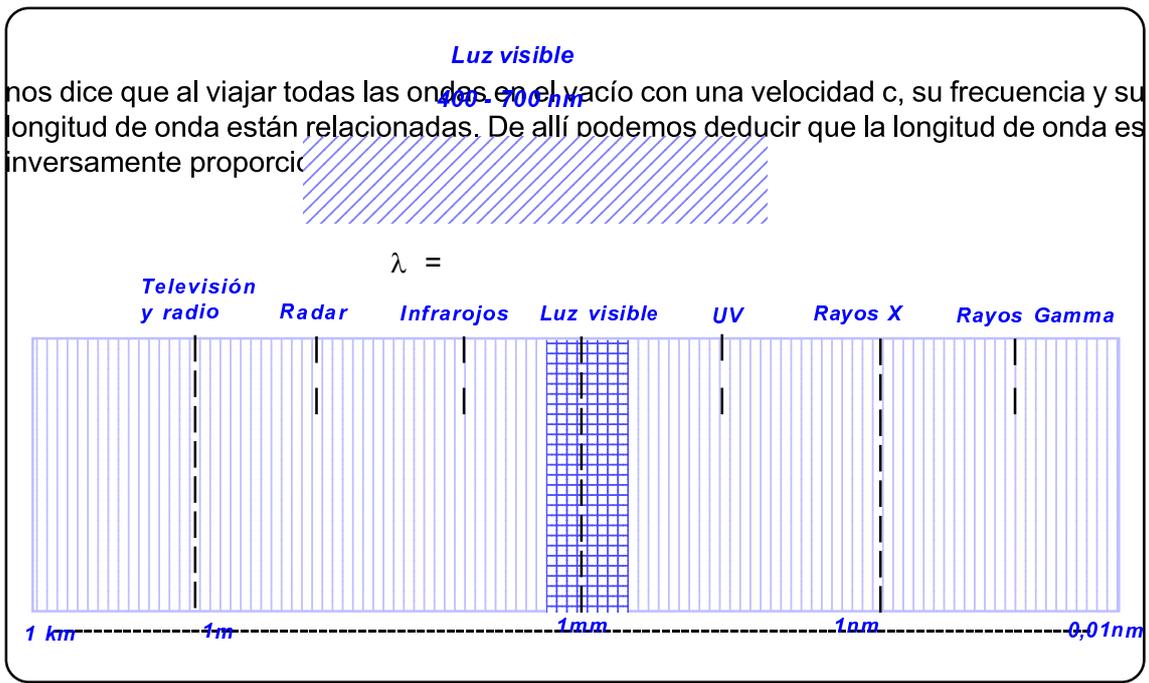
**Investiga:**

¿Cuál es la frecuencia de los rayos gamma y de las emisoras televisivas (TV)?

\* La velocidad real de la luz es 299,792,458 m/s

La expresión:

$$C = f \lambda$$



A continuación la ubicación de los diversos tipos de ondas electromagnéticas.

### Algunos tipos de ondas:

- *Las ondas de radio:* tienen una frecuencia muy pequeña y una longitud de onda muy larga. Son el resultado de cargas que se aceleran a través de un alambre de conducción. Se usan en sistemas de comunicación radial y televisiva.
- *Las microondas:* varían entre 1 mm – 30 cm y son generadas por dispositivos electrónicos. Son utilizados en sistemas de radar para la navegación aérea y para el estudio de las propiedades atómicas y moleculares de la materia. Los hornos microondas utilizan éstas. Se piensa que la energía solar podría ser aprovechada mediante la transformación de estas en microondas dirigidas a la tierra.
- *Las ondas infrarrojas (IR):* emiten calor, debido a la energía que agita a los átomos. Es muy utilizada, por ejemplo, en la aceptación de las imágenes por parte de los satélites.
- *La luz visible:* ocupa un estrecho rango en el aspecto electromagnético. Es aquella que puede ser apreciada por el ojo humano. Sus diversas longitudes de onda se clasifican en colores que van del violeta ( $= 4 \times 10^{-7}m$ ) al rojo ( $= 7 \times 10^{-7}m$ ). La luz visible solo representa una banda muy estrecha del espectro electromagnético. Cada color de la luz visible corresponde a una frecuencia determinada del espectro, una de las formas de medir estas frecuencias es con un instrumento denominado espectrómetro, la luz violeta es la luz visible con menor longitud de onda (400 nm) y mayor frecuencia, el rojo tiene la mayor longitud de onda (700 nm) pero la menor frecuencia dentro de la luz visible.
- *Luz ultravioleta (UV):* El sol es importante fuente de luz UV, la cual es la principal causa del bronceado. La mayor parte de la luz UV es absorbida por la capa de ozono de la atmósfera.
- *Rayo X:* son ondas de longitud de onda muy corta (10 nm a 10<sup>-4</sup>nm). Estos rayos son útiles para el estudio de órganos internos.
- *Rayos Gamma:* son emitidas por núcleos radioactivos como  ${}_{60}\text{Co}$  y  ${}_{137}\text{Cs}$ . Sus longi-

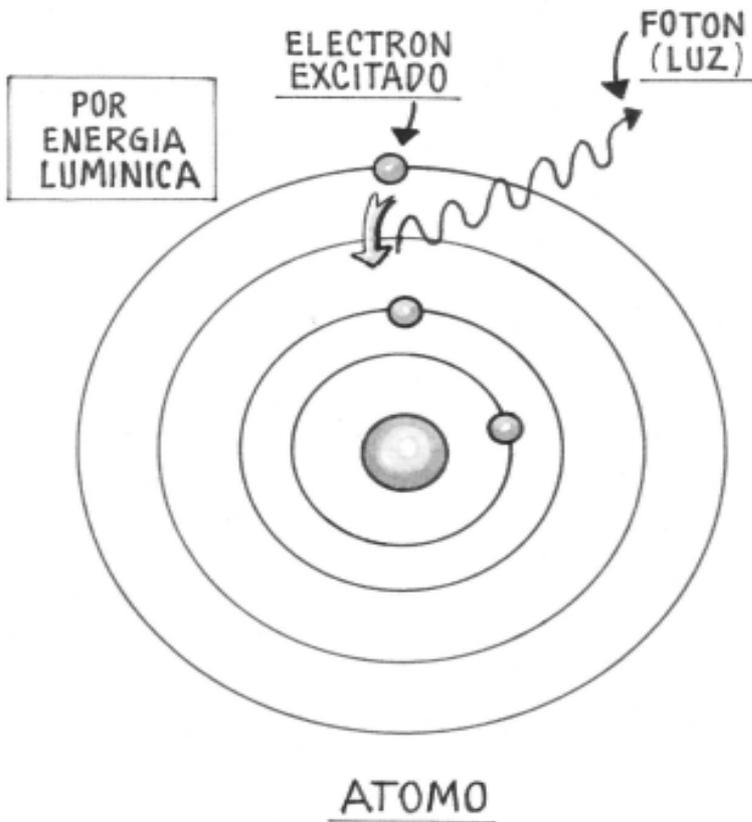
tudes de onda son las cortas del espectro, van de  $10^{-2}$  nm a  $10^{-5}$  nm. Son muy dañinas para el ser humano.

La luz ac  
do intera  
cuanto de

**Investig**

¿Cuál  
posibl

-----  
-----  
-----



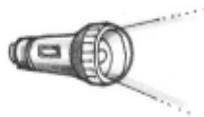
ialmente cuan-  
ada cantidad o

r los

-----  
-----  
-----

**ESPECTROS**

LAMPARA



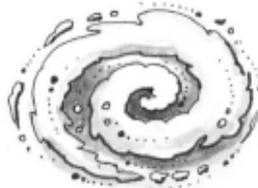
-----

SOL



-----  
-----  
-----  
-----

GALAXIA



-----  
-----  
-----  
-----

### III. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

#### 3.1 RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO E HIPÓTESIS DE PLANCK

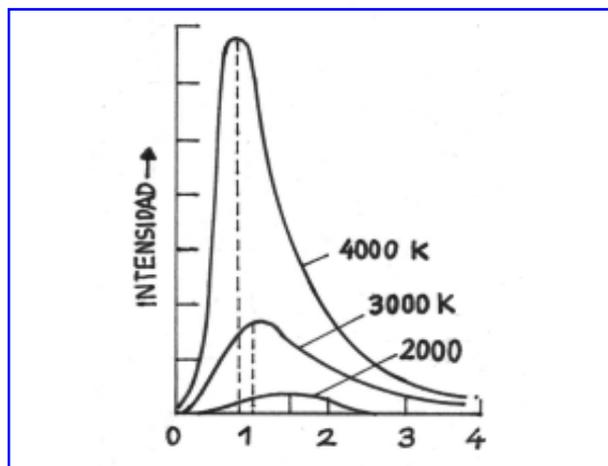
Un cuerpo negro es un sistema ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre él.

Una buena aproximación al cuerpo negro es el interior de un objeto hueco. La luz que ingresa por un pequeño orificio incide sobre la pared opuesta, donde parte es absorbida y otra reflejada. Esta luz sigue reflejándose y en cada reflexión una parte de ella es absorbida por las paredes de la cavidad. Luego de muchas reflexiones, toda la energía incidente es absorbida.



Sin embargo, los cuerpos negros, al igual que todos los cuerpos emiten radiación, la cual se emite como radiación térmica. La característica de esta radiación es que depende de la temperatura.

En la figura se observan datos experimentales para la distribución de energía de la radiación del cuerpo negro a tres diferentes temperaturas. Según se puede apreciar la energía radiada varía directamente con la temperatura absoluta e inversamente con la longitud de onda. Además, con las temperaturas crecientes, el pico de la distribución se corre a las longitudes de onda más cortas.



A bajas temperaturas, la radiación térmica tiene una longitud de onda en el infrarrojo, por lo que no puede ser observada por el ojo humano. Cuando se aumenta la temperatura, la radiación pasa a la luz visible y el ojo humano la aprecia de color rojo. En suma, a medida que se incrementa la temperatura en un cuerpo negro, crece la cantidad total de energía que emite.

La relación entre longitud de onda máxima ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) que se puede observar a una temperatura determinada se consigue mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{0,2898 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}}{T (\text{°K})}$$

Donde:  $\lambda_{\text{máx}}$  = Longitud de onda máxima.

T = Temperatura absoluta del objeto que emite la radiación.

Esta ecuación recibe el nombre de *Ley de desplazamiento de Wien*.

### Ejercicio:

¿Cuál será la  $\lambda_{\text{máx}}$  que emite el cuerpo humano a temperatura normal de 37°C?

-----  
-----

En su teoría Planck propuso respecto de la naturaleza de las moléculas del cuerpo negro, lo siguiente:

- Las moléculas sólo pueden tener unidades discretas de energía  $E_n$ .

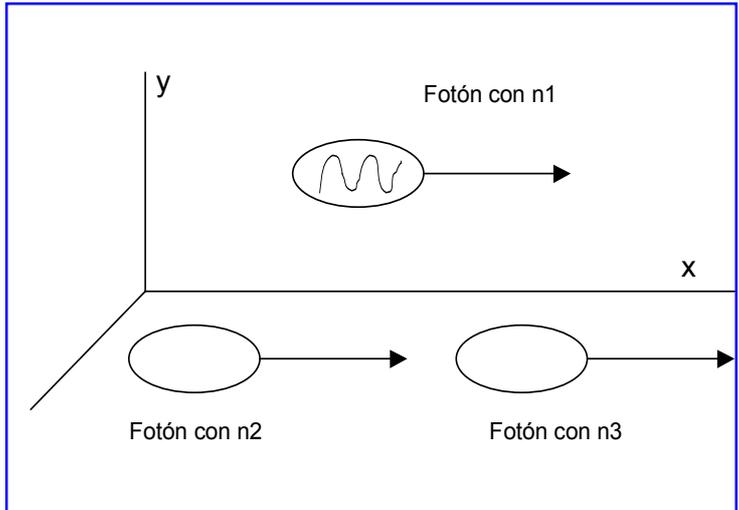
$$E_n = nhf$$

Donde:  $n$ : número cuántico

$h$ : constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  Js)

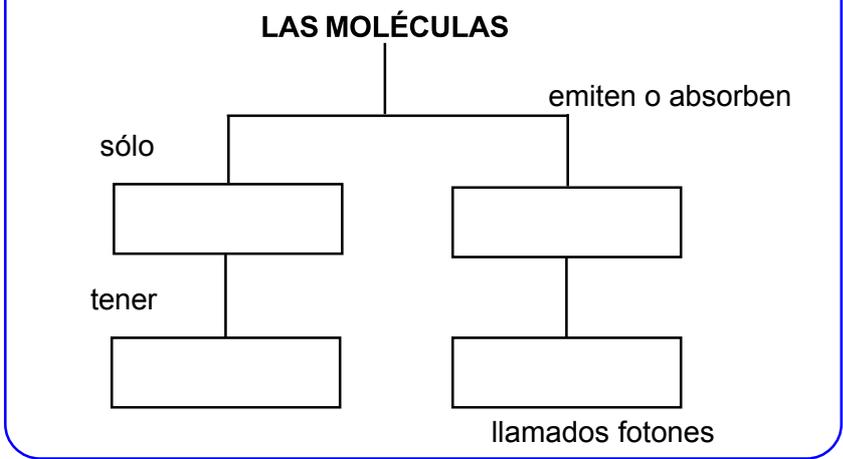
$f$ : frecuencia

Como la energía de una molécula puede tener exclusivamente valores discretos, se dice que la energía está *cuantizada*. Por consiguiente, cada valor de energía discreto representa un *estado cuántico* diferente, con cada valor de  $n$  representando un *estado cuántico específico*.

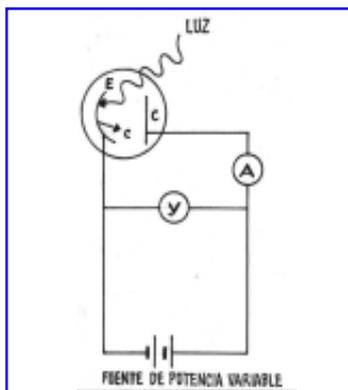


Ya que la interacción necesita una cantidad de energía física se concluye que la luz actúa como una partícula denominada **fotón**, midiendo la frecuencia de los fotones, se puede

**De los principios de Planck, completa lo siguiente:**



determinar que tipo de átomo los emitieron, y si proceden de algún lugar de la Tierra, del sol o de alguna galaxia lejana.



- Las moléculas emiten o absorben energía en paquetes discretos llamados fotones. Esto es producto de que “saltan” de un estado cuántico a otro. Cuando el salto ocurre, la energía  $E$  sería:

$$E = hf$$

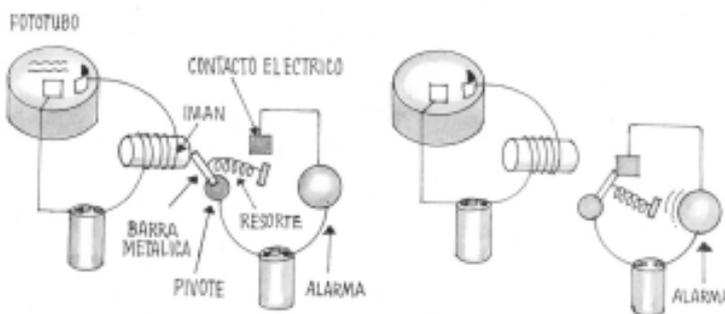
### 3.2 EFECTO FOTOELÉCTRICO

Se conoce como efecto fotoeléctrico al fenómeno por el cual la luz incidente sobre ciertas superficies metálicas ocasionan que desde ellas se emitan electrones. Los electrones emitidos reciben el nombre de *fotoclectrones*.

En la figura se muestra el diagrama de un aparato en el cual puede ocurrir el fenómeno fotoeléctrico. Un tubo de vidrio o cuarzo donde se ha hecho vacío contiene una placa metálica (E), conectada a la terminal negativa de una batería. Cuando el tubo se mantiene en la oscuridad, el amperímetro (A) registra cero, lo que indica que no hay corriente en el circuito. Por el contrario, cuando una luz monocromática de longitud de onda apropiada ilumina la placa E, el amperímetro detecta una corriente, lo que es indicio de un flujo de cargas a través del entrehierro, entre la placa E y la placa C. Conclusión: la corriente asociada a este proceso surge de los electrones emitidos desde la placa negativa E (emisor) y conectados en la placa positiva C (colector).

Una aplicación del efecto fotoeléctrico se da en los dispositivos de seguridad contra robos.

Cuando la luz UV deja de pasar hacia el fototubo, el imán se desactiva y se produce la activación de la alarma.



## IV. RAYOS X Y EFECTO COMPTON

Este fenómeno no pudo ser explicado por la teoría ondulatoria de la luz.

En 1905, Einstein extendió el concepto de Planck de la cuantización a las ondas electromagnéticas. Para ello supuso que la luz o cualquier onda electromagnética de frecuencia  $f$  puede considerarse como una corriente de fotones, donde cada fotón tiene una energía  $E$ , dada por la ecuación:

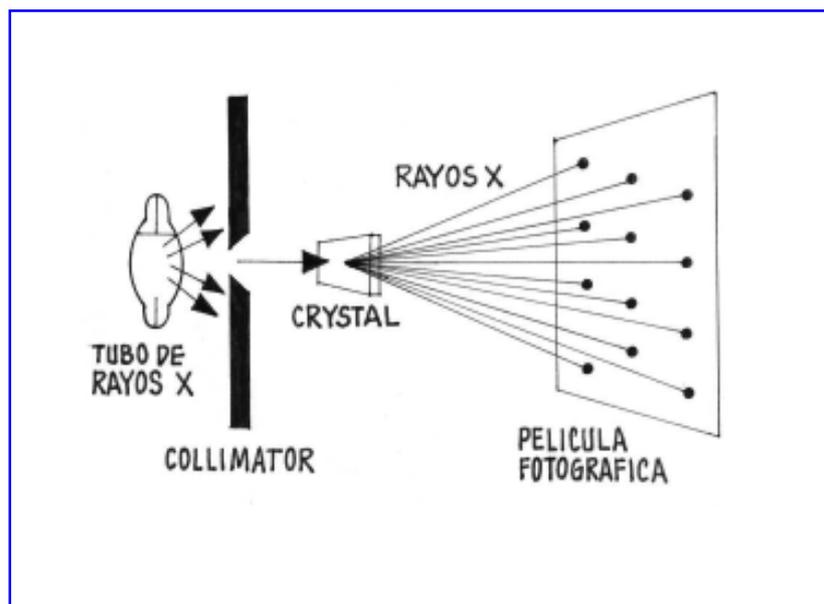
Donde :      $E$ :     energía del fotón  
               $h$ :     constante de Planck  
               $f$ :     frecuencia de la onda

En la actualidad, muchos dispositivos prácticos operan en función del efecto fotoeléctrico. Aprovechan que el fototubo, el cual opera como base en el efecto fotoeléctrico, actúa de manera muy similar a un interruptor en un circuito eléctrico.

Ejemplos:

- Medidores de luz en las cámaras fotográficas.
- Sistemas de alarmas contra robos.
- Cinematografía sonora.

En la figura se muestra la aplicación del efecto fotoeléctrico en un dispositivo de seguridad contra robos.

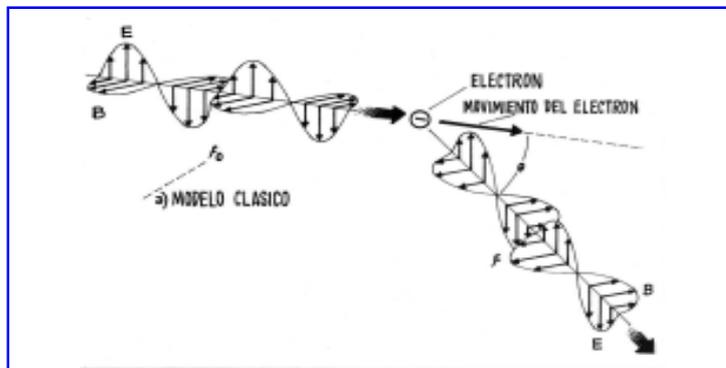


## 4.1 PRODUCCIÓN DE RAYOS X

Los rayos X fueron descubiertos por W. Roentgen (1845-1923) en 1895, al comprobar que si se dejaba que electrones de gran velocidad incidieran sobre el vidrio de un tubo de descarga, o sobre un blanco metálico, se emitía un tipo de partículas que llamó "rayos X" y que podía impresionar una placa fotográfica.

Actualmente los rayos X se producen en un tubo de alto vacío y se utiliza corriente eléctrica para calentar un filamento con la finalidad que emita electrones. Dicha energía puede llegar a 50 Kv. Sólo el 1% de esa energía se emplea para producir los rayos X, el resto se transforma en calor en el ánodo. Los electrones son acelerados desde el cátodo —en donde son producidos— hasta el blanco metálico que, en general, es de wolframio por su elevado punto de fusión

## 4.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X



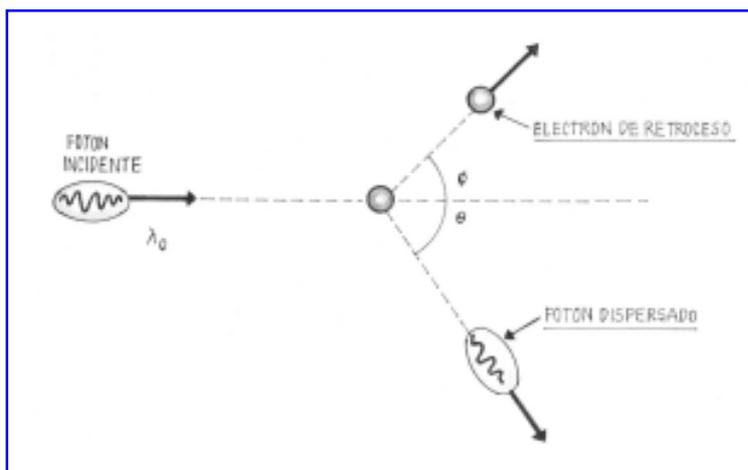
Los rayos X al igual que los rayos luminosos se difractan al pasar por una rejilla de difracción.

En 1913, Max von Laue (1879-1960) sugirió que la disposición regular de átomos en un cristal (Se sabe que el espacio interatómico en un sólido es de casi  $10^{-4}$  m) podría actuar como una rejilla de difracción tridimensional. Entonces, se procedió a estudiar experimentalmente la difracción de los rayos X utilizando un cristal como rejilla de difracción.

En la figura se muestra el diagrama esquemático de la técnica empleada para observar la difracción de rayos X.

En 1906, Einstein llegó a la conclusión de que un fotón de energía  $E$  viaja en una sola dirección y que conduce un momento igual a:

Es decir, si un haz de radiación origina que una molécula emita o absorba un paquete de energía  $hf$ , entonces se transfiere a la molécula una cantidad de momento  $hf/c$ , dirigido a lo largo de la línea del haz en la absorción y opuesta al haz en la emisión.



De acuerdo con esta teoría, las ondas electromagnéticas incidentes de frecuencia  $f_0$  deben acelerar a los electrones, obligándolos a oscilar y a volver a radiar con una frecuencia  $f < f_0$ . Además, la frecuencia o longitud de onda de la radiación dispersada debe depender de cuánto se expuso la muestra a la radiación incidente y de la intensidad de la radiación.

Sin embargo, estas suposiciones no se correlacionaban con las evidencias experimentales.

### 4.3 EFECTO COMPTON

Arthur Holly Compton  
brimientos:

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m c} (1 - \cos \theta)$$

los siguientes descu-

- Un fotón de gran energía de los rayos X sólo puede dar cierta cantidad de movimiento a los electrones.

Cuando un fotón choca con un electrón ambos siguen diferentes direcciones (intuitivamente, el fenómeno puede compararse con la trayectoria de una bola de billar que golpea a otra bola inmóvil). El efecto conlleva a un aumento de la  $\lambda$  del fotón después de la colisión, demostrando que ha perdido energía  $E$  y a un ensanchamiento de la radiación, que corresponde a la distribución de los ángulos de salida.

Compton encontró que la energía  $E$  perdida por el fotón es igual a la ganada por el electrón y que la cantidad de movimiento del fotón original es igual a la cantidad de movimiento del electrón, más la cantidad de movimiento del nuevo fotón.

- El corrimiento de la longitud de onda de los rayos X dispersados a un ángulo determinado es absolutamente independiente de la intensidad de la radiación y de la duración de la exposición y que sólo depende del ángulo de dispersión.

A partir de estas evidencias experimentales, Compton amplió la idea del momento del fotón de Einstein y formuló la ecuación:

Respuesta: rayos X, electrón, energía.

Conocida como *Ecuación de corrimiento de Compton*.

donde:  $m$  = masa del electrón  
 $h/mc = \lambda_c$  = longitud de onda de Compton del electrón.  
 $\theta$  = ángulo de dispersión.

El valor actualmente aceptado de  $\lambda_c$  es *0,00243 nm*.

### Completa los espacios vacíos:

*En el efecto Compton, un fotón de \_\_\_\_\_ o rayos gamma, de longitud de onda  $\lambda$ , colisiona con un \_\_\_\_\_ libre de la materia provocando la emisión de un electrón llamado "de retroceso" y de un fotón de longitud de onda  $\lambda'$  ( $\lambda$ ), superior a la longitud de onda  $\lambda$  ( $\lambda$ ). Es decir una disminución de la \_\_\_\_\_.*

### Consecuencias y aplicaciones del efecto Compton

Como hemos visto, el efecto Compton es la difusión de fotones debido a interacciones entre la radiación electromagnética y la materia. En su época, su descubrimiento representó la prueba experimental de la existencia de los fotones (principio de la física cuántica).

El efecto Compton permite medir la intensidad de los rayos gamma, lo que resulta de gran utilidad en física de partículas. Otra consecuencia práctica del efecto Compton, esta vez negativa, es que provoca en las radiografías un ensombrecimiento de la imagen debido a la degradación de los rayos X y a la emisión de electrones parásitos.

### Interacción de los fotones con la materia

La interacción de los fotones con la materia es, en esencia, la cesión de energía por parte de los mismos al medio con el que interacciona. Puede tener lugar con los electrones o con los núcleos mismos, y dar lugar a modificaciones en la estructura de los átomos.

Para las radiaciones que interesan en radiodiagnóstico, las interacciones tienen lugar con los electrones y no con los núcleos, debido a que sus energías son las comprendidas entre 20 KeV y 150 KeV.

Cuando un haz de rayos X atraviesa un medio material, como el cuerpo humano, se atenúa debido a las interacciones que sufren sus fotones con los átomos del cuerpo.

**La atenuación.**- Consiste en la pérdida de fotones al atravesar un espesor determinado de un material, *se produce bien por absorción, bien por dispersión.*

**La absorción.**- Se produce cuando la energía que portan los rayos X se gasta toda en arrancar electrones del medio, los fotones absorbidos desaparecen del haz de radiación.

**La dispersión.-** Tiene lugar cuando la radiación (RX) es desviada en su camino original como consecuencia de los fenómenos de interacción.

Los fenómenos de interacción que pueden tener importancia en radiodiagnóstico son:

- 1.º *Dispersión incoherente, o de Compton, inelástica.*
- 2.º *Efecto fotoeléctrico.*

**Atenuación espacial.-** La atenuación depende de la cantidad y de la calidad de fotones.

Si hacemos pasar un haz de RX, que suponemos monoenergético, a través de un maniquí de agua de unos cuantos cm, y al otro lado colocamos un detector, observamos que ha disminuido el número de fotones y si repetimos el estudio y hacemos pasar el haz por sucesivos espesores de 1 cm, al atravesar el 1er cm, el haz ha perdido el 20% de los que entraron. Al atravesar el 2do. cm, el haz ha perdido el 20% de los que entraron, en la segunda vez. Al atravesar el 3er cm, pierde otro 20%.

**Interacción fotoeléctrica.-** Los electrones de cada capa están unidos al núcleo por una energía determinada de ligadura, cuyo valor dependen del nivel de la capa en la que se encuentra, *los de las capas más próximas al núcleo están más fuertemente unidos al mismo, los de las capas más externas están ligados al núcleo por fuerzas menores.* Las fuerzas de ligadura *también dependen del número atómico de los átomos.*

El efecto fotoeléctrico, tiene lugar cuando un fotón de energía no muy alta, pasa por las proximidades de un átomo, interacciona con sus electrones, *(fundamentalmente los de las capas más externas)* los arranca, cediéndole toda su energía que se gastan en vencer la energía de ligadura del electrón y en comunicarle una cierta energía cinética.

El fotón desaparece y no hay dispersión. En el proceso se crea un par de iones:

- 1.º *el fotoelectrón que tiene carga negativa*
- 2.º *el átomo ionizado que tiene carga positiva.*

El hueco que queda en la capa K se llena con un electrón de la capa L, y éste con un e de la capa M y así sucesivamente. En cada uno de estos saltos, se emite radiación característica.

La radiación característica tiene una energía que es igual a la diferencia entre las energías de enlace de las capas entre las que salta.

**Probabilidad fotoeléctrica.-** *Es aproximadamente proporcional al cubo del número atómico, e inversamente proporcional al cubo de la energía del fotón incidente.* Desde la óptica del Radiodiagnóstico las interacciones fotoeléctricas presentan ventajas y desventajas:

**Ventajas.-** Se producen imágenes de gran calidad porque:

1. *No hay radiación dispersa.*
2. *Se intensifican los contrastes entre los tejidos naturales, debido a que la probabilidad aumenta con el cubo del número atómico. El número atómico efectivo del agua, por ejemplo, es de 7.4, mientras que el del hueso compacto es de 13.8, al crecer la absorción en los medios de número atómico más altos se hacen notar más las diferencias entre los distintos tejidos que forman el organismo.*

**Desventajas.-** Al no haber radiación dispersa, la totalidad de energía de los fotones por efecto fotoeléctrico, es absorbida por el paciente.

Como una de las metas en Radiodiagnóstico es irradiar al paciente lo menos posible, este hecho hay que tenerlo en cuenta a la hora de elegir técnica. Se puede reducir eligiendo el mayor Kv que sea compatible con la exploración a realizar.

**Interacción Compton.-** La mayoría de radiación dispersa que se produce en Radiodiagnóstico, procede de interacción Compton.

La interacción Compton tiene lugar cuando un fotón de relativa alta energía, incide sobre un electrón libre o de las capas más externas de los átomos, al chocar lo arrancan del átomo creando un par de iones el átomo ionizado y un electrón. Como el efecto Compton tiene lugar con electrones libres, conviene aclarar más este concepto.

Se llaman electrones libres, aquellos cuya energía de ligadura es mucho menor que la energía del fotón incidente. Es el caso de los electrones de las capas externas para los elementos de alto número atómico, *sin embargo, en los elementos de bajo número atómico que son los que constituyen los tejidos blandos, todos los electrones pueden considerarse libres*, porque su energía de ligadura, incluso para las capas internas, son menores de 1Kev.

La energía del fotón incidente, se gasta en arrancar al electrón de su órbita, en comunicarle al electrón una cierta energía cinética y el resto la mantiene el fotón que sale desviado con un ángulo determinado.

La cantidad de energía, que se transfiere al electrón, varía con la energía del fotón incidente, siendo más importante la cantidad de energía transferida si es mayor la energía del fotón incidente.

A bajas energías, el electrón se expulsa con muy poca energía, llevando el fotón dispersado casi toda la energía del incidente. En una interacción Compton, parte de la energía del fotón incidente es absorbida por la materia (*la que recibe el electrón*), y parte es dispersada la que mantiene el fotón secundario.

El reparto de energía entre el electrón y el fotón, así como el ángulo de dispersión, depende de la energía del fotón incidente y de las características del choque o interacción.

Los fotones que intervienen en interacciones Compton, pueden ser desviados desde 0°, hasta 180°, o sea, pueden salir casi en la misma dirección y sentido que entraron, en cuyo caso apenas ceden energía al electrón, o bien volver a la misma dirección pero en sentido contrario.

En el rango de los RX de Radiodiagnóstico:

1.º.- *El fotón retiene la mayoría de la energía y se transfiere muy poca al electrón de retroceso. Esto crea verdaderos problemas ya que la radiación dispersa no produce información útil en la radiografía, sino al contrario, contribuye a la distorsión de la imagen.*

2.º.- *Esta radiación es la responsable principal de la irradiación no deseada del personal de operación.*

**Probabilidad Compton:**

- 1.- *La probabilidad de que ocurran interacciones Compton, decrece con la energía de la radiación.*
- 2.- *En cuanto al medio, aumenta con la densidad del mismo y el número de electrones por gramo.*

**Factores que afectan la atenuación de un haz de RX que atraviesa un medio material.-** La atenuación depende de la energía de la radiación que incide y de la naturaleza del medio que atraviesa.

A medida que crece la energía de la radiación crece el poder de penetración y disminuye la atenuación.

A medida que crece la densidad de una materia, disminuye la capacidad de penetración y crece la atenuación.

Todos estos factores afectan, de diferente forma, en las interacciones según que se trate de efecto fotoeléctrico o Compton. En general, la probabilidad del efecto fotoeléctrico, crece mucho cuando disminuye la energía y cuando aumenta el número atómico.

La probabilidad es tanto mayor cuando la energía del haz se aproxima a las energías de enlace de los electrones de los elementos. El efecto Compton crece más despacio que

## EVALUACIÓN

el fotoeléctrico cuando disminuye la energía, y es proporcional al número de elect./gr., las interacciones tienen lugar con e libres.

**Atenuación en radiología.-** Los fotones de un haz entran en el enfermo con una distribución diferente.

Los fotones que salen, son los responsables de la imagen radiológica, pero también son importantes los fotones que son atenuados. Si salieran todos igual que entrarán, la película, quedaría uniformemente negra. Si todos se atenuaran, la película quedaría uniformemente blanca.

Las diferencias entre la salida y la entrada producidas por las características del haz y del medio, son las responsables de la imagen radiológica. Unos tejidos atenúan más que otros y estas diferencias dan origen a la imagen de la película.

En función de la energía, también, se producen diferencias de absorción. El hueso tiene calcio, cuyo número atómico es de 20, mientras que el tejido blando tiene un número atómico efectivo de unos 7. Para 100 keV predomina el efecto Compton y el factor que más influye es el número de e /gr.

**Radación dispersa.-** Que también se produce en un haz de rayos X que penetra en un enfermo, sólo produce perturbación, da niebla a la imagen radiológica y contribuye a la irradiación innecesaria del personal, e incluso, del paciente.

La radiación dispersa, procede de la dispersión Compton y de la radiación característica que se produce con el efecto fotoeléctrico.

1. *Son patrones recorridos de campos eléctricos y magnéticos:*
  - a. *longitud de onda*
  - b. *intensidad de onda*
  - c. *ondas electromagnéticas*
  - d. *electromagnetismo*
  - e. *campos de electricidad magnética*
  
2. *La ley ..... nos dice que la carga de una partícula se puede calcular una vez que los campos eléctrico y magnético se encuentra en algún punto.*
  
3. *Las ondas electromagnética se diferencian de las ondas mecánicas, porque:*
  - a. *no necesitan de electricidad*
  - b. *necesitan de electricidad*
  - c. *necesitan de un sólido para distribuirse*
  - d. *no necesitan de un medio para propagarse*
  - e. *necesitan un medio para difundirse*

4. ....llegó a la conclusión de que luz y electromagnetismo eran manifestaciones estrechamente ligadas.
5. ¿En qué rango de longitud de onda se encuentra la luz roja?
- $4 \times 10^{-7} \text{ m}$
  - $5 \times 10^{-8} \text{ cm}$
  - $7 \times 10^{-7} \text{ m}$
  - $6 \times 10^{-8} \text{ cm}$
  - $4 \times 10^{-8} \text{ m}$
6. Un cuerpo negro es aquel ..... que toda la radiación que sobre él incide
7. Aquel fenómeno por el cual la luz incidente sobre ciertas superficies metálicas ocasionan que estas emitan electrones se llama:
- Principio de Plank
  - Efecto de Newton
  - Ley de Compton
  - Efecto fotoeléctrico
  - Efecto de electromagnetismo
8. Los rayos X fueron descubiertos por:
- Faraday
  - Lens
  - Roentgen
  - Maxwell

## RESPUESTAS

e) *Plank*

9. *En los rayos X se debe utilizar como "rejilla" a un sólido porque los rayos X :*

- a) *Son muy luminosos*
- b) *Son muy largos*
- c) *Tienen  $\lambda$  amplia*
- d) *Tienen  $\lambda$  cero*
- e) *Tienen  $\lambda$  muy corta*

10. *El efecto Compton nos dice en relación a la transferencia de energía que:*

- a) *Al chocar un rayo X y un electrón existe amplitud de onda*
- b) *Al chocar dos rayos X se produce un rayo diferente*
- c) *Al chocar un rayo X y un electrón se transfiere energía*
- d) *a y b*
- e) *N.A.*

Pág. 2:

La velocidad de la luz es  $3 \times 10^8$  m/s

Pag. 5:

Hans Christian Oersted demostró que una corriente eléctrica que pasaba a través de un hilo era capaz de desviar la aguja de una brújula, así se demostró que electricidad y magnetismo no son fenómenos independientes.

Pag. 6:

(a) 4

(b) nos da a entender que pueden inducirse los campos magnéticos mediante flujos magnéticos o eléctricos variables.

Pág. 10: \_\_\_\_\_  
310°K

## CLAVES

solución de ejercicio

$$P = S = 1000 \text{ w/m}^2 = 3,3 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$$

Pág. 12:

$$\text{rayos gamma} = 10^{21} \text{ H}_2$$

$$\text{TV} = 10^8 \text{ H}_2$$

Pág, 13:

$$\lambda = c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} = 4,29 \text{ m}$$

$$F = 7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$$

Pág. 16:

Un cuerpo negro es aquel que absorbe totalmente la radiación que incide sobre él. 9.4 mM

Pág. 17:

$$\lambda_{\text{max}} = 0,2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{°K} = 9,4 \text{ } \mu\text{m}$$

1. c
2. Ley de Ampère – Maxwell
3. d
4. Maxwell
5. C
6. Absorbe
7. d
8. d
9. e
10. c

## BIBLIOGRAFÍA

Serway, Raymond A. 1997. *Física*. Tomo II. Saunders College Publishing.

Lehninger, Albert L. 1975. *Bioenergética*. Fondo Educativo Interamericano S.A.

Rojas, Ausberto S. F1994. *Física II*. Editorial San Marcos

Microsoft. 1999. *Enciclopedia Electrónica Encarta*. USA.

Hewitt, Paul G. 1995. *Física Conceptual*. Addison Wesley Iberoamericana.

Mac Donald, Simon G.G., y Burns, Desmond M. 1996. *Física para las ciencias de la vida y de la salud*. Fondo Educativo Interamericano S.A.



