

# **El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones**

**Bernardo Fontal**

**VII Escuela Venezolana**

**Para la Enseñanza de la Química**

# **El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones**

**Bernardo Fontal**

**Trino Suárez / Marisela Reyes/ Fernando Bellandi**

**Ricardo Contreras/ Isolda Romero**

El libro *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones* fue escrito especialmente como material de apoyo de uno de los Cursos ofrecidos en la *VII Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química*. La Escuela es un programa organizado por CELCIEC-ULA, diseñada en base a *Cursos de Actualización* dirigidos a los docentes de Química y afines de la Educación Básica, Media y Diversificada. La VII Escuela cuenta con el patrocinio de CELCIEC-ULA, Universidad de Los Andes (ULA), CDCHT-ULA, Facultad de Ciencias-ULA, Departamento de Química-Ciencias-ULA, y Fundación Polar.

Autor: **Bernardo Fontal**

e-mail: [bfontal@hotmail.com](mailto:bfontal@hotmail.com); [fontal@ula.ve](mailto:fontal@ula.ve)

Laboratorio de Organometálicos, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Trino Suárez, Marisela Reyes, Fernando Bellandi, Ricardo Contreras, Isolda Romero,

Reservados todos los derechos

© Bernardo Fontal

© Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química

## **HECHO EL DEPÓSITO DE LEY**

### **Depósito Legal:**

Editor: Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química

Coordinador de Edición: Bernardo Fontal

Mérida. Diciembre 2005

Reproducción: Editorial

Impreso en Venezuela

Printed in Venezuela

## INDICE

1. Introducción .....	4
2. El Espectro electromagnético .....	6
2.1 Como se mide el espectro: parámetros .....	7
2.2 Características del fenómeno .....	11
2.3 Origen del fenómeno .....	13
3. A. Regiones del espectro electromagnético .....	16
B. 1. Rayos- $\gamma$ . Origen y fuentes .....	17
2. Interacción con la materia .....	20
3. Aplicaciones de los rayos- $\gamma$ .....	23
C. 1. Rayos-X. Origen y fuentes .....	29
2. Interacción con la materia .....	34
3. Aplicaciones de los rayos- X .....	38
D. 1. Ultravioleta y Visible. Origen y fuentes .....	47
2. Interacción con la materia .....	57
3. Aplicaciones del UV-Vis .....	58
E. 1. Infrarrojo. Origen y fuentes .....	79
2. Interacción con la materia .....	85
3. Aplicaciones del infrarrojo .....	86
F. 1. Microondas. Origen y fuentes .....	98
2. Interacción con la materia .....	107
3. Aplicaciones de las microondas .....	107
G. 1. Ondas de radio. Origen y fuentes .....	117
2. Interacción con la materia .....	123
3. Aplicaciones de las ondas de radio .....	124
4. Consecuencias importantes del conocimiento y uso del espectro electromagnético .....	137
5 Bibliografía .....	141
6 Apéndices .....	142

# 1

## Introducción

El Universo tal como lo conocemos contiene materia y energía, pero sabemos que estos dos componentes están relacionados a través de la famosa ecuación de A. Einstein:  $E= mc^2$ , donde E representa la energía, m= la masa de la materia y  $c =$  la velocidad de la luz. La luz es una manifestación de la energía y está asociada a la radiación electromagnética que se encuentra en todo el universo y se describe como un campo electromagnético (con descripción ondulatoria) o como fotones (con descripción como partícula), tanto ondas como fotones se desplazan en el espacio a la velocidad de la luz. Todos estamos familiarizados y estamos en continuo contacto con la radiación electromagnética: cuando observamos una noche estrellada o caminamos durante el día, todo lo que vemos con nuestros ojos, el calor del sol en nuestra piel, la comunicación con nuestros amigos por el celular, cuando escuchamos la radio FM o cuando calentamos la comida en el horno de microondas, son situaciones donde la radiación electromagnética está jugando una parte importante y afectando nuestras vidas. La sociedad moderna a través de la ciencia y la tecnología ha sabido sacarle provecho a esa fuente de energía, como también a utilizarla para transmitir información, todo a la velocidad de la luz. Esto ha acercado cada vez más los confines del planeta.

Al estar tan asociados con la radiación electromagnética, es muy importante conocer este fenómeno cada vez mejor, no solo para estar conscientes de su uso, sino también para reconocer cuando conviene tomar precauciones debido a la posible interacción entre la radiación electromagnética y la materia. En este libro trataremos de presentar el fenómeno de la radiación electromagnética como una manifestación de la energía en el Universo, organizando la presentación utilizando

la estrategia de analizar el *espectro electromagnético* y sus diferentes regiones, el origen y fuentes de esa radiación, destacar el comportamiento radiación- materia para cada región, como también las diferentes aplicaciones que cada región ofrece a nuestra sociedad, principalmente las aplicaciones beneficiosas.

## 2

### **El espectro electromagnético.**

Al mirar al firmamento en una noche estrellada, nos llama la atención la inmensidad del número de estrellas que podemos observar y surge la pregunta sobre su naturaleza y ubicación en el Universo. Al analizar llegamos a la conclusión que estamos observando la luz que se originó en esa estrella, que de alguna manera se produjo, viajó por el espacio por mucho tiempo y finalmente llegó hasta nuestros ojos. O sea que estamos recibiendo la energía y la información del pasado, y solo en una pequeña región donde nuestros ojos son sensibles, de un espectro muy amplio que se difunde por todo el Universo. Asociamos esa luz estelar con esferas de materia muy masivas que producen luz visible, más otras radiaciones a través de procesos nucleares y cuyo número está en los billones de billones, asociadas en galaxias y cúmulos estelares muy diversos. La luz y otras radiaciones son manifestaciones de la energía, viajan por el espacio a la máxima velocidad permitida: la velocidad de la luz. La masa de las estrellas las asocia a otras estrellas y materia sideral a través de la fuerza de gravedad. Se sospecha la presencia de una forma diferente de materia, mucho más abundante que la materia ordinaria, denominada “materia negra” que igualmente responde a la gravedad, pero no tiene interacción con la luz o la radiación, razón por la cual no la podemos observar. Nosotros somos una especie viva que habitamos el tercer planeta, la Tierra, del sistema planetario de una estrella mediana, el Sol, que se encuentra en la parte periférica de una galaxia espiral, la Vía Láctea. El Sol nos provee directa o indirectamente de la mayor parte de la energía que los seres vivos requerimos en el planeta Tierra. La manera directa nos llega en forma de luz o radiación: usada por ejemplo en los procesos fotosintéticos de las cadenas alimenticias y la manera indirecta a través de procesos que ocurrieron con luz y radiación hace mucho

tiempo: en la formación de enlaces químicos de materiales que se convirtieron en los actuales combustibles fósiles, o que están ocurriendo actualmente: por ejemplo en los fenómenos climáticos o fuentes alternativas de energía (ej. eólica, solar, hidroeléctrica). Nuestro objetivo es entender mejor los fenómenos referentes a la luz y la radiación, tal como la recibimos desde el Sol y los otros astros siderales y tal como la podemos producir aquí en la Tierra.

La luz y radiación que hemos mencionado forman parte de un rango muy amplio, que no tiene límite inferior o superior, denominado el *Espectro Electromagnético*. Este espectro se ha dividido en diferentes regiones, pero que no tienen fronteras rígidas entre regiones adyacentes. Se utilizan dos parámetros comunes para referirse al espectro electromagnético: frecuencia y longitud de onda (Ver 2.1). La Figura 1 muestra las diferentes regiones en las que se ha dividido el espectro electromagnético. Cada una de las regiones será analizada separadamente mas adelante.

## **2.1 Como se mide el espectro electromagnético: Parámetros**

Una de las descripciones de la radiación electromagnética es que corresponde a *ondas electromagnéticas* (Ver 2.2 , Maxwell) que constan de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que son mutuamente perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. La Figura 2 nos muestra una representación de la onda electromagnética polarizada en el plano, desplazándose en la dirección  $y$ . El campo eléctrico está representado por el vector  $\mathbf{E}$  y está oscilando en la dirección  $z$  (ó  $-z$ ); el campo magnético está representado por el vector  $\mathbf{B}$  y se encuentra oscilando en la dirección  $x$  (ó  $-x$ ) (observe que

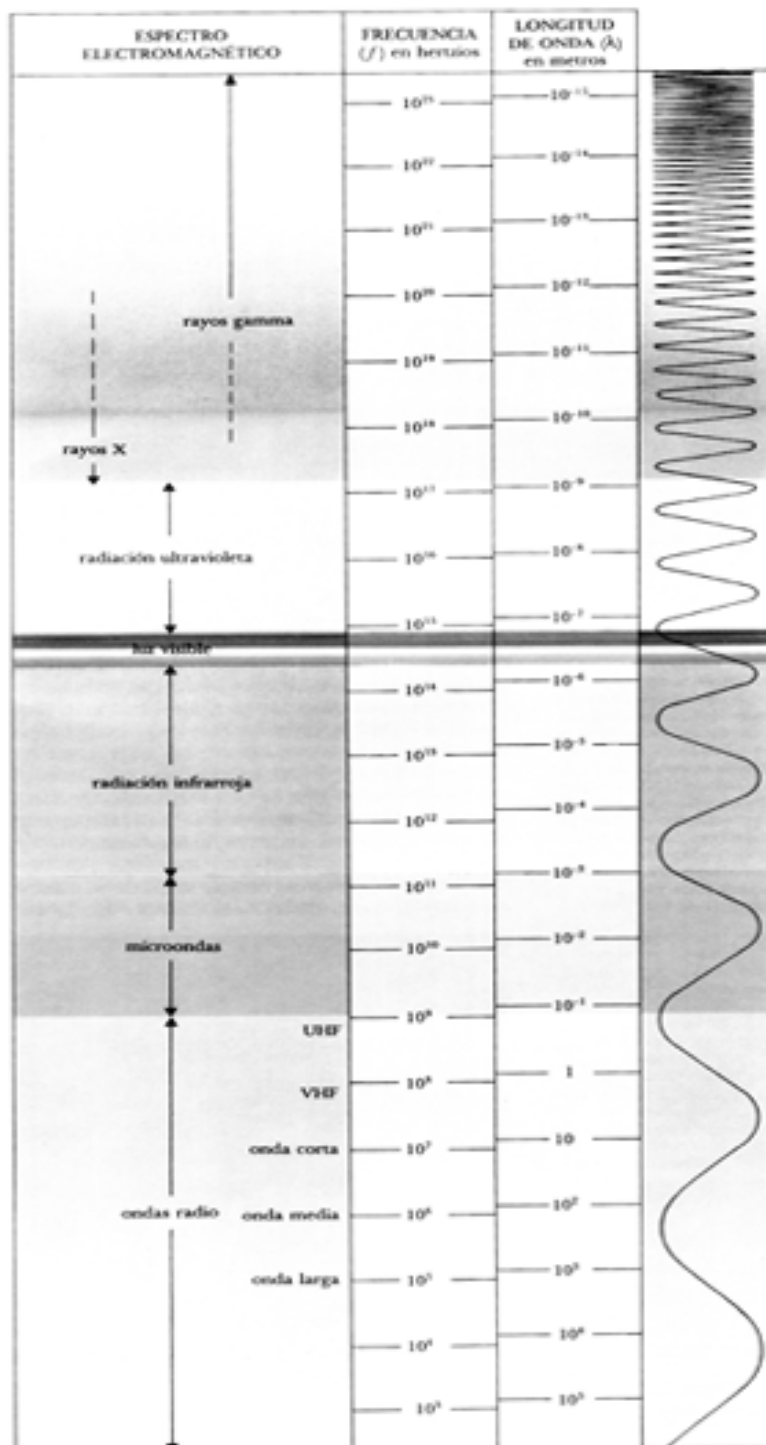


Figura 1. El Espectro Electromagnético





Figura 2. Onda electromagnética. Luz polarizada en el plano. **E**, campo eléctrico; **B**, campo magnético; y, dirección de propagación.

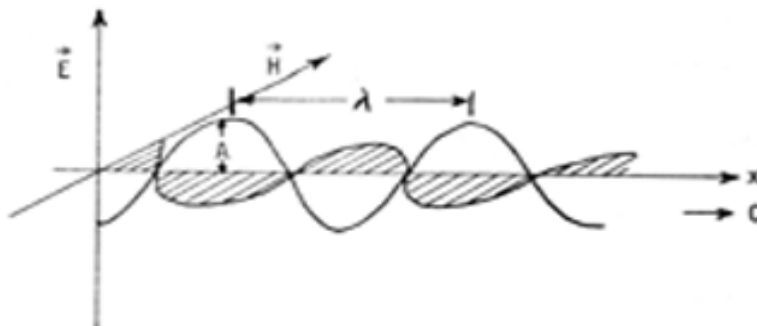


Figura 3. Parámetros de onda electromagnética. **E**, campo eléctrico; **H**, campo magnético; A, amplitud de la onda;  $\lambda$ , longitud de onda; c, velocidad de la onda; x, dirección de propagación.

ambas oscilaciones son perpendiculares a la dirección y). Observe también que la oscilación del campo eléctrico **E** y el campo magnético **B** va desde un valor de cero amplitud (Ver Figura 3, valor de A= *amplitud de la onda*, **E**, campo eléctrico; **H**, campo magnético) hasta un máximo en la dirección positiva (coordenada z ó x),

luego empieza a disminuir hasta cero y continúa hasta un mínimo en la dirección negativa (coordenada  $-z$  ó  $-x$ ). La *longitud de onda*,  $\lambda$ , (Ver Figura 3) es la distancia entre crestas sucesivas (o la distancia entre máximo y máximo de la onda; o entre mínima y mínima). Un *ciclo* corresponde a la parte de la onda que hay entre dos crestas sucesivas. La Figura 2 muestra  $1\frac{1}{2}$  ciclos. En un ciclo, la amplitud de la onda vuelve a su punto de partida (en este caso, al valor de cero amplitud) después de oscilar hasta el punto máximo y el punto mínimo. La longitud de onda es la longitud de un ciclo de la onda. La *frecuencia* (representada por  $f$  ó  $\nu$ ) de la onda es el número de ciclos que pasan por un punto dado en la unidad de tiempo. El tiempo que tarda en pasar un ciclo o una longitud de onda es  $1/\nu$ . Si la velocidad de la onda es  $c$  (ver Figura 3), y como distancia = velocidad x tiempo, entonces:  $\lambda = c(1/\nu)$  ó  $\lambda \nu = c$  ó  $\nu = c/\lambda$ .

La frecuencia  $\nu$  (ó  $f$ ) se da en unidades de 1/seg ( $s^{-1}$ ). Esta unidad corresponde a 1 **herzio** (Hz) (sistema SI).  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ . También se utilizan:  $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$ ;  $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$ ;  $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$ . Las unidades de longitud de onda comunes, depende de la región del espectro que se esté analizando. Para las ondas de baja frecuencia (Ver Figura 1, ondas de radio, microondas,  $10^4 - 10^{10} \text{ Hz}$ , longitud de onda en metros) se utilizan valores de  $\lambda$  en **metros** (m) ó en **centímetros** (cm). Para ondas de alta frecuencia (Ver Figure 1, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos-X, rayos gamma, frecuencia:  $10^{12} - 10^{22} \text{ Hz}$ ) se utilizan valores de  $\lambda$  en **micrómetros**,  $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ; **nanómetros**,  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ \AA}$  y en **angstrom**,  $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m}$ . El *número de onda*,  $\tilde{\nu} = 1/\lambda$  (en  $\text{cm}^{-1}$ ) es el número de ciclos de la onda en 1 cm de longitud. La velocidad de la luz,  $c$ , en el espacio vacío, es una constante de la naturaleza y es la misma para cualquier región del espectro electromagnético, o sea que no varía ni con la frecuencia,  $\nu$ , ni con la longitud de onda,  $\lambda$ . De acuerdo a la teoría de la relatividad de A. Einstein, la luz no necesita un medio para desplazarse y la velocidad máxima en el universo

corresponde a la velocidad de la luz. El valor aceptado de la velocidad de la luz es  $c = 299792.458 \text{ Km/s}$  ( $2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) (188282 millas/seg), o sea cerca de 300 000 Km/s .

La velocidad de la luz en otro medio o material transparente puede ser diferente que la velocidad de la luz en el espacio vacío, y depende de la característica del material y de la frecuencia de la luz. La relación entre las dos velocidades,  $c/c_b$  , corresponde al *índice de refracción*,  $n_b = c/c_b$ . Por ejemplo para la línea amarilla del Na (línea D del sodio, 589.3 nm):  $n_{\text{aire}} = 1.0003$ ;  $n_{\text{agua}} = 1,33$ ;  $n_{\text{vidrio}} = 1.5 -1.9$ .

## 2.2 Características del fenómeno:

Debido a su comportamiento en muchos experimentos iniciales con la luz visible, su descripción como una onda o sea su comportamiento ondulatorio fue el mayormente aceptado. Cuando la luz visible u otra radiación electromagnética choca con una superficie metálica pulida ocurre una *reflexión*. Dependiendo del ángulo de incidencia, cuando la luz visible choca con la superficie de un material transparente como el agua o el vidrio, ocurre una *refracción*, o sea la luz cambia de dirección en el material, según el valor del *índice de refracción*,  $n_b$ , de dicho material. La característica de reflexión y refracción de la luz ha permitido ser aplicada en artefactos importantes como el *prisma* que permite separar los colores de la luz blanca, en la gran variedad de *lentes*, y *parabólicas* que permiten concentrar o dispersar la luz y aplicarlo en *lupas*, *gafas*, *cámaras fotográficas*, *microscopios*, *telescopios* y otros artefactos ópticos útiles. Cuando la luz pasa a través de agujeros o rendijas muy pequeños o pasa a través de materiales diferentes muy delgados (todos del tamaño de la longitud de onda de la luz, como por ejemplo una película de jabón) se observa el fenómeno de *difracción* o *interferencia* que produce bandas claras y oscuras o coloreadas. Este fenómeno

tiene aplicaciones como en una *red de difracción* en espectrofotómetros o la *difracción de rayos-X* por un cristal (ver mas adelante). Cuando la luz choca con partículas muy pequeñas como la niebla o el polvo muy fino, ocurre el fenómeno de *dispersión*, cuyo grado depende de la frecuencia de la luz.

Todos los fenómenos descritos arriba, fueron explicados utilizando la definición ondulatoria de la luz. Se consideró que la luz era una manifestación de una *onda electromagnética* que contenía un campo *eléctrico* y un campo *magnético* oscilante, mutuamente perpendiculares y perpendicular a la dirección de propagación, que se desplazaba a la velocidad de la luz,  $c$ . (Ver Figura 2 y 3). Esta descripción permite describir la *polarización* de la luz. Si la descripción es que la oscilación de los campos eléctrico y magnético es en un solo plano, entonces la luz es una onda *polarizada en el plano* (como se muestra en las Figuras 2 y 3). Esta luz polarizada es característica de los *láseres* (ver mas adelante). Si no hay una polarización preferencial, entonces la luz es *circularmente polarizada*, siendo esta la característica de la mayoría de las fuentes de radiación. Una lente o placa *Polaroid* permite seleccionar una orientación particular de una luz no polarizada. La radiación electromagnética fue relacionada con el comportamiento de cargas eléctricas en movimiento a través de las ecuaciones del electromagnetismo propuestas por J.C. Maxwell (Ver Apéndice 1) que relaciona los campos eléctricos y magnéticos.

Algunos experimentos tales como la radiación de un *cuerpo negro* y el *efecto fotoeléctrico* no pudieron ser explicados por el modelo ondulatorio de la radiación, siendo necesario proponer una alternativa para su explicación. La propuesta vino de Max Plank quien propuso que la emisión de radiación de un cuerpo negro estaba cuantizada y de A. Einstein quien propuso que la luz estaba conformada por

*fotones* que se comportaban mas como partículas y viajaban a la velocidad de la luz y su energía dependía de su frecuencia:  $E= hv$  , donde  $h =$  constante de Plank =  $6.625 \times 10^{-34}$  joule-seg.

El comportamiento dual onda-partícula es la mejor descripción de la radiación electromagnética actualmente. Dependiendo del tipo de experimento realizado, el comportamiento de la luz se puede explicar como ondulatorio (ondas electromagnéticas) o como partículas (fotones). En la teoría de la electrodinámica cuántica (QED), los fotones corresponden a la partícula que transmite la fuerza electromagnética entre partículas con cargas eléctricas: los fotones serán absorbidos y emitidos por estas partículas cargadas.

### **2.3 Origen del fenómeno:**

La producción de la radiación electromagnética es un proceso que se lleva a cabo en todos los confines del Universo. A través del espacio, nos llega radiación electromagnética en todas las regiones del espectro desde todas las fuentes estelares y de otros objetos siderales. Cargas eléctricas en movimiento generan radiación electromagnética. Partículas cargadas (como electrones o protones) que son aceleradas en los aceleradores de partículas producen *radiación sincrotrón*, que hoy día tiene aplicaciones importantes. La materia calentada a altas temperaturas produce radiación electromagnética (los átomos vibrando se convierten en pequeños osciladores). Igualmente la materia a temperaturas de millones de grados en las estrellas produce radiación electromagnética. La materia nebulosa en el espacio, sometida a fuertes campos magnéticos también produce radiación electromagnética, como también la materia sometida a fuertes campos gravitacionales (como cerca de los agujeros negros) produce radiación electromagnética.

Los átomos, moléculas y materiales interactúan con la radiación electromagnética (o fotones) y dependiendo de la frecuencia pueden ocurrir diferentes procesos en los cuales los núcleos, los electrones o los átomos absorben los fotones y ocurre una *transición cuantizada* desde los estados fundamentales comúnmente a estados excitados (o en general entre dos diferentes estados); a estos estados corresponde un determinado nivel de energía, siendo necesaria una correspondencia entre la energía de los fotones y la diferencia de energía entre los dos estados involucrados en el proceso. Igualmente pueden ocurrir los procesos de emisión de fotones desde los estados excitados a los estados fundamentales. El proceso de emisión también puede ser estimulado como ocurre en el fenómeno *laser*. Estos procesos se representan en la Figura 4. La energía del fotón respectivo corresponde a la diferencia en energía entre los dos niveles o estados involucrados en el proceso:  $\Delta E = E_{\text{excitado}} - E_{\text{fundamental}} = E_n - E_m = h\nu$ . Estos procesos tanto de absorción como de emisión son utilizados en las diferentes *espectroscopías*, que proveen mucha información sobre el comportamiento de la materia. Los procesos mostrados en la Figura 4 corresponden a transiciones sencillas que involucran solo dos estados. En la práctica, los procesos pueden ser más complejos debido a que pueden involucrar una variedad de estados para un mismo átomo o material o los diferentes átomos en el material se encuentran en una variedad de estados disponibles para ser excitados por la radiación incidente. A pesar de las complejidades que esto puede introducir en la interpretación de los resultados obtenidos en las diferentes espectroscopias, la información obtenida es altamente satisfactoria.

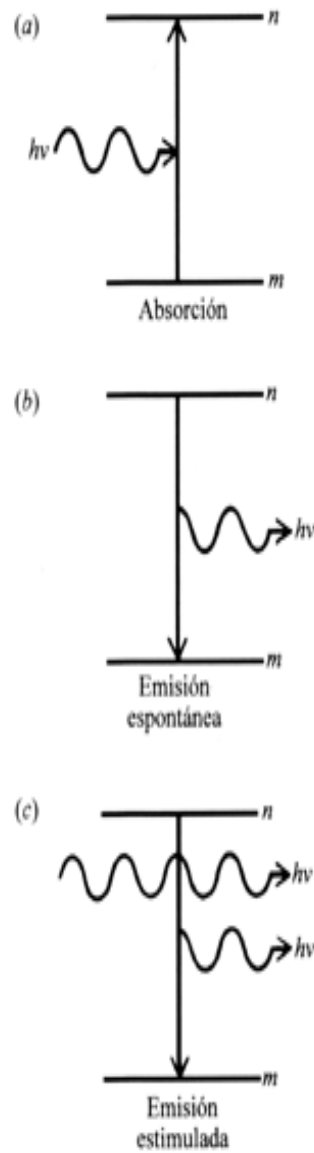


Figura 4. Transiciones cuantizadas entre dos estados. a) Absorción entre el estado  $m$  y  $n$ . b) Emisión espontánea entre el estado  $n$  y  $m$ . c) Emisión estimulada entre el estado  $n$  y  $m$ . ( $\Delta E = E_n - E_m = h\nu$ )

### 3.

#### 3A. Regiones del espectro electromagnético

Como vimos en la sección 2.1 y la Figura 1, el espectro electromagnético ha sido dividido en diferentes regiones cuyos límites son más o menos arbitrarios y dependen en buena medida en nuestra capacidad de poder producir o detectar esas regiones del espectro. El descubrimiento y especialmente el desarrollo de las aplicaciones prácticas de las diferentes regiones ha dependido de la capacidad tecnológica de producir fuentes de radiación apropiadas y detectores o medidores sensibles a esas respectivas regiones. En la Tabla 1 se indican de nuevo los rangos aproximados de frecuencias (en Hz ó ciclos/seg) y longitudes de onda (en metros) y energías promedio (eV) de las diferentes regiones del espectro electromagnético.

Tabla 1. Espectro electromagnético (Rangos aproximados)

<b>Región</b>	<b>Frecuencia(Hz ó ciclos/s)</b>	<b>Longitud de onda (m)</b>	<b>Energía del fotón(eV,<sub>promedio</sub>)</b>
Rayos gamma	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{-11} - 10^{-14}$	$10^{10}$
Rayos-X	$10^{17} - 10^{20}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	$10^5$
Ultravioleta	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^3$
Visible	$10^{14} - 10^{15}$	$4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$	1
Infrarrojo	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{-3}$
Microondas	$10^9 - 10^{11}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	$10^{-5}$
Ondas de radio	$10^3 - 10^9$	$10^5 - 10^{-1}$	$10^{-10}$
Corriente alterna	$10^2 - 10^3$	$10^7 - 10^5$	$10^{-15}$



### 3B-1. Rayos- $\gamma$ . Origen y fuentes

Los rayos gamma ( $\gamma$ ) corresponden a la región de fotones más energéticos del espectro electromagnético, con energías en MeV ( $10^6$  eV) y pueden llegar a  $10^{10}$  eV, o sea son 10000 a 100000000 veces más energéticos que fotones de luz visible. Los rayos  $\gamma$  están asociados a los *rayos cósmicos*, que son partículas cargadas altamente energéticas que chocan con la atmósfera terrestre y vienen desde los confines del Universo. El comportamiento de los rayos cósmicos con la materia hacen difícil la detección de los rayos  $\gamma$  puros. Los rayos  $\gamma$  que nos llegan del espacio vienen de procesos que incluyen interacción de los rayos cósmicos con los gases interestelares, las explosiones de *supernovas* y de la interacción de electrones energéticos con campos magnéticos muy fuertes. Los rayos  $\gamma$  del espacio son mayormente absorbidos por la atmósfera terrestre. (Ver 3B-2). Se observan muchas fuentes de rayos  $\gamma$  en el espacio (un “gamma-ray background”) derivado de la interacción de los rayos cósmicos con el gas que se encuentra entre las estrellas. Se han detectado además “estallidos” de rayos  $\gamma$  en todas direcciones, que duran desde fracciones de segundo a minutos, centellean y luego se desvanecen. El origen de estos eventos, entre los más poderosos eventos del Universo, es motivo de controversia ya que algunos científicos consideran que se originan en un halo de *estrellas de neutrones* que circundan nuestra Galaxia, mientras otros argumentan que se originan fuera de nuestra Galaxia a distancias cosmológicas. Los rayos  $\gamma$  en la región de energías de 1 a 30 MeV sirven para detectar rayos que tienen su origen en las líneas de emisión nucleares, las emisiones de *pulsares*, *galaxias activas* y *llamaradas solares (solar flares)*. Aquí en la tierra, los rayos  $\gamma$  se pueden producir en las explosiones de bombas nucleares y en la desintegración nuclear de sustancias radioactivas. Los rayos  $\gamma$ , conjuntamente con las partículas  $\alpha$  y

partículas  $\beta$ , corresponden a las radiaciones emitidas por átomos radioactivos. Los núcleos de los elementos normalmente son estables y sus partículas se encuentran en su estado fundamental. Pero los núcleos también poseen estados excitados y las diferencias de energía están en el rango de los rayos  $\gamma$ . Algunos elementos o los isótopos de algunos elementos poseen sus núcleos en estados excitados y son susceptibles de emitir radiación (o emitir partículas) y descomponerse a otros elementos mas estables.

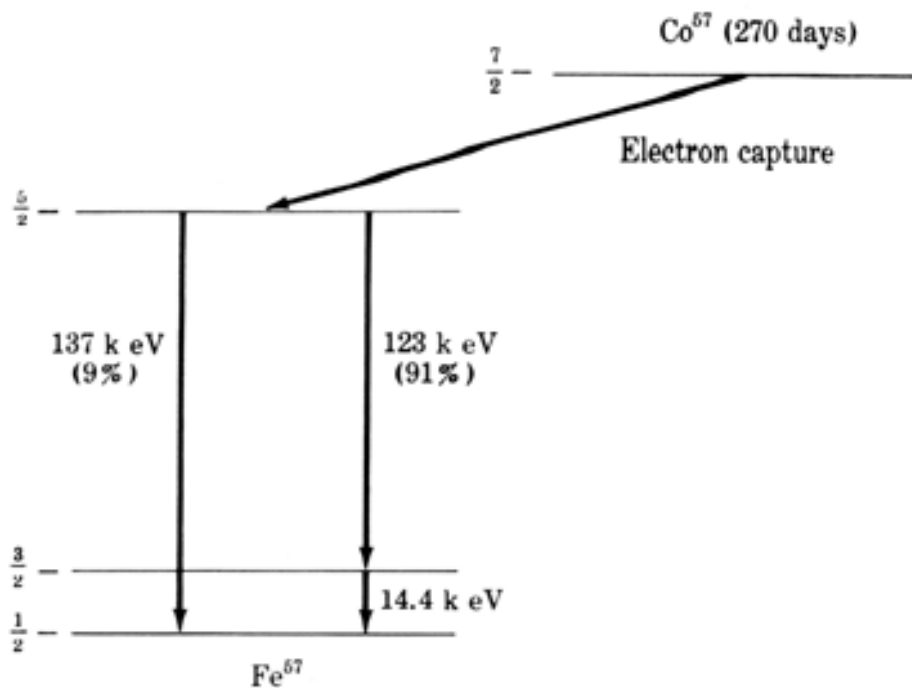


Figura 5. Esquema de descomposición gamma del  $^{57}\text{Fe}$ .

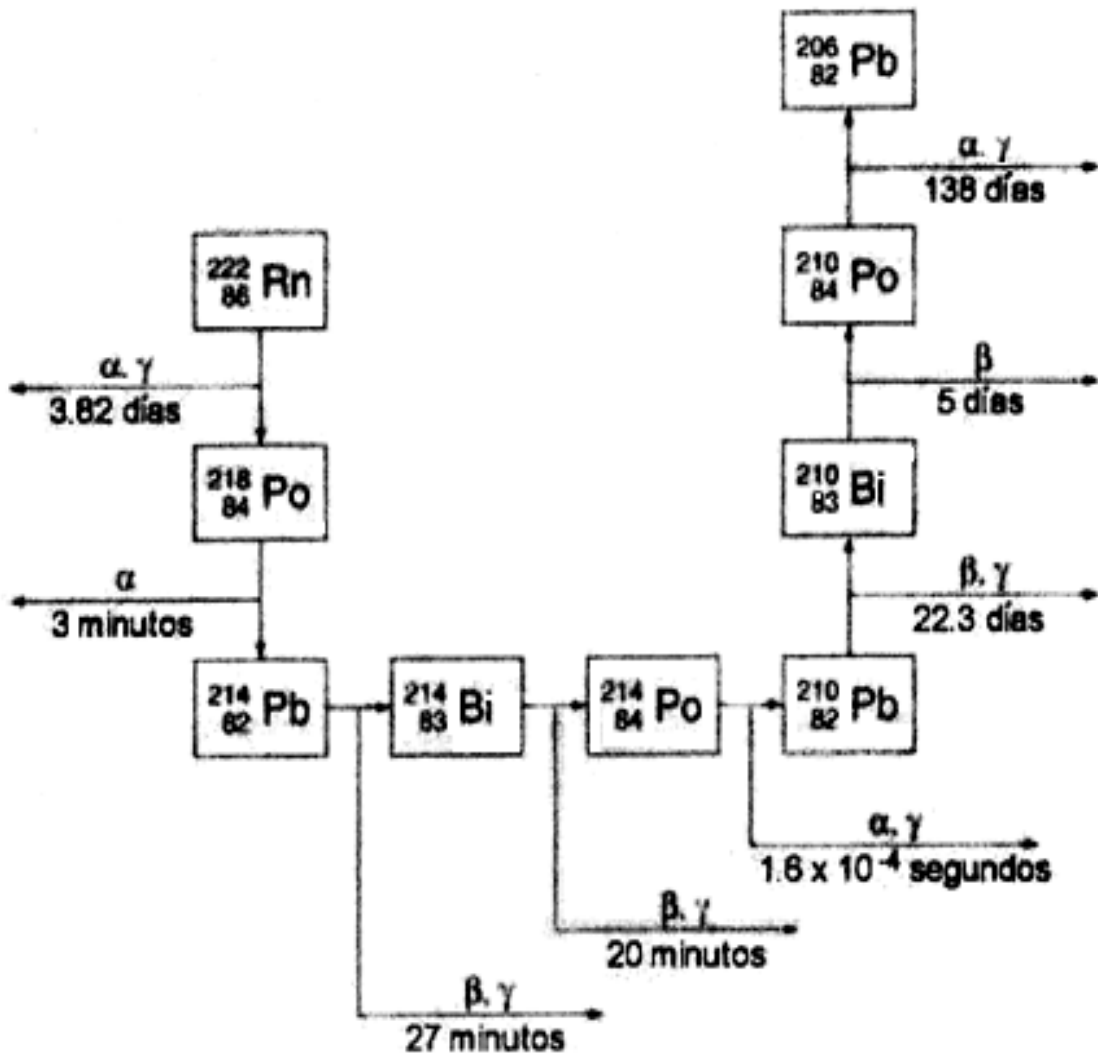


Figura 6. Ruta de descomposición radioactiva del gas radón

En la Figura 5 se muestra el esquema de descomposición radioactiva para el isótopo inestable  $^{57}\text{Co}$  al isótopo estable  $^{57}\text{Fe}$ , a través de captura de electrón con una vida media de 270 días. El isótopo  $^{57}\text{Fe}$  queda en un nivel nuclear excitado (el

nivel  $5/2$ ) que luego decae por emisión retrasada de rayos  $\gamma$  (fluorescencia de rayos-  $\gamma$ ). Una transición ( $5/2 \rightarrow 1/2$ ) emite un rayo  $\gamma$  de 137 KeV con 9% de probabilidad y otra transición a un estado intermedio ( $5/2 \rightarrow 3/2$ ) de otro rayo  $\gamma$  de 123 KeV, seguido de otra transición de menor energía ( $3/2 \rightarrow 1/2$ ), 14.4 KeV; este proceso con 91% de probabilidad. La radiación  $\gamma$  emitida puede ser absorbida por resonancia por otro núcleo de  $^{57}\text{Fe}$  en la espectroscopia Mössbauer (ver abajo). En la Figura 6 se presenta la ruta de descomposición radioactiva del gas radón. El isótopo  $^{222}_{86}\text{Rn}$  es radioactivo que viene de descomposición radioactiva de minerales como compuestos de uranio y torio y presenta un problema de salud al acumularse en los sótanos de casas en zonas de rocas graníticas ya que es un gas mas pesado que el aire. Como se nota en la ruta de descomposición ocurren los tres tipos de radiaciones ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) a través de varios isótopos de Po, Pb y Bi con diferentes vidas medias hasta llegar al isótopo  $^{206}_{82}\text{Pb}$  que es estable. El problema de salud surge de la exposición a las diferentes radiaciones del proceso de desintegración radioactiva.

### **3B-2. Interacción con la materia**

Debido a su alta energía, los rayos  $\gamma$  tienen un alto poder penetrante a través de la materia, pero si chocan con los núcleos o las partículas elementales tienen una reacción importante. El tipo de reacción predominante depende de la energía de los rayos  $\gamma$ . El rayo  $\gamma$  puede ser fotoabsorbido por el material. Para energías entre 1 y 30 MeV el proceso dominante es la *dispersión Compton*. Esta dispersión ocurre cuando el fotón se “choca” con un electrón y le transfiere algo de energía a la partícula cargada. El fotón y el electrón son dispersados en diferentes ángulos. Esto se muestra en la Figura 7. A energías superiores a 30 MeV, el proceso más importante en la mayoría de los materiales es la *producción de pares*. El rayo  $\gamma$  trae suficiente energía que es capaz de producir un par *electrón/positrón* como se

muestra en la Figura 8. Las dos partículas salen en diferentes direcciones. El proceso inverso de interacción entre un electrón y un positrón (su antipartícula) produce el *aniquilamiento* de las partículas y se produce un rayo  $\gamma$ .

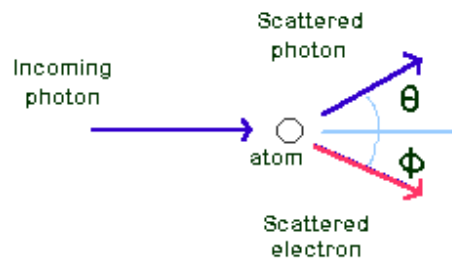


Figura 7. Dispersión Compton entre un rayo  $\gamma$  y un electrón.

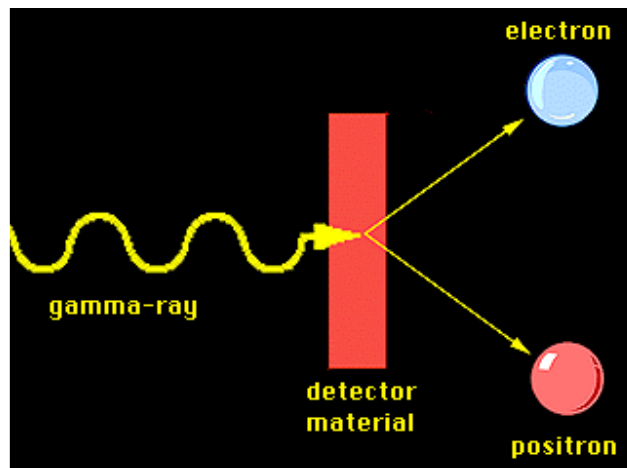


Figura 8. Producción de par electrón/ positrón al interactuar un rayo  $\gamma$  con un material.

Los rayos  $\gamma$  interactuando en la atmósfera producen una *lluvia aérea de partículas*. Al fotón original le ocurre una *producción de pares* en la parte alta de la atmósfera. El electrón y positrón producidos pierden energía a través de emisión *bremsstrahlung* (radiación de amplio espectro producida por desaceleración de las partículas en la atmósfera) y *dispersión Compton*, que produce fotones energéticos que a su vez producen otros pares electrón/ positrón y continúan en cascada hacia las partes bajas de la atmósfera, hasta que pierden toda su energía. Las partículas

energéticas producidas están viajando cerca de la velocidad de la luz, a una velocidad mayor que la luz en el aire. La *polarización* resultante de los átomos locales produce una radiación azulada débil conocida como *radiación Cerenkov*. En una lluvia de partículas se puede formar una región de radiación Cerenkov como de 200 metros de diámetro que puede ser detectada por detectores especiales. Este fenómeno se muestra en la Figura 9. El tipo de “lluvia de partículas” debido a los rayos  $\gamma$  es generalmente mas compacto que la “lluvia de partículas” generado por un rayo cósmico que es mas ancho.

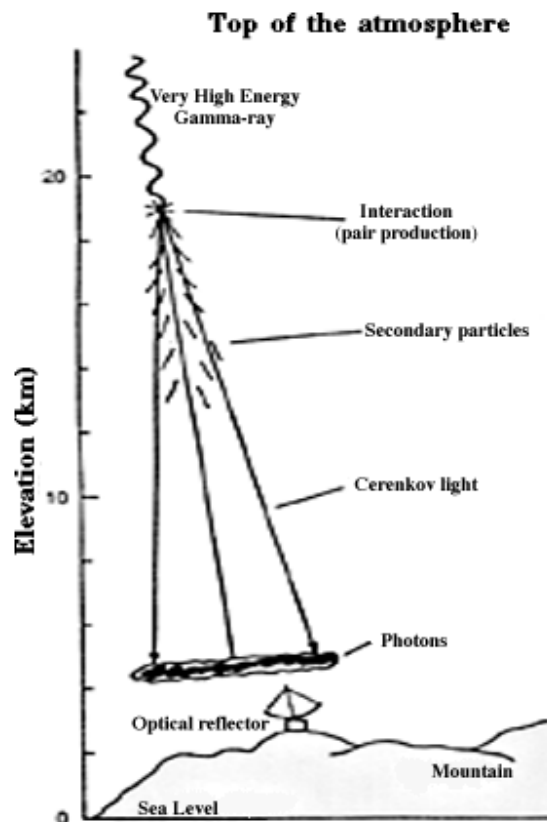


Figura 9. Producción de radiación Cerenkov por la “lluvia” de partículas producidas por rayos  $\gamma$  en la atmósfera.

### 3B-3. Aplicaciones de los rayos- $\gamma$

Los rayos  $\gamma$  simplemente pasan a través de la mayoría de los materiales y no pueden ser reflejados por espejos como pueden ser los fotones ópticos y aun los fotones de rayos-X. Las herramientas de la física de alta energía se prestan para detectar y caracterizar los fotones de rayos  $\gamma$  que permite a los científicos observar el cosmos hasta energías de 1 TeV (1 000 000 000 000 eV, comparado con un fotón óptico que tiene energías de unos pocos eV) o más. Desafortunadamente, los detectores de rayos  $\gamma$  tienen que copar con gran contaminación de los *rayos cósmicos*, partículas elementales que vienen de todas partes del espacio, y que afectan los detectores de la misma manera que los rayos  $\gamma$ . El ruido de fondo de rayos cósmicos tiene que suprimirse para obtener una buena señal fotónica  $\gamma$ , esto se logra con electrónica de anticoincidencia y tiempo de vuelo. Existen varios tipos de detectores que utilizan las interacciones que los rayos  $\gamma$  tienen con la materia, principalmente la producción de partículas o la producción de fotones (ver 3B-2). Los detectores pueden ser: a) De centelleo. b) De estado sólido. c) De dispersión Compton. d) De producción de pares. e) De radiación Cerenkov.

Un método popular de detección de los rayos  $\gamma$  es el uso de *crisales de centelleo*. Un centelleador es un material que emite fotones de baja energía (generalmente en la región visible) cuando es chocado con una partícula de alta energía. El detector de centelleo no detecta el rayo  $\gamma$  directamente, sino las partículas cargadas producidas en el cristal que al tener una interacción con el cristal, emiten fotones. Estos fotones de menor energía son subsecuentemente colimados y detectados por *tubos fotomultiplicadores* (ver abajo). Este esquema se muestra en la Figura 10. Los cristales de centelleo mas utilizados son cristales de sales inorgánicas como yoduro de sodio (NaI) o yoduro de cesio (CsI), usualmente dopados con “activadores” como talio (Tl) o sodio (Na).

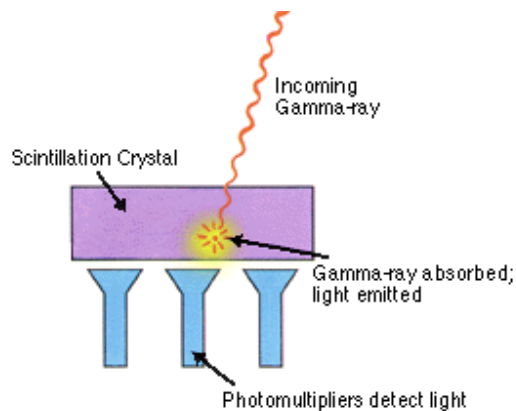


Figura 10. Esquema de un detector de crystal de centelleo.

Los detectores de *estado sólido* utilizan materiales avanzados como los semiconductores, tales como germanio (Ge) o telurio de cadmio y zinc (CdZnTe), que ofrecen mejor resolución de la energía, menor ruido y mejor resolución espacial, pero requiere ser enfriado a temperaturas bajas. En estos materiales el rayo  $\gamma$  produce ionización fotoeléctrica al crear un par *electrón/ hueco*.

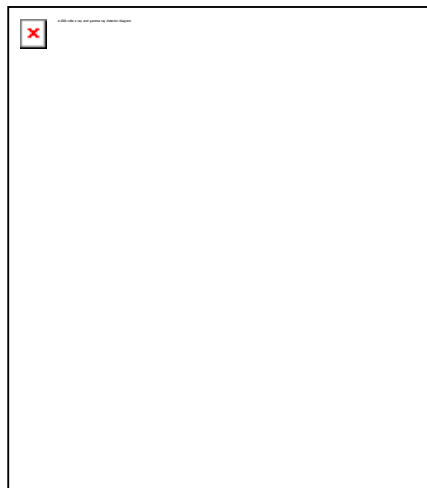


Figura 11. Detector de CdTe con ventana de Be y enfriado termoeléctricamente por el efecto *Peltier*.



Otro detector de estado sólido utiliza el CdTe como detector (Ver Figura 11). El rayo  $\gamma$  crea un par electrón/ hueco en promedio por cada 4.43 eV perdidos en el CdTe. La pérdida de energía puede estar dominada por el efecto fotoeléctrico o por dispersión Compton, dependiendo de la energía del rayo  $\gamma$  incidente. En la Figura 12 se observa el espectro del  $^{57}\text{Co}$  obtenido con el detector de CdTe. (ver Figura 5, para los niveles nucleares involucrados).

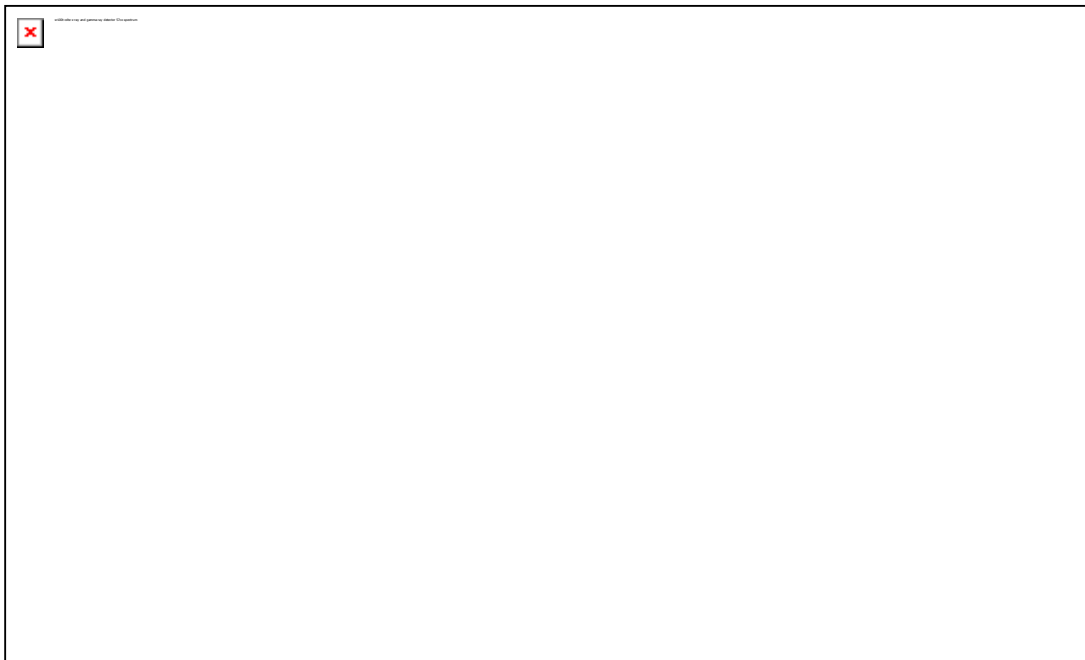


Figura 12. Espectro de rayos  $\gamma$  del  $^{57}\text{Co}$  medido con un detector de CdTe.

La espectroscopia de rayos  $\gamma$  (y rayos-X, ver abajo) es de mucha importancia en estudios de astrofísica y cosmología, ya que esta región del espectro electromagnético ofrece mucha información sobre procesos interesantes que están ocurriendo en el Universo. Se utilizan varios tipos de telescopios de rayos  $\gamma$  que aprovechan las interacciones de estos fotones con la materia. El telescopio de dispersión Compton se muestra en la Figura 13. Este consta de dos niveles. En el primer nivel centelleadores detectan los electrones que fueron dispersados por la

dispersión Compton. Los fotones dispersados en este proceso viajan al segundo nivel donde son absorbidos completamente por un material de centelleo. Fotomultiplicadores determinan los puntos de interacción en los dos niveles y la cantidad de energía depositada en cada nivel.

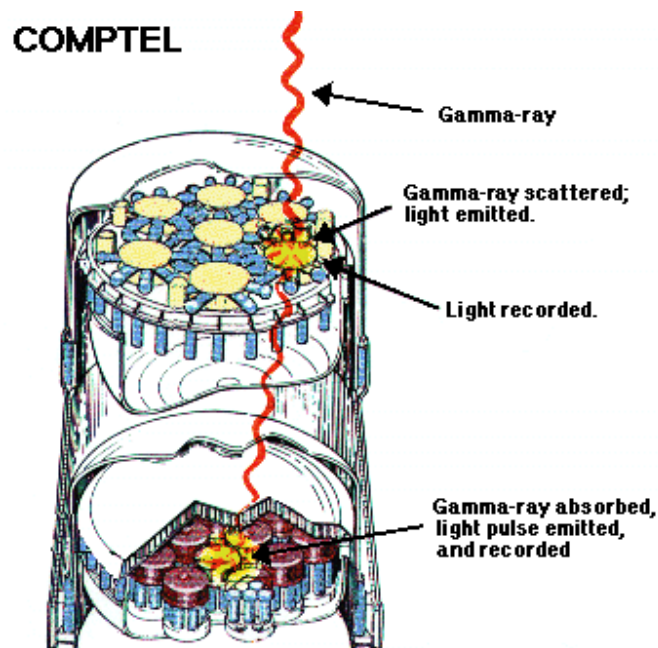


Figura 13. Telescopio de rayos  $\gamma$  utilizando dispersión Compton.

Otro tipo de telescopio de rayos  $\gamma$  utiliza la detección de las partículas electrón/positrón derivadas del proceso de producción de pares. Este tipo de telescopio se muestra en la Figura 14. El rayo  $\gamma$  es absorbido por un material de  $Z$  (número atómico) alto como el plomo (Pb). Allí se produce el par electrón/positrón. Mas abajo está una *cámara de chispas* llena de un gas y alambres entrecruzados. Al pasar las partículas cargadas del par producido, ionizan el gas, y los alambres atraen los electrones libres y producen una chispa, siguiendo la trayectoria de las dos partículas. Otro tipo de material de seguimiento de las partículas electrón/positrón son *láminas de Si* que contienen dos planos de Si, uno orientado en la

dirección “x” y otro en la dirección “y”. Al final del aparato, se detectan las partículas y su energía con detectores de cristal de centelleo y fotomultiplicadores.

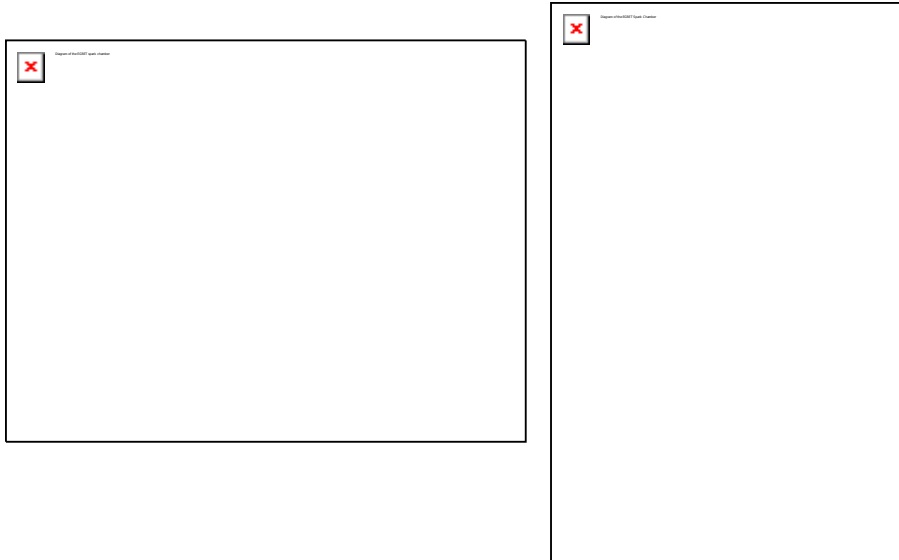


Figura 14. Telescopio de rayos  $\gamma$  de producción de pares y cámara de chispas.

Para evitar el ruido producido por los rayos cósmicos, el aparato tiene un recubrimiento externo que si detecta partículas cargadas, no permite que la cámara de chispa se dispare. También tiene un sistema de tiempo de vuelo que verifica los tiempos que deben tomar las partículas del par producido.

Además de los estudios de espectroscopía de rayos  $\gamma$  de alta resolución para la investigación astronómica, los rayos  $\gamma$  tienen bastantes usos en la industria y en medicina. Debido a su poder penetrante, los rayos  $\gamma$  se utilizan para revisar piezas metálicas y determinar fallas. Igualmente los detectores sirven para revisar cargamentos y verificar la presencia de materiales radioactivos, para monitorear sitios de desechos peligrosos y contaminación ambiental. En la medicina, las radiaciones  $\gamma$  para radioterapia son muy utilizadas para tratamiento de ciertos tipos de cáncer. Se utiliza la “bomba” de  $^{57}\text{Co}$  como fuente de radiación. Debido a su capacidad de eliminar bacterias patógenas, se ha propuesto el tratamiento de

alimentos (principalmente vegetales) con rayos  $\gamma$  para que no se degraden sin refrigeración y duren bastante tiempo sin descomponerse.

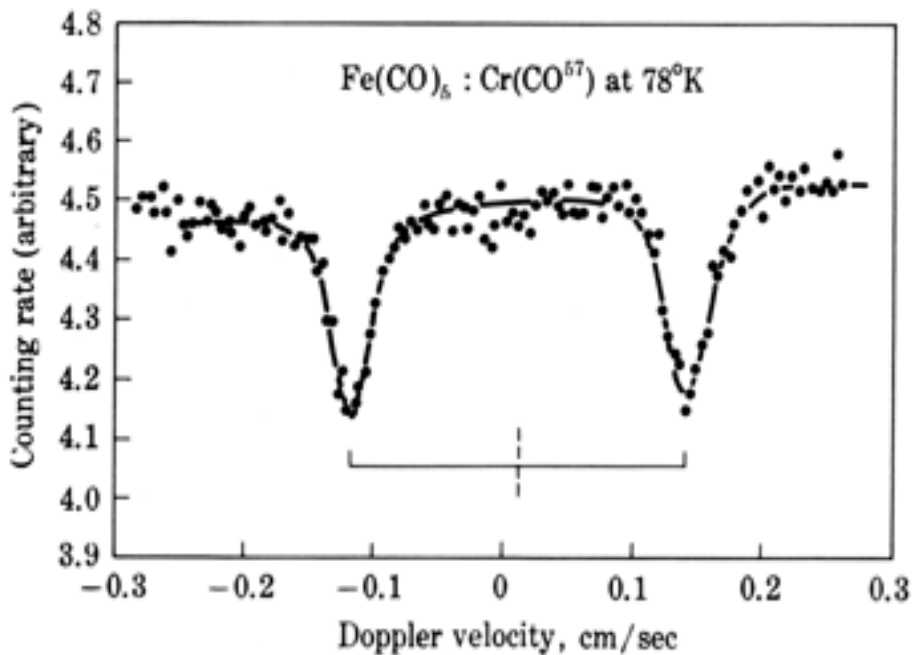


Figura 15. Espectro Mössbauer del  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  con fuente  $\text{Cr}(^{57}\text{Co})$ .

Una aplicación interesante de los rayos  $\gamma$  es en la espectroscopia Mössbauer para algunos elementos como el  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{195}\text{Pt}$ . El más estudiado es el  $^{57}\text{Fe}$  debido a que existe la fuente de  $^{57}\text{Co}$ . En el experimento, la fuente (en una matriz de estado sólido) se hace mover (a velocidades de cm/seg) y por el efecto Doppler se hace coincidir la energía con el absorbedor en estado sólido. El detector determina el grado de absorción de los rayos  $\gamma$  por la muestra. En esta espectroscopia se determinan parámetros (como desplazamiento isomérico, desdoblamiento cuadrupolar, desdoblamiento Zeeman nuclear; Ver Apéndice 2)

relacionados con las características de enlace, estado de oxidación y aspectos estructurales de los elementos específicos en la muestra. En la Figura 15 se muestra el espectro Mssbauer del  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ , que muestra el desdoblamiento cuadrupolar del compuesto (distancia entre los dos picos).

### 3C-1. Rayos-X. Origen y fuentes

Los rayos X (o rayos Rntgen en honor a su descubridor) es otra región del espectro electromagnético cuya longitud de onda ( $\lambda$ ) está en el rango de 10 nanometros a 100 picometros ( $10^{-8}$  a  $10^{-11}$  cm) y energías entre 200 y 100000 eV. Es una forma de radiación ionizante, por lo que puede ser peligrosa. Rayos X con longitud de onda mayor que 0.1 nm se llaman *rayos X suaves*. A longitudes de onda menores se llaman *rayos X duros*. Estos rayos X duros se solapan con los rayos  $\gamma$  de baja energía. La distincn entre los dos rayos depende es de la fuente de radiación y no de la longitud de onda: los rayos X son generados por procesos electrónicos energéticos y los rayos  $\gamma$  por transiciones en los núcleos atómicos. Muchos procesos violentos en el Universo producen rayos X (que son detectados por satélites especiales): estrellas que estn siendo destrozadas por *hoyos o agujeros negros*, colisiones entre galaxias, novas y supernovas, estrellas de neutrones que forman capas de plasma que luego explotan en el espacio.

La producción de rayos X se hace utilizando un *tubo de rayos X* (Ver Figura 16) En este tubo se producen electrones al calentar un filamento o cátodo que emite electrones por emisión termiónica. Los electrones son acelerados hacia una placa metálica o ánodo de un metal pesado de alto punto de fusión ( Pt, W, Mo  Cu) al establecer un alto potencial eléctrico (varios kilovoltios) entre el cátodo y ánodo. Los rayos X se producen en la placa metálica cuando los electrones de alta velocidad chocan con los átomos del metal por dos tipos de procesos.

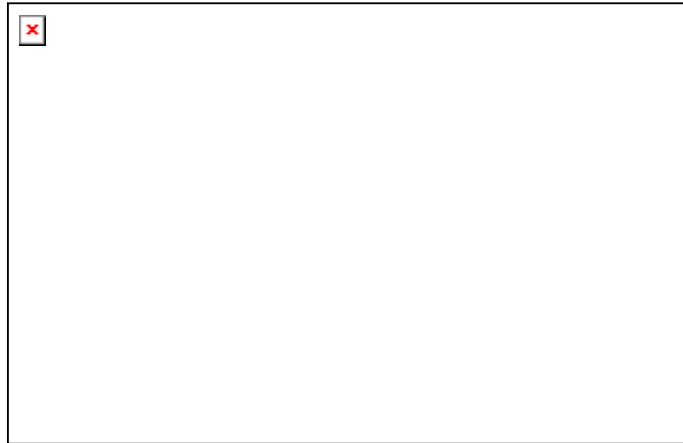


Figura 16. Tubo de rayos X. El ánodo es rotado y enfriado con agua.

Al chocar con el metal, los electrones son desacelerados rápidamente y son dispersados por los fuertes campos eléctricos de los núcleos de los átomos pesados. La energía perdida por los electrones corresponde a un continuo de rayos X llamado *bremstrahlung* (radiación de frenado) (Ver Figura 17). El rango de frecuencias cambia mas hacia los rayos X al aumentar el voltaje de aceleración de

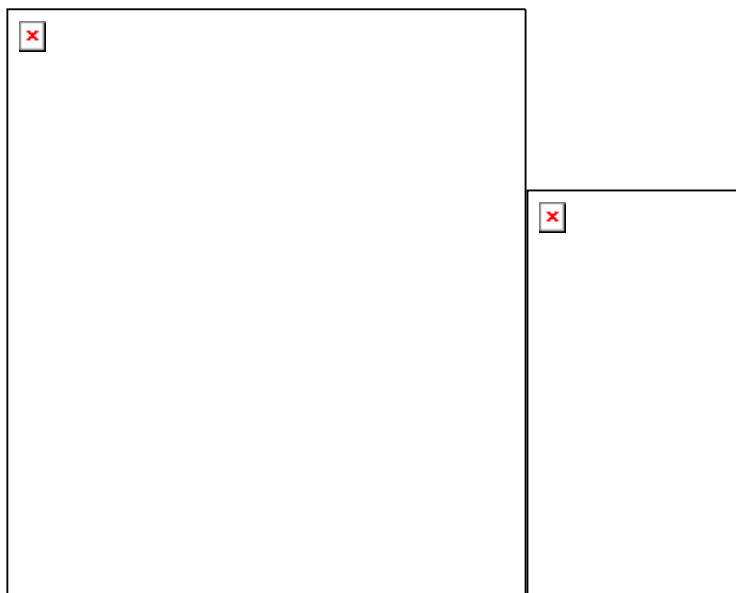


Figura 17. Radiación bremsstrahlung producida al desacelerar los electrones.

los electrones, ya que una partícula cargada emite radiación al cambiar su velocidad. Si los electrones tienen suficiente energía, al chocar con los átomos metálicos pueden sacar electrones de los niveles electrónicos más internos. Los electrones de los niveles más altos van a llenar esos vacíos internos y en el proceso emiten radiación en la región de rayos X. (Ver Figura 18, elemento Titanio, Ti,  $Z=22$ ) Las frecuencias emitidas corresponden a la energías entre el nivel mas profundo ( $n=1$ , nivel K) y los niveles superiores (Nivel L, M ó N) y son característicos de cada átomo. Esto produce un

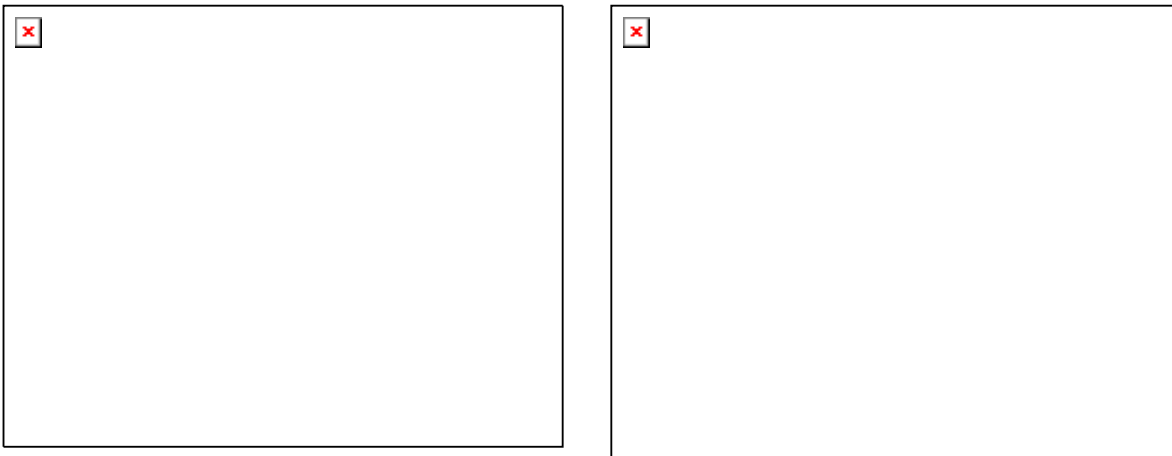


Figura 18. Emisión de rayos X del nivel K ( $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$ ) y del nivel L ( $L_{\alpha}$ ,  $L_{\beta}$ ) del Titanio ( $Z= 22$ )

*Espectro característico* que tiene líneas finas y que es propio de cada elemento. En la Figura 19 se observa el espectro característico del elemento molibdeno (Mo) usado como ánodo. Se destacan las líneas finas correspondientes a  $K_{\alpha}$  (transición  $n=2$  a  $n=1$ ) y  $K_{\beta}$  (transición  $n=3$  a  $n=1$ ) del elemento (También se observa el continuo correspondiente a la radiación bremsstrahlung). El espectro característico se utiliza en la difracción de rayos X para estudios estructurales (Ver abajo).

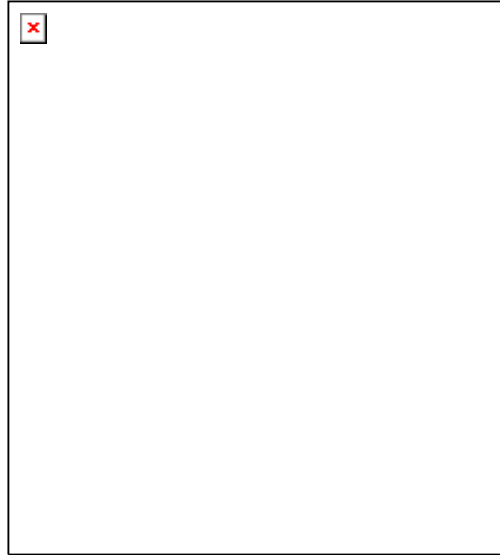


Figura 19. Espectro característico de rayos X del Molibdeno. También se observa el continuo bremsstrahlung.

Otra fuente importante para la producción de rayos X son los aceleradores de partículas o sincrotrones. Los físicos descubrieron que al acelerar los electrones producían radiación sin efectuar ninguna colisión. Los campos magnéticos de los aceleradores causaban un movimiento en grandes espirales alrededor de las líneas de fuerza. Este proceso producía la *radiación sincrotrón*. Este fenómeno se muestra en la Figura 20. La radiación sincrotrón es un flujo de radiación electromagnética que contiene longitudes de onda desde el infrarrojo a los rayos X.





Figura 20. Radiación sincrotrón. Electrones moviéndose en un campo magnético irradian fotones

Cuando el haz de electrones o partículas está circulando en el acelerador circular cerca de la velocidad de la luz y es desviado por magnetos, con campos magnéticos perpendiculares a la trayectoria circular de las partículas, las cuales son aceleradas produciendo un intenso haz de radiación electromagnética generado en la dirección tangencial a la órbita original. Esto se observa en la Figura 21.

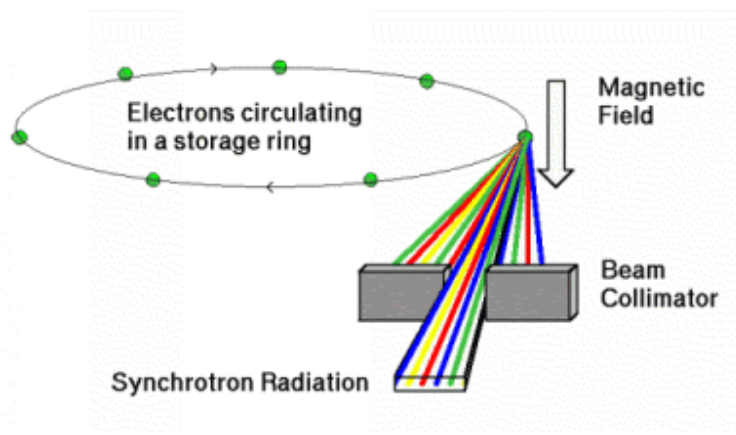


Figura 21. Haz de radiación sincrotrón producida tangencial al haz de electrones circulando en el anillo de almacenaje.

La radiación sincrotrón es un fenómeno natural que ha existido desde el Big Bang. En el cosmos, las partículas como los electrones pueden ser acelerados a altas energías, a velocidades relativísticas, por campos eléctricos y magnéticos muy

intensos. La frecuencia de la radiación producida depende de la energía tanto de las partículas como de los campos presentes. La radiación sincrotrón tiene un espectro característico en la distribución de fotones con la energía: la radiación decae con la energía menos rápido que el espectro de radiación de un gas caliente. Cuando se observa la radiación sincrotrón desde los residuos de una supernova, un jet cósmico u otra fuente, revela información acerca de los electrones de alta energía y de los campos magnéticos presentes.

La radiación sincrotrón tiene varias características que la hacen muy útil para aplicaciones tanto en el estudio de propiedades, composición, construcción de materiales como para la investigación. Las características únicas son: a) Alta intensidad y brillantez. Es cientos o miles de veces más intensa que fuentes tradicionales de rayos X. Es altamente colimada. b) Tiene un espectro de energía amplio. Se puede producir un haz de cualquier energía. c) El haz de radiación sincrotrón es altamente polarizado y parcialmente coherente. d) Es emitido en pulsos muy cortos, típicamente de menos de un nano-segundo. e) Para estudios de materiales son muy buenos porque tienen el tamaño adecuado para penetrar el material y para interactuar con sus constituyentes una vez que ha penetrado.

### **3C-2. Interacción con la materia**

Una de las características interesantes de los rayos X es que debido a su alta energía y longitud de onda muy corta, logran penetrar a través de muchos materiales, con excepción de algunos metales pesados como el plomo (Pb), que absorben la radiación (con un grosor de varios centímetros). Los rayos X tienen energía mayor que los rayos ultravioleta y pueden pasar a través de la piel, músculos y órganos, pero son bloqueados por los huesos (que contienen el metal calcio, Ca). Cuando el doctor le toma una *radiografía*, la foto que resulta es la

imagen de la sombra de los rayos X que pasaron por su cuerpo. Debido a la alta energía de los rayos X, éstos son *radiación ionizante*, o sea que pueden excitar electrones, formar iones, romper enlaces y formar radicales libres o sea, son capaces de dañar o matar a las células. Una breve exposición para tomar una radiografía no es tan dañina, pero exposición continuada o a radiación intensa es peligrosa y requiere tomar medidas de protección (ver abajo).

Cuando una fuente de rayos X, ya sea un tubo de rayos X, una fuente radioactiva, explosión nuclear o radiación sincrotrón, cae sobre un objeto o una muestra, los rayos X pueden ser absorbidos, dispersados por el material o difractados por un arreglo regular de átomos (ver abajo). El proceso por el cual los rayos X son absorbidos por un átomo transfiriendo toda su energía a un electrón muy interior se llama el *efecto fotoeléctrico*. Durante este proceso si los rayos X primarios tienen suficiente energía, se emiten electrones de las capas o niveles interiores, creando una vacante. Estas vacantes presentan una condición inestable para el átomo. Conforme el átomo retorna a su condición estable, electrones de las capas o niveles exteriores son transferidos a las capas o niveles interiores y en el proceso emiten un rayo X característico cuya energía es la diferencia en energía entre las capas correspondientes a la transición electrónica. Debido a que cada elemento tiene niveles de energía que son propios, cada elemento produce rayos X que son únicos. Este proceso de emisión se llama *fluorescencia de rayos X* (XRF) (ver abajo). En la Figura 22 se muestra la producción del fotoelectrón para el elemento Titanio (Ti,  $Z=22$ ). En el proceso se emite un fotoelectrón de la capa K y se produce una vacante. Luego los electrones exteriores decaen hacia ese nivel, emitiendo rayos X característicos (Ver Figura 18). Estas emisiones de rayos X se denominan K, L, M, N dependiendo del nivel desde donde se originaron. Se agregan símbolos (subíndices)  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  para diferenciar las diferentes transiciones desde las capas superiores. Se utilizan los símbolos (subíndices) a1, a2 ó b1, b2,

etc. para diferenciar subniveles u orbitales que estén contenidos en las capas o niveles principales.



Figura 22. Efecto fotoeléctrico del elemento Titanio (Ti,  $Z=22$ )

A veces, cuando el átomo retorna a su condición estable, en lugar de emitir el rayo X característico, transfiere directamente la energía de excitación a un electrón exterior, causando su expulsión desde el átomo. El electrón expulsado se denomina *electrón Auger*. Este proceso compite con el proceso de XRF, y es más probable en elementos de  $Z$  bajo que en elementos de  $Z$  alto. En la Figura 23 se observa el proceso “Auger” para el elemento Titanio (Ti,  $Z=22$ )



Figura 23. Efecto de “electrón Auger” para Titanio (Ti,  $Z=22$ )

Otra interacción interesante de la radiación de rayos X con la materia es el proceso de *difracción* producido por un arreglo de átomos en forma regular, que se consigue en las sustancias cristalinas. Se observa que ocurre una *interferencia* entre las ondas de rayos X que son *reflejadas* por los planos del cristal. El proceso corresponde a la *difracción de rayos X* (XRD) (Ver abajo). El proceso es descrito por la ecuación de Bragg:  $n\lambda = 2d \sin\theta$ , y se muestra en la Figura 24.

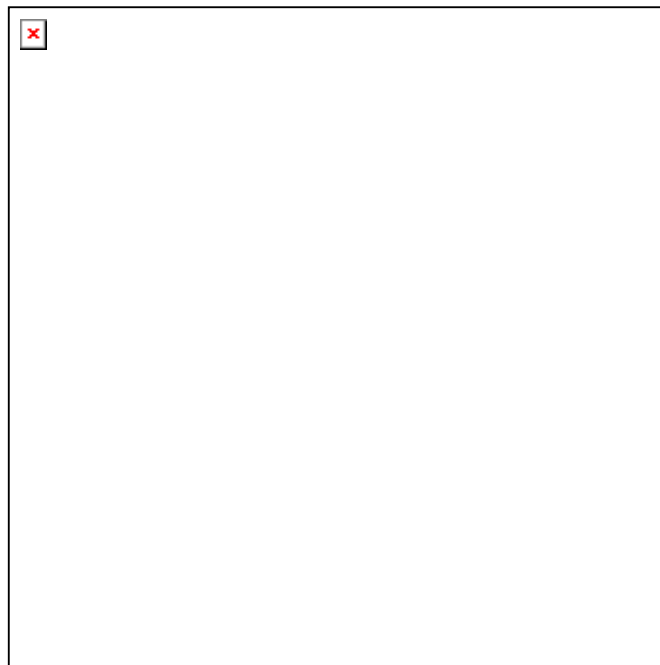


Figura 24. Derivación de la ley de Bragg, producida por dos planos de átomos en una red cristalina.

En la ecuación de Bragg,  $\theta$  es el ángulo de incidencia del haz de rayos X,  $d$  es la distancia entre planos atómicos en el cristal,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación X incidente,  $n$  es un número entero. El proceso de difracción ocurre porque la longitud de onda de la radiación X es del mismo orden de magnitud que

las distancias entre los átomos de un cristal (del orden de Angstroms, Å). Este proceso también se puede efectuar con iones, electrones, neutrones o protones, cuyas longitudes de onda (ondas de materia) también son del mismo orden que las distancias internucleares en estructuras moleculares.

### **3C-3. Aplicaciones de los rayos- X**

Debido a sus características, los rayos X han encontrado muchas aplicaciones a nivel médico como a nivel industrial. Para su detección se requiere de varios tipos de *detectores*. Se utilizan *placas fotográficas*, *contadores Geiger*, *detectores de centelleo* y *detectores de semiconductores*. El uso de *placas fotográficas* es el método más frecuentemente utilizado tanto en hospitales y dentisterías para sacar *radiografías*, como en las industrias para el *estudio de materiales*. Cuando el negativo de una placa fotográfica se expone a los rayos X, se torna “blanco” donde los rayos X atraviesan las partes “blandas” del cuerpo, la piel o los órganos, y se torna “negro” donde los rayos X fueron parados o absorbidos por las partes “duras” como los huesos, o por materiales de *contraste* como el bario (Ba, Z=56) (que se toma en una suspensión para contraste en las vías digestivas) o el yodo (I, Z=53) que se inyecta para contraste en las vías circulatorias). La placa fotográfica tiene una emulsión de sales de plata (Ag, Z=47, generalmente el bromuro de plata, AgBr) que son activadas por los rayos X y se reducen al metal Ag. Al “revelar” la placa, se produce el contraste entre “blanco” y “negro” descrito arriba. Otro método también utilizado en los hospitales es el uso de una *pantalla fluorescente* (que contiene yoduro de sodio, NaI, u otro material como ZnS, que emite radiación visible cuando le llegan los rayos X.) que permite el estudio en tiempo real.

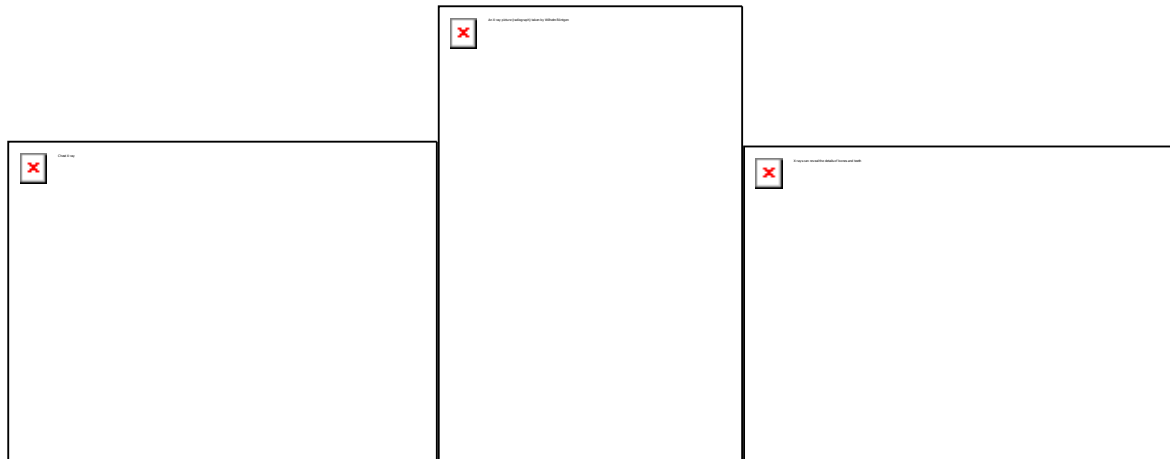


Figura 25. Ejemplos de la aplicación de radiografías en medicina y dentistería.

En la figura 25 se muestran varias radiografías de aplicaciones médicas de los rayos X.

Otro método de detección de rayos X utiliza la *ionización de gases* como en el *contador Geiger-Müller*, que es un tubo cilíndrico sellado, con un gas, con una ventana de un polímero y un alambre en el centro. Se aplica un alto voltaje entre el cilindro (cátodo) y el alambre (ánodo). Cuando un fotón de un rayo X, entra al cilindro, ioniza el gas, que se vuelve conductor, creando un flujo de corriente (como una chispa); este pico de corriente es detectado como un “conteo” (o se pasa a un parlante para producir un “clic”). Cuando se disminuye el voltaje entre el ánodo y el cátodo, el detector no se satura y el alto del pico de corriente es proporcional a la energía del fotón, entonces el detector es un *contador proporcional*.

Los detectores de *centelleo* ó *contadores de centelleo* contienen un material como NaI que “convierte” un fotón de rayos X en un fotón visible que es detectado por un fotomultiplicador. (Ver 3B-3 y Figura 10). Los *detectores de semiconductores* ó *detectores de estado sólido* utilizan diodos de silicio (Si, Z=14) o germanio (Ge, Z=32) con impurezas de litio (Li, Z=3), o de telurio de cadmio

(CdTe) o telurio de cadmio y zinc (CdZnTe), que producen un par electrón- hueco cuando un fotón de rayos X choca con el material. (Ver Figura 11).

Otro detector reciente que se puede utilizar para los rayos X son los *dispositivos acoplados a la carga* (CCD, charge- coupled devise). (Ver abajo 3D-3)

Desde el descubrimiento por Röntgen que los rayos X pueden determinar la estructura ósea (Ver Figura 25, centro), ha habido muchos adelantos en la *radiología*: el campo especializado de la medicina que emplea radiografías y otras técnicas de *diagnóstico por imágenes*. El uso de los rayos X es especialmente útil en la detección de patologías del sistema esquelético, pero también es útil para detectar algunos procesos de enfermedades de tejidos suaves. Algunos ejemplos son las radiografías de rayos X del tórax (Ver Figura 25, izquierda) para identificar enfermedades de los pulmones como tuberculosis, neumonía, cáncer pulmonar o edema pulmonar. También se utiliza para detectar enfermedades abdominales y cálculos renales. Otras alternativas complementan la radiografía, tales como *tomografía axial computarizada*(CAT), *mamografía*, *imagenología de resonancia magnética* (MRI) y *ultrasonido*. (Ver abajo). Los rayos X también se pueden usar en procedimientos en tiempo real, tal como la *angiografía* o estudios de contraste de órganos (ej. un edema de bario (Ba, Z=56) del intestino delgado y grande) usando *fluoroscopia*. La *angioplastia*, intervención del sistema arterial, depende fuertemente del contraste con rayos X. La *radioterapia* utilizada para el tratamiento del cáncer, utiliza radiación X de alta energía.

*Espectroscopia de Absorción de Rayos X* (XAS). Esta espectroscopia resulta de la absorción de rayos X de alta energía por los átomos en una muestra. Esta absorción ocurre a energías definidas correspondiente a la energía de enlace de los electrones en el material. El electrón expulsado interactúa con los átomos del



entorno para producir el espectro observado. Ocasionalmente el electrón puede ser excitado a estados excitados (orbitales moleculares desocupados) cerca de la banda de valencia. Como usualmente los electrones 1s ó 2p son excitados, las energías requeridas son altas (miles de eV), por lo cual XAS utiliza radiación sincrotrón. La espectroscopia de absorción de rayos X es una sonda específica para cada elemento de la estructura local (a corto rango) de los elementos en la muestra. Una importante ventaja de esta técnica es su utilidad en muestras heterogéneas, en una variedad de sólidos y líquidos, incluyendo muestras de suelos. Como la estructura local no depende de orden cristalino a largo alcance, se pueden estudiar estructuras de fases amorfas. XAS es útil a concentraciones de 10 ppm para la mayoría de los elementos. Así sirve para determinar elementos contaminantes en minerales puros, suelos y sedimentos. XAS comúnmente se divide en dos regiones espectrales. La primera es *absorción de rayos X cerca de la estructura de borde* (XANES). El espectro XANES es único para el estado de oxidación y la especificidad del elemento de interés, particularmente el entorno de coordinación del material. La región más distante del espectro de absorción se denomina *Estructura fina de la absorción extendida de rayos X* (EXAFS). El espectro EXAFS es una serie de ondas sinusoidales periódicas que decaen en intensidad conforme la energía incidente aumenta desde el borde de absorción. Las ondas sinusoidales resultan de la interacción del fotoelectrón expulsado con los átomos en el entorno que rodea el elemento de interés. La amplitud y la fase de las ondas dependen de la estructura local del átomo excitado. El análisis del espectro y su correspondiente simulación provee información sobre distancias entre átomos vecinos, la identidad y el número de átomos vecinos. El método EXAFS ha sido utilizado para analizar el entorno de centros metálicos en biomoléculas.

*Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS).* Esta espectroscopia utiliza rayos X para excitar electrones desde los orbitales moleculares hasta un continuo (fotoelectrones). XPS no mide la absorción mientras se hace un barrido a través del borde de absorción como en la espectroscopia XAS. Se usa una fuente de energía fija de rayos X para excitar los electrones de la muestra y se mide la energía cinética de los fotoelectrones expulsados. La energía cinética depende de la energía de enlace de los electrones (o de su función trabajo en un sólido) en el material, siendo característico de cada especie química. XPS permite estudios muy detallados de los niveles de energía de los electrones en diferentes sustancias químicas (sólidos, líquidos o gases). La fuente de radiación X puede ser un tubo de rayos X (con ánodo de Al o de Mg ) o una fuente de radiación sincrotrón. Esta última fuente es muy útil por sus características de intensidad y que se puede modular a una energía variable. Esta modulación permite hacer estudios específicos para superficies, permite mejor resolución y mayor sensibilidad. El método XPS requiere alto vacío y debe trabajar con superficies muy limpias.

*Espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF).* Este método se basa en el fenómeno de *fluorescencia de rayos X* (Ver 3C-2). En la mayoría de los casos involucra los niveles interiores de las capas K y L. Se utiliza para medir la composición elemental de un material. Como el método es no destructivo y rápido,

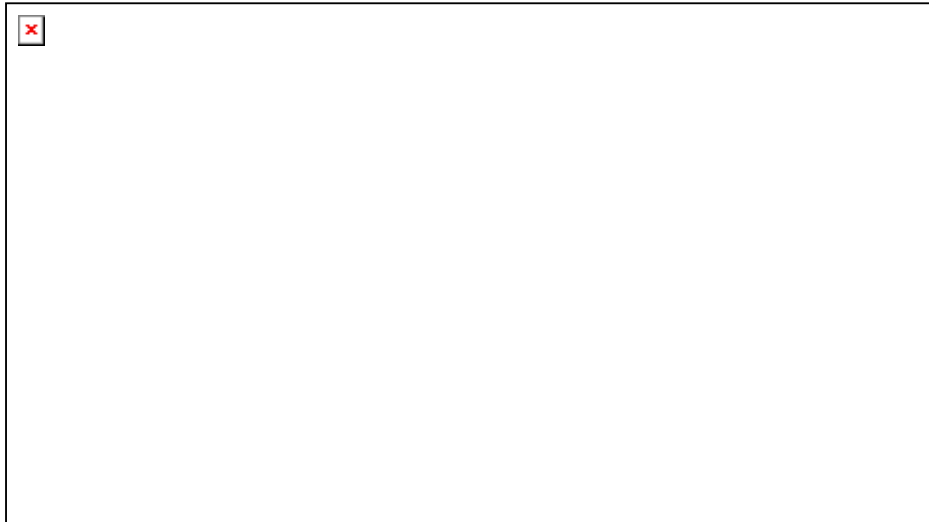


Figura 26. Espectro de XRF de plomo derivado de  $^{109}\text{Cd}$

se utiliza mucho para estudios en el campo y producción industrial para control de calidad de los materiales. Un espectro típico muestra múltiples picos de diferentes intensidades. En la Figura 26 se muestra el espectro de XRF de plomo derivado de  $^{109}\text{Cd}$ .

*Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X* (EDS). Esta espectroscopia identifica la composición elemental de un material observado en el *microscopio electrónico de barrido* (SEM) de todos los elementos con número atómico mayor que el boro. La mayoría de los elementos pueden ser detectados en concentraciones del orden de 0.1%. Conforme el haz de electrones del SEM se barre a través de la superficie de la muestra, genera *fluorescencia de rayos X* de los átomos en su trayectoria. La energía de cada fotón de rayos X es característica de cada elemento que lo produce. El analizador del sistema de microanálisis del EDS (Ver Figura 11) recoge los rayos X, los analiza y grafica según su energía, los identifica automáticamente y los marca con el símbolo del elemento responsable del pico. Los datos se comparan con un estándar conocido o generado por la computadora y produce un análisis cuantitativo mostrando la composición elemental de la

muestra. EDS se utiliza para evaluación e identificación de materiales, determinación de contaminantes en una muestra, control de calidad de materiales.

*Difracción de Rayos X (XRD)*. El uso más importante de la *difracción de rayos X* es en la *cristalografía de rayos X* y en *difracción de rayos X de polvo*. La difracción ocurre de acuerdo a la ley de Bragg para una sustancia cristalina (Ver 3C-2, Figura 24). Los electrones que rodean los núcleos de los átomos son los que interactúan con los fotones de rayos X de la fuente. El análisis de los patrones de difracción producido permite determinar las distancias entre planos, el grupo espacial y eventualmente la estructura cristalina y molecular del material. La cristalografía tiene amplia aplicación en la química, bioquímica, mineralogía,



Figura 27. Difractómetro para cristalografía de rayos X.

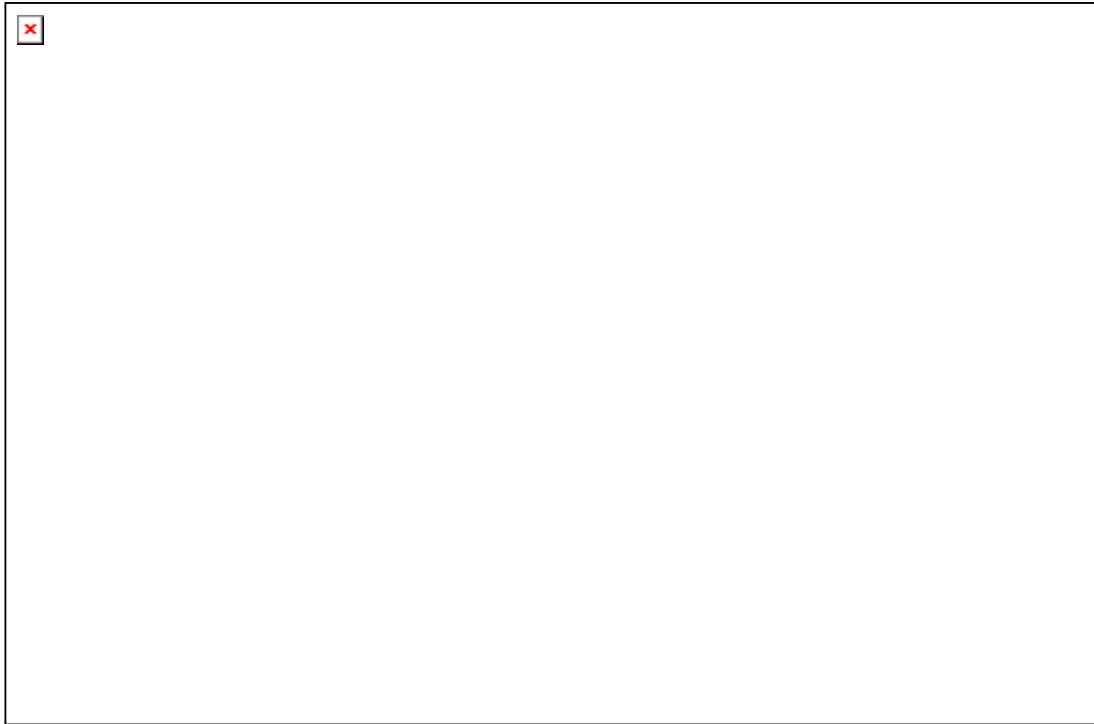


Figura 28. Patrón de difracción del SiC utilizando radiación sincrotrón.

geología, metalurgia, polímeros, semiconductores, arqueología. Se utilizan tubos de rayos X como fuente de radiación, y últimamente la radiación sincrotrón, que ha permitido análisis mas detallado de polvos (material microcristalino). En la Figura 27 se muestra un difractómetro de un instrumento de rayos X; el detector es un dispositivo CCD. El uso de radiación sincrotrón ha permitido la utilización de muestras en polvo o microcristalina, muestras muy pequeñas o muestras amorfas. En la Figura 28 se muestra el patrón de difracción del carburo de silicio cúbico (SiC) utilizando radiación sincrotrón.

*Tomografía Axial Computarizada (CAT)*. Esta técnica se utiliza para conseguir vistas en 2D y 3D de la estructura interna del cuerpo. En un examen con CAT, el paciente se acuesta en una mesa que está rodeada de un anillo (que puede rotar) que genera radiación X y contiene los detectores. (Ver Figura 29, a)) El barrido CAT dirige una serie de pulsos de fracciones de segundo de rayos X a través del

cuerpo y eso corresponde a un corte. Una computadora combina las imágenes en secciones transversales o cortes del cuerpo (2D) . La suma de varios cortes produce las imágenes 3D.

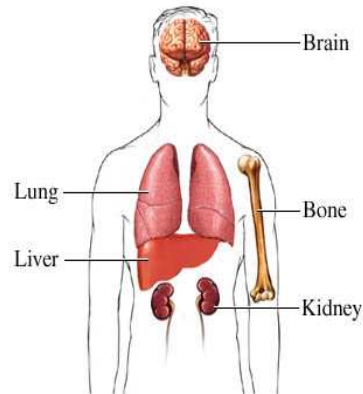


Figura 29 a). Instrumento CAT. b) Partes del cuerpo estudiadas vía CAT

Las diferentes características de absorción de los tejidos irradiados afecta la intensidad del haz de rayos X que produce las imágenes, mostrando estructura interna tales como coágulos de sangre, fracturas de cráneo, tumores e infecciones. El método CAT puede ofrecer información de casi todos los órganos del cuerpo (Ver Figura 29 b). Tejidos densos como los huesos aparecen blancos en el barrido CAT. Tejidos menos densos, como el cerebro o músculos aparecen en grados de gris; espacios llenos de aire como los pulmones o intestinos aparecen negros. Un material de contraste (por ejemplo un colorante con yodo o sales de Bario que absorben los rayos X) se puede inyectar en la sangre o tomar oralmente y hacen más visible las imágenes, permitiendo evaluar el flujo de sangre, detectar tumores y localizar áreas de inflamación.

### 3D-1. Ultravioleta y Visible. Origen y fuentes

La radiación *ultravioleta* (UV) (que significa “más allá del violeta”), la luz *visible* (Vis) y el *infrarrojo* (IR) forman parte de la región *óptica* del espectro electromagnético. El UV tiene longitud de onda menor que la región visible, pero mayor que los *rayos X suaves*. El UV se subdivide en *UV cercano* (370- 200 nm de longitud de onda) y *UV extremo ó del vacío* (200- 10 nm). Al considerar los efectos de la radiación UV en la salud humana y el medio ambiente, el UV frecuentemente se subdivide en *UVA* (380-315 nm), también llamado de *Onda Larga* ó “*luz negra*” (invisible al ojo), *UVB* (315-280 nm), también llamado *Onda Media* y *UVC* (< 280 nm), también llamado de *Onda Corta* ó “*germicida*”. Algunos animales, incluyendo pájaros, reptiles e insectos como las abejas, pueden ver en el UV cercano. Muchas frutas, flores y semillas, plumaje de aves sobresalen en la región UV.

El espectro *visible* es una porción pequeña del espectro electromagnético. Cualquier energía producida en esta estrecha banda producirá la sensación de *visión* cuando estimula el ojo humano normal. La Tabla siguiente muestra los rangos de longitud de onda (en nm) para los diferentes *colores*.

Rojo	630 - 760 nm	Azul	440 - 490
Naranja	590 - 630	Índigo	420 - 440
Amarillo	560 - 590	Violeta	380 - 420
Verde	490 - 560	Púrpura	No un color espectral puro

Cada banda o parte del espectro visible produce una sensación de color diferente. La división entre colores no es fina sino una transición gradual de uno al otro. En la Figura 30 se muestra el espectro visible y sus colores.

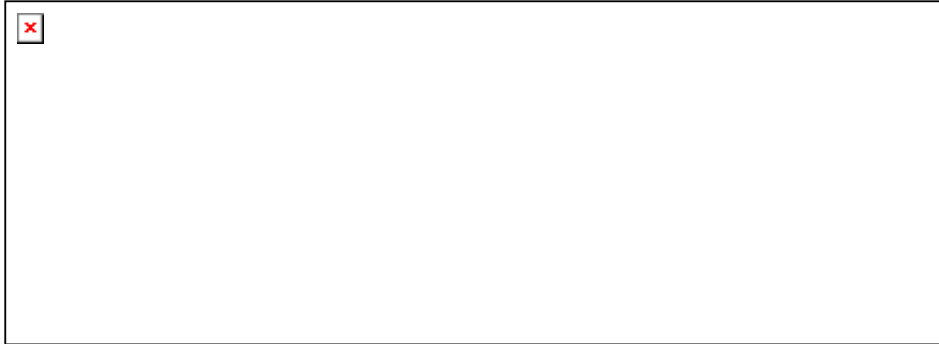


Figura 30. Espectro visible mostrando los colores

(Recomendamos la lectura del libro “El origen del color en la Naturaleza” Dr. Ricardo Contreras, et. al. , Ed. Celciec, 2004)

El Sol es nuestra principal fuente de luz visible en el planeta Tierra. El sol emite radiación UV en las bandas UVA, UVB y UVC, pero debido a la absorción en la *capa de ozono* de la *atmósfera*, el 99% de la radiación UV que llega a la superficie terrestre es UVA (La región UVC es la responsable de la generación del ozono). El vidrio ordinario es transparente al UVA, pero opaco a las longitudes de onda mas cortas. Sílica o cuarzo, dependiendo de la calidad son transparentes, aun a UV del vacío. Otros materiales transparentes son el zafiro y el fluoruro de litio (LiF). La región de UV del vacío, por debajo de 200

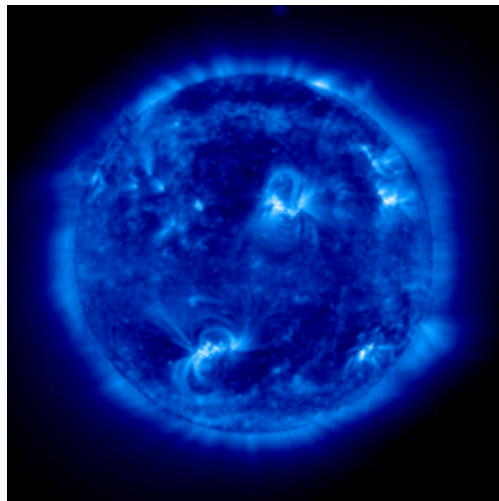


Figura 31. La corona solar en la región del UV (luz de 17.1 nm) (Tomado en la nave SOHO con el telescopio de UV extremo)



nm, se debe a que el aire ordinario es opaco por la fuerte absorción del oxígeno. El nitrógeno es transparente en el rango de 150 -200 nm. En la Figura 31 se observa el Sol en el UV (17.1 nm).

Las estrellas producen radiación como consecuencia de las reacciones de fusión nuclear producidas por las altísimas temperaturas en el interior de ellas (varios millones de K). Las estrellas se destacan en el firmamento durante las noches porque emiten en la región visible. La parte externa del sol emite radiación como un *cuerpo negro* (Ver 2.2) con una temperatura cerca de 6000 K. Cualquier cuerpo caliente (una llama, un plasma, un metal incandescente, una cerámica caliente) puede emitir radiación, siendo más alta la frecuencia de la radiación entre más alta es la temperatura del material. Este fenómeno se utiliza para crear las fuentes artificiales de luz para nuestro uso: lámparas incandescentes o bombillos que utilizan filamentos de metales como el tungsteno (W) que al pasar una corriente eléctrica se calienta a altas temperaturas; lámparas fluorescentes de gases (como Hg para luz blanca); lámparas de gases ionizados (Na luz amarilla; gases nobles como Ne, Ar, Kr, Xe para avisos luminosos de colores); lámparas de gases a muy altas temperaturas y alto voltaje para producir luz ultravioleta (lámpara de arco de deuterio, lámpara de Hg, lámpara de Xe (para simular luz solar), Hg-Xe lámpara de arco, metal haluro lámparas de arco, tungsteno- halógeno lámpara incandescente.

Otra fuente de radiación en la región del UV-visible son los *láseres* y los *diodos emisores de luz* (LED). Un *láser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*; Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación) es una fuente de radiación altamente direccional y coherente. La producción de la radiación coherente corresponde a una emisión electrónica estimulada o inducida (Ver Figura 4 c). Un láser consiste de al menos tres

componentes: 1. Un medio de ganancia que puede amplificar la luz que pase a través de éste. 2. Una fuente de bombeo energético que produzca una inversión de población en el medio de ganancia. 3. Dos espejos que forman una cavidad de resonancia óptica. El medio de ganancia puede ser sólido, líquido o gas y la fuente de bombeo energético puede ser una descarga eléctrica, una lámpara de destello u otro láser. Los componentes específicos de un láser varían dependiendo del medio de ganancia y si el láser es operado continuamente (cw) o en pulsos.

Los *láseres de gas* típicamente son excitados por una descarga eléctrica. En

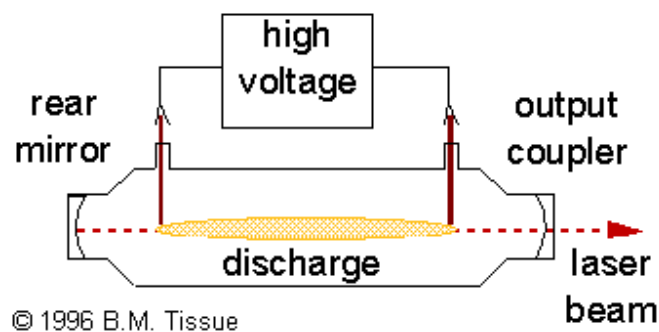


Figura 32. Esquema de un láser de gases.

la Figura 32 se muestra el esquema de un láser de gas. Algunos láseres de gases se describen a continuación: 1. *láser excimero*: utilizan haluros de gases raros ( $\text{ArF}^*$ , 248 nm;  $\text{XeCl}^*$ , 308 nm) o vapores de gas raro y metal, emiten en el UV y operan vía transiciones electrónicas de moléculas. 2. *láser de nitrógeno*: son una fuente excelente de radiación UV (337 nm, pulsado), de alta intensidad y pulsos cortos. Se pueden utilizar como fuente de excitación o para bombear un láser de colorantes. 3. *láser de He-Ne*: tiene una emisión determinada por átomos de neón (Ne) por virtud de una transferencia resonante de excitación del helio (He) (632.8 nm, forma continua). Operan continuamente en el rojo, IR e

IR lejano. 4. *láser de ion Ar*: funciona por estimulación de emisión de radiación entre dos niveles de un gas ionizado (488nm, 541 nm, Ar forma continua) típicamente de 1mW a 10 mW de potencia. 5. *láser de dióxido de carbono* (CO<sub>2</sub>): utiliza las transiciones entre niveles vibracionales y rotacionales de la molécula de CO<sub>2</sub> y emite en el infrarrojo (10 μm, en form continua o en pulsos). Puede mantener altos niveles de potencia en forma continua y se utiliza para cortar, soldar, grabar, y marcar.

En los *láseres de estado sólido*, el medio de ganancia es un centro de impureza en un medio transparente como un cristal o en un vidrio. El primer láser fue un cristal de rubí (impurezas de Cr<sup>+3</sup> en alúmina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 694 nm) bombeado con una lámpara de destello. El laser de estado sólido más utilizado es de Nd<sup>+3</sup> en Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>8</sub> (YAG) ó YLiF<sub>4</sub> (YLF) cristal ó vidrio (1064 nm, pulsos o forma continua). Las altas energía en pulso permite cambiar la frecuencia (doble, 532nm; triple, 355 nm; cuádruple, 266 nm) y se utiliza para bombear láser de colorantes.

Un *láser de colorantes* utiliza como medio de ganancia un colorante orgánico disuelto en un solvente. El colorante y solvente se circulan a través de una celda (láser de pulsos) o en un chorro (láser continuo), y las moléculas de colorante son excitadas por una lámpara de destello u otro láser. En la Figura 33 se muestra un diagrama de un láser de colorantes. Las moléculas orgánicas tienen bandas de fluorescencia anchas y se pueden entonar entre 30 a 80 nm. Existen colorantes para cubrir el rango espectral del UV al cercano infrarrojo (330 -1020 nm)

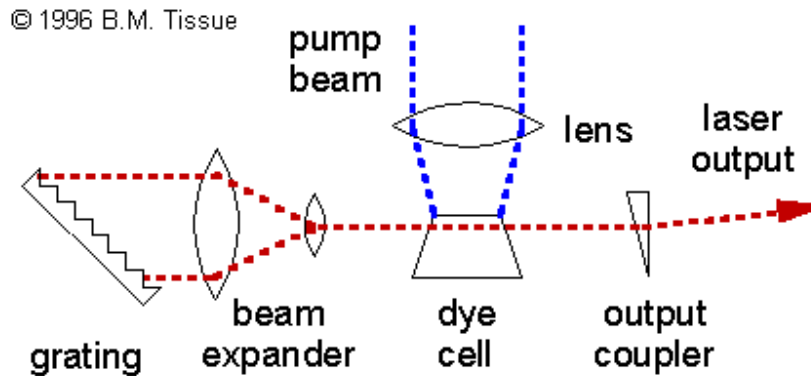


Figura 33. Esquema de un láser de colorantes.

Los *láseres de semiconductores* son diodos emisores de luz dentro de una cavidad de resonancia que está formada en la superficie del diodo o externamente. Una corriente eléctrica que pasa por el diodo produce emisión de luz cuando electrones y huecos se recombinan en la unión p-n. Debido al pequeño tamaño del medio activo, el láser producido es muy divergente y

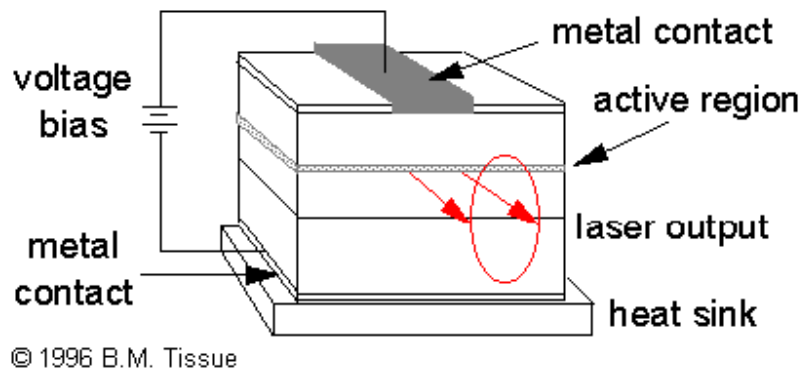


Figura 34. Esquema de un láser de semiconductores.

requiere óptica especial para producir un buen haz. La Figura 34 muestra un diagrama de un láser de semiconductores. Estos láseres se utilizan en comunicación con *fibra óptica*, en aparatos para tocar discos compactos (CD), espectroscopía molecular de alta resolución en el infrarrojo cercano. Se utilizan

para bombear láseres de estado sólido. Se pueden entonar en un rango fino y dependiendo del material semiconductor se pueden conseguir líneas a 680, 800, 1300 y 1500 nm.

Los *láseres de fibra* utilizan *fibras ópticas* (Ver abajo) con bajas concentraciones de haluros de tierras raras como el medio láser para amplificar la luz. Los *láseres de Helio-Cadmio* (He-Cd, 442, 325 nm, continuos) son económicos y se utilizan en 3-D estereolitografía, y para exponer hologramas. Los *láseres apuntadores*, son instrumentos compactos que producen luz visible (rojo) de baja potencia y se utilizan en presentaciones como apuntadores.

Los *diodos emisores de luz* (LED) es un dispositivo de semiconductor que emite un espectro estrecho de luz incoherente cuando se conecta eléctricamente en la dirección correcta. Este efecto es una forma de *electroluminiscencia*, y los colores producidos depende de la composición química del material semiconductor utilizado y puede estar en el UV cercano, visible o infrarrojo. Como un diodo normal, un LED consiste de un chip de material semiconductor impregnado con una impureza y crear una estructura llamada *unión p-n*. Los cargadores de carga *electrones* y *huecos* fluyen hacia la unión desde electrodos con diferentes voltajes. Cuando un electrón encuentra un hueco, cae a un nivel menor de energía y libera energía en la forma de un *fotón*. La longitud de onda de la luz emitida y por consiguiente su color depende de la *brecha de energía* del material que forma la unión p-n. Un LED requiere que la polaridad y el voltaje de la conexión eléctrica sea la correcta; si la polaridad está invertida o el voltaje es muy alto, no fluye corriente, pero el LED se puede dañar. En la Figura 35a y 35b se muestra el diagrama de un LED y varias muestras de LED. Los primeros LED eran de arsenuro de galio (GaAs) y emitían en el infrarrojo. Hoy

día con diferentes materiales cubren un amplio espectro de colores.

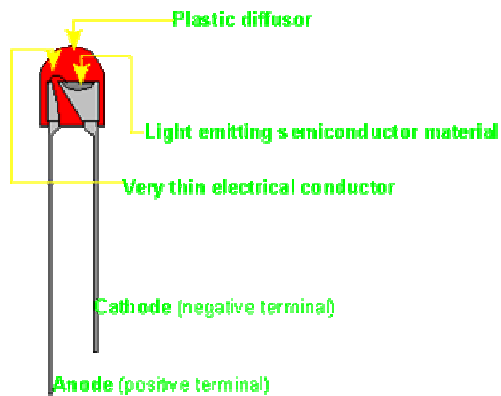


Figura 35a. Diagrama de diodo emisor de luz (LED)

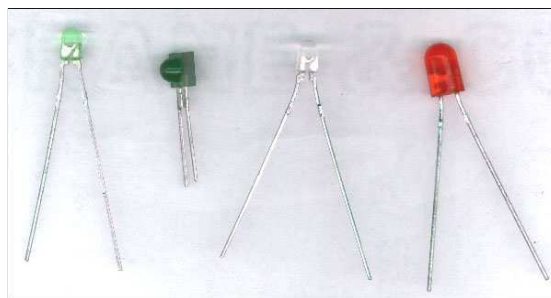


Figure 35b. Ejemplos de diodos emisores de luz (LED)

Los LED convencionales se fabrican de una variedad de compuestos inorgánicos produciendo varios colores: a) Arsenuro de aluminio y galio (AlGaAs): rojo e infrarrojo; b) Fosfuro de galio y aluminio (GaAlP): verde; c) Arsenuro fosfuro de galio (GaAsP): rojo, rojo-naranja, naranja y amarillo; d) Nitruro de galio (GaN): verde, verde puro (verde esmeralda) y azul; e) Fosfuro de galio (GaP): rojo, amarillo y verde; f) Selenuro de zinc (ZnSe): azul; g) Nitruro de indio y galio (InGaN): verde-azulado, azul; h) Fosfuro de indio, galio y aluminio (InGaAlP): rojo-naranja, naranja, amarillo y verde; i) Carburo de silicio (SiC) como sustrato: azul; j) diamante (C): UV, k) Silicio (Si) como

sustrato: azul; l) Zafiro ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como sustrato: azul. Los LED azul, rojo y verde se combinan para producir LED de luz blanca. Para producir luz “blanca” se utiliza un LED de GaN que emite color azul (450-470 nm) y se cubre con un *fósforo* (sustancia que emite radiación al recibir radiación de más alta energía) amarillo hecho de un granate de ytrio y aluminio con impurezas de Ce (YAG:Ce) en forma de polvo cristalino y pegado con un adhesivo. El LED de GaN emite en el azul, parte del cual se convierte en amarillo por el YAG:Ce, la suma de los dos colores le dan al ojo la apariencia de blanco. LED blancos también se pueden construir con un LED que emita en el UV cercano (NUV) y recubrirlo con una mezcla de *fósforo* de alta eficiencia basado en europio (Eu) que emite en el rojo y azul, más sulfuro de zinc con impureza de cobre y aluminio que emite en el verde (ZnS: Cu, Al). Este es un método análogo a como funciona una *lámpara fluorescente*. También se han diseñado LED con material orgánico (OLED) o polimérico (PLED) que emite luz, son mas flexibles y livianos. La mayoría de los LED funcionan con no mas que 30- 60 mW. Recientemente se están diseñando LED que funcionan con mayor potencia. Los LED tienen varias ventajas comparado con otras fuentes de luz: a) emiten el color de luz deseado sin filtros; b) La forma del LED permite el enfoque fácilmente; c) se pueden construir en recipientes sólidos que los protege, haciéndolos durables e irrompibles; d) tienen una vida larga: el doble de los mejores lámparas fluorescentes y 20 veces de los mejores bombillos incandescentes. Los LED tienen muchas aplicaciones y están sustituyendo las lámparas convencionales: a) paneles para interiores y exteriores e indicadores de información en aeropuertos y estaciones de trenes; b) indicadores (prendido/apagado) de la mayoría de los instrumentos modernos; c) control remoto de instrumentos (infrarrojo para TV, VHS, CD); d) señales de tránsito y

semáforos; e) luces indicadoras en carros y bicicletas; f) indicadores en calculadoras (siendo reemplazados por *pantallas de cristal líquido* (LCD) (ver abajo)); g) luces rojas en sitios para mantener visión nocturna o luz baja (cabinas de aviones, submarinos, cuartos de revelado); h) iluminación en la casa u oficina; i) fuente de luz para *comunicación con fibra óptica* (ver abajo).

Las *transiciones electrónicas* dan origen a la radiación en la región del UV y visible (Ver 2.3, Figura 4). Un fotón provee la energía que un electrón necesita para realizar una absorción y pasar a un nivel de energía superior o salir del átomo completamente (ionizar). El electrón en el estado superior tiende a *emitir* fotones en la región del UV y visible y retornar a los niveles inferiores. Esto se observa en la Figura 32 para dos emisiones de diferente longitud de onda, dependiendo de la diferencia en energía entre los dos niveles involucrados en la transición.

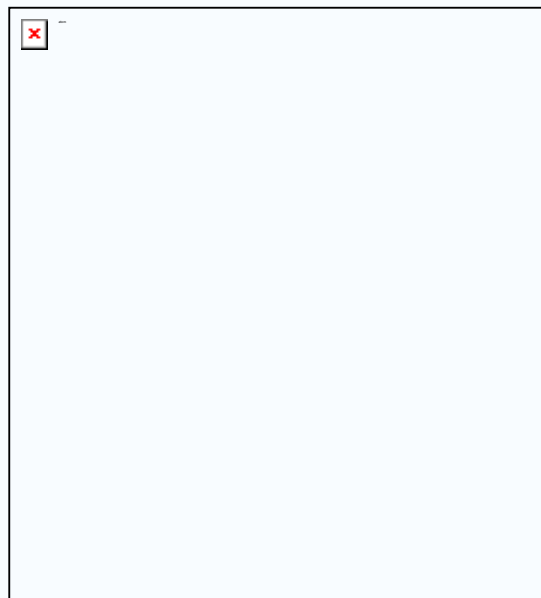


Figura 32. Transiciones electrónicas de emisión de radiación, entre dos niveles diferentes.

La luz ultravioleta puede ser detectada por materiales fluorescentes, tales



como: minerales fluorescentes, algunos materiales plásticos y colorantes orgánicos absorben en el UV y emiten en el visible a través del fenómeno de *fluorescencia* (ver abajo). Otra fuente importante hoy día en la región UV es la *radiación sincrotrón* (Ver arriba 3C-1, Figura 20, 21)

### **3D-2. Interacción con la materia**

Frente a la radiación UV-Visible, la materia puede ser transparente, o sea que la radiación es capaz de atravesar la muestra sin ser modificada, o la materia interacciona con la radiación, muy frecuentemente por absorción de una determinada región, correspondiente a una *banda de absorción* y asociada a alguna transición electrónica de los átomos en el material. La muestra aparece entonces coloreada o aparece opaca a la luz. La luz puede también ser reflejada o dispersada por la superficie del material. Si la luz atraviesa completamente el material, la muestra es completamente transparente sin color (ejemplo el vidrio, el cuarzo, algunos materiales plásticos, cristales puros de haluros de metales alcalinos, una determinada cantidad de agua); si la luz atraviesa, pero parte de la región es absorbida, la muestra es coloreada a la luz transmitida (ejemplo un vidrio de colores, el vino rosado, un plástico coloreado); si la luz es reflejada completamente, la muestra tiene un brillo de espejo (ejemplo un metal pulido, un espejo plano) o si es totalmente dispersada la muestra se ve blanca; si la luz es totalmente absorbida, la muestra se ve negra (no hay luz reflejada) (ejemplo el carbón tipo grafito, un metal finamente dividido). Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los materiales son opacos a la radiación UV, especialmente la de alta energía, algunas excepciones son el cuarzo, el zafiro o el fluoruro de litio. La atmósfera terrestre solo permite pasar algo del UVA.

La luz ultravioleta y visible, debido a la longitud de onda que tienen y que existen materiales transparentes o reflectores puede ser dirigida en la gran variedad de dispositivos, artefactos e instrumentos que se utilizan en los fenómenos de la óptica geométrica. Los fenómenos cubren la *reflexión, refracción, difracción, dispersión, interferencia*. Los dispositivos útiles cubren: *lentes, espejos planos y parabólicos, lupas, microscopios, telescopios, prismas, redes de difracción, películas delgadas*. Las aplicaciones de estos fenómenos ópticos son muy variadas y tienen gran utilidad práctica.

### 3D-3. Aplicaciones del UV-Visible

La variedad de aplicaciones prácticas de la región UV- visible se han desarrollado debido a la variedad y sensibilidad de los detectores de radiación en esta región. Los principales detectores son: *tubo fotomultiplicador (PMT), detectores de semiconductores, fotodiodos, dispositivos acoplados de carga (CCD)*.

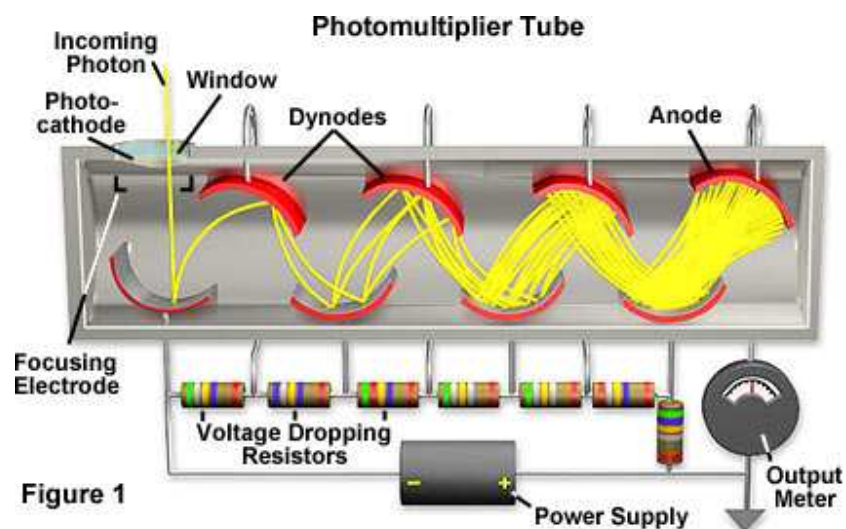


Figura 33. Esquema de un tubo fotomultiplicador (PMT)

Un *tubo fotomultiplicador* (PMT) puede detectar señales muy débiles; es un dispositivo *fotoemisor* en el que la absorción de un fotón resulta en la emisión de un electrón (efecto *fotoeléctrico*). Estos detectores funcionan amplificando los electrones generados por un *fotocátodo* expuesto al flujo de fotones. El diagrama de un tubo fotomultiplicador se muestra en la Figura 33. La luz penetra al tubo a través de una ventana de vidrio o cuarzo que cubre una superficie fotosensible (fotocátodo, con GaAs sensible de 300 a 800 nm; metales alcalinos). Los electrones emitidos son multiplicados por electrodos en cadena conocidos como *dinodos de canal metálicos*. Al final de la cadena de dinodos es un ánodo o electrodo de recolección. La corriente que fluye del ánodo a tierra es directamente proporcional al flujo de fotoelectrones en un rango muy grande. La respuesta espectral, la eficiencia cuántica, la sensibilidad y la corriente de fondo (debido a

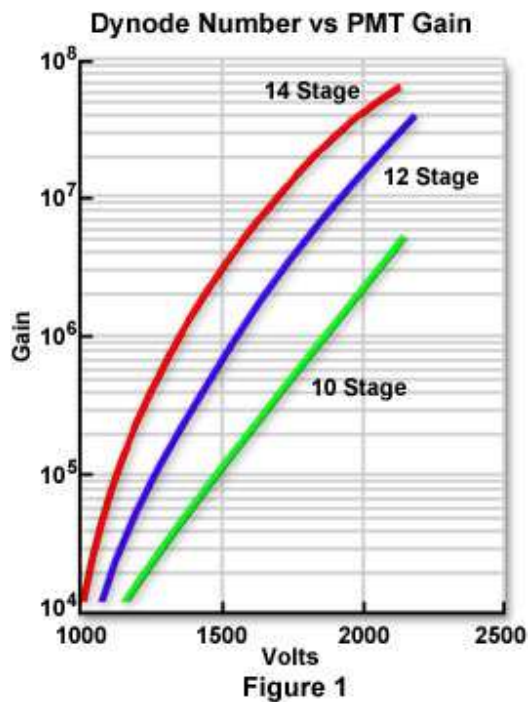


Figura 34. Ganancia de un PMT dependiendo de la cadena de dinodos y el voltaje aplicado

ruido térmico, que se reduce al enfriar el PMT) del PMT depende de la composición del fotocátodo. Los mejores fotocátodos tienen una eficiencia cuántica de solo 30% (o sea 70% de los fotones que ingresan no generan fotoelectrones). Los fotoelectrones de la cadena de dinodos (hasta 14 elementos en la cadena) se van incrementando en cada etapa hasta incrementar la avalancha de electrones del orden de 10 millones la ganancia, que depende del número de dinodos en la cadena y también depende del voltaje aplicado entre los dinodos (entre 1000 y 2500 voltios en la práctica) (Ver Figura 34). Los PMT tienen una respuesta muy rápida (unos pocos nanosegundos) lo que permite seguir procesos muy rápidos. Nuevos diseños de PMT de canal pueden incrementar la ganancia hasta 100 millones. Los PMT son utilizados en microscopios confocales, espectrofotómetros, telescopios, cámaras especiales.

Los *detectores de semiconductores (fotodiodos)* son muy variados, cubren rangos desde los rayos X, UV, visible al infrarrojo y tienen muchas aplicaciones.



Figura 35. Ejemplo de detectores de semiconductores (fotodiodos)

En la Figura 35 se muestran ejemplos de detectores de semiconductores (fotodiodos). La primera serie de detectores utilizan el efecto fotoeléctrico y efecto de multiplicación por gas; tiene sensibilidad en el UV (185- 260 nm); se utiliza en

detectores de fuego, alarmas de fuego y detectores de descargas de corona invisibles en líneas de transmisión de alto voltaje. Las otras series son fotodiodos de silicio, tienen baja capacitancia y alta velocidad (rango 350 -1100nm); tienen aplicación en lectores de códigos de barra, detectores de humo, utensilios y aparatos caseros (control remoto), controles industriales, instrumentación, detección con láseres, detectores de bajos niveles de luz, contador de partículas, mediciones químicas y analíticas, sensores para fibra óptica (850 nm, alta velocidad), receptores de datos ópticos, receptores de video, Ethernet, sistemas basados en fibra (740- 900 nm)



Figura 36. Ejemplos de fotodiodos y arreglo de fotodiodos.

En la Figura 36 se muestran otros ejemplos de fotodiodos y arreglo de fotodiodos. Los fabricados de GaN permiten detección del UV (200- 365 nm); otros son de silicio y tienen aplicación como monitores de contaminación, medidores de exposición al UV, purificación de agua, fluorescencia y aplicaciones espectroscópicas. Los detectores de SiC (sensibles de 200 -400 nm) se utilizan en detección de combustión, llamas y arcos, radiación solar, esterilización, curado con UV, control en fototerapia. Los arreglos de fotodiodos tienen varios elementos unidos y se utilizan en registradores de imágenes (scanner), registradores de maletas, en aplicaciones médicas, comerciales, industriales y militares.

Los *dispositivos acoplados de carga*(CCD, charge- coupled device) son detectores que tienen aplicación desde los rayos X hasta la zona visible.

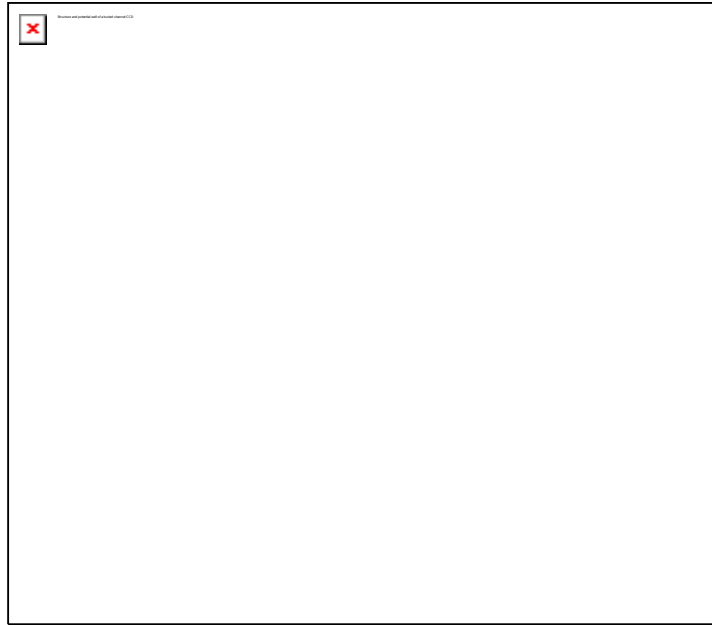


Figura 37. Estructura y pozo potencial de un CCD

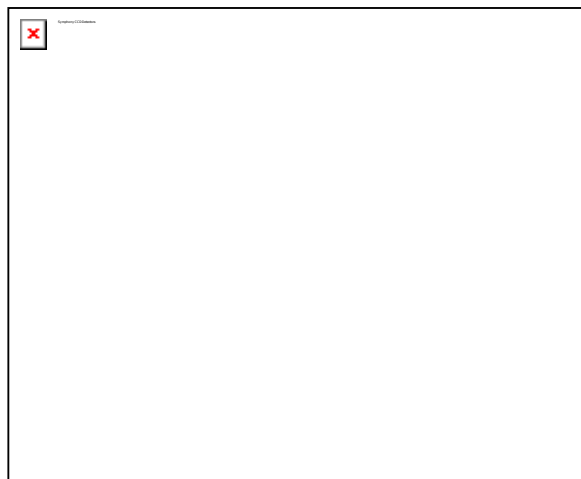


Figura 38. Dispositivos CCD para espectrómetros.

Los CCD están basados en absorción fotoeléctrica por silicio, resultando en la liberación proporcional de electrones, análogo al proceso en un contador proporcional de gas. Los CCD tienen resolución espacial muy buena, resolución

energética moderada, buena sensibilidad, alta velocidad, bajo ruido y durabilidad. En la Figura 37 se muestra la estructura y el pozo potencial de un CCD. En la Figura 38 se presentan varios dispositivos CCD. El material semiconductor (usualmente silicio) se divide en varias regiones introduciendo impurezas para hacerlo tipo n (ej. impureza de fósforo, P, produce exceso de electrones) y tipo p (ej. impureza tipo boro, B, ó aluminio, Al, produce exceso de huecos); la superficie se oxida a  $\text{SiO}_2$  (aislante), el material del electrodo (gate) se deposita encima del  $\text{SiO}_2$ . El objetivo del CCD es acumular carga debajo del electrodo (gate). El fotón ingresa y crea un número de pares electrón-hueco (dependiendo de la energía  $h\nu$ ) Se aplica un voltaje a través de la estructura n-p para producir un potencial máximo debajo de la superficie y se acumula carga en este “canal enterrado” (Ver Figura 37), separando los cargadores de carga (electrones y huecos) con el potencial adecuado.

La *fibra óptica* y los *sistemas de fibra óptica* han generado una nueva tecnología con muchas aplicaciones en telecomunicaciones, medicina, militares, en la industria automotor y a nivel industrial. El diagrama de un sistema de fibra óptica se muestra en la Figura 38. En la Figura 39, se compara el tamaño de una fibra óptica que es capaz de llevar una cantidad equivalente de información que los cables de cobre mostrados. En la misma Figura se muestra un sistema de fibra óptica del mercado. Un sistema de fibra óptica consta de: a) un generador de luz (que puede ser: un láser, un LED o una lámpara de halógeno o un haluro de metal); b) el equipo de la fibra (que consta de un conector universal, la guía de la luz, una terminación); c) adaptación al final de la fibra o un receptor de la luz.

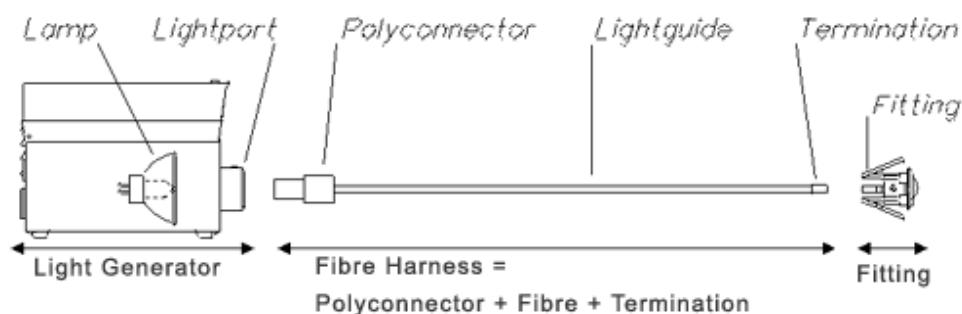


Figura 38. Diagrama de un sistema de fibra óptica



Figura 39. Fibra óptica. Se muestra el equivalente en cable de cobre para transmitir la misma cantidad de información.

La fibra óptica transmite la información en forma de luz y no en forma eléctrica. La fibra es de vidrio y tiene una reflexión interna muy eficiente que no permite la pérdida de radiación a través de las paredes (tiene baja atenuación). Esto le permite transmitir la información desde menos de un metro hasta cientos de kilómetros. Un sistema de fibra óptica requiere repetidoras solo cada 100 kilómetros. Las fibras ópticas tienen varias ventajas para sus aplicaciones, principalmente en las telecomunicaciones: anchura de banda, bajo peso, diámetro muy pequeño que permite incorporar muchas fibras en conductos reducidos;



longitudes muy largas (fibras de modo continuo pueden ser de 12 kilómetros; cables de multimodo pueden ser de 4 km); fácil instalación y mantenimiento (se pueden instalar en sistemas de conductos de 6000 metros); se pueden instalar fibras extras para futuras expansiones; la naturaleza dieléctrica elimina los peligros en zonas de gran incidencia de tormentas eléctricas y la interferencia de radio frecuencia o interferencia electromagnética (EMI); mayor seguridad para detectar las señales siendo transmitidas. Las aplicaciones de fibras ópticas en telecomunicaciones son muy extensas desde redes globales hasta redes telefónicas o de computadoras locales. Comprende la transmisión de audio (voz), datos, video, mensajes de computadoras, información financiera entre bancos; televisión por cable y televisión comunitaria; sistemas de transporte inteligentes, luces de tránsito inteligentes, cabinas de peaje automáticas.

*Observatorios en el UV- Visible:* Existen varios observatorios astronómicos que funcionan en el espacio y que cubren la región ultravioleta y visible. En la Figura 40 se muestran algunos de estos observatorios.

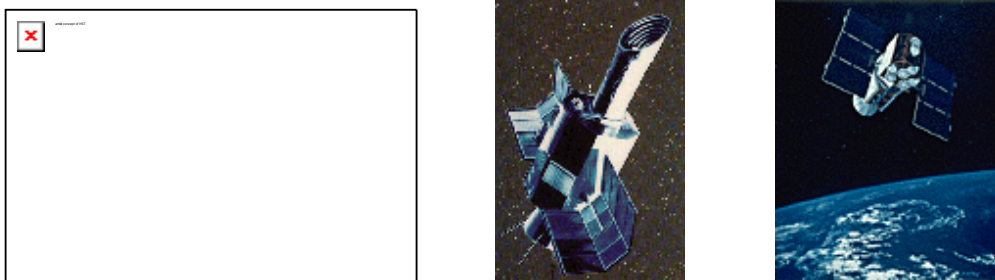


Figura 40. Telescopio Hubble (HST, visible); Explorador Ultravioleta Internacional (IUE); Explorador Ultravioleta Extremo (EUVE)

El Telescopio Hubble (HST) es el único en el espacio en la región visible, pero tiene varias ventajas comparado con los telescopios en la tierra. Está arriba de la

atmósfera terrestre y de la distorsión producida por el aire, las diferencias en temperatura, de los vientos, diferencias de presión atmosférica, humedad, dando mucho mejor resolución y puede analizar el UV. El Explorador Ultravioleta Internacional (IUE) sirvió hasta 1996. Se han enviado telescopios Astro para estudios en UV en los transbordadores espaciales. El Explorador Ultravioleta Extremo (EUVE) y el Arreglo de Sensores de Imagen de rayos X de Baja Energía (ALEXIS) son dos telescopios que analizan la región de ultravioleta extrema.

*Algunas aplicaciones del UV:* a) La luz “negra” se utiliza para irradiar materiales que producen luz visible por *fluorescencia* ó *fosforescencia*. Sirve para autenticar antigüedades y papel moneda; determinación de fisuras en estructuras metálicas (se añade un fluido fluorescente). b) Las *lámparas fluorescentes* producen radiación UVC por emisión de mercurio a baja presión, un recubrimiento fosforescente dentro del tubo absorbe los rayos UV y produce luz visible. c) Trampas UV para eliminar insectos voladores, que son atraídos por el UV y matados por shock eléctrico al entrar en contacto con el aparato. d) Lámparas UV se utilizan para analizar *minerales, gemas, antigüedades, bioquímica, estudios forenses*. e) Radiación UV se usa en *fotolitografía* para la manufactura de *semiconductores, circuitos integrados y circuitos impresos*. En esta técnica, una sustancia química (fotorresistencia) se expone al UV que ha pasado por una máscara; una reacción química ocurre en la sustancia fotorresistencia que se ha expuesto, y después del revelado aparece un patrón geométrico. f) Detección de *aislamiento eléctrico* por detección de *coronas de descarga* en aparatos eléctricos, donde los campos eléctricos fuertes ionizan el aire y excitan las moléculas de nitrógeno, que emiten en el UV. g) Lámparas UV se utilizan para *esterilización* del lugar de trabajo, utensilios utilizados en biología y en medicina. Se utilizan las lámparas de Hg de baja presión (254 nm, 185 nm). h) La radiación UV es un

viricida y bactericida muy efectivo, por lo cual se utiliza para *desinfectar agua de tomar*. Además se ha utilizado para desinfectar aguas de desecho. i) El UV se utiliza en *procesamiento de alimentos*, para eliminar microorganismos y pasteurizar alimentos líquidos. j) *Detección de fuegos* utilizando detectores basados en carburo de silicio (SiC) y nitruro de aluminio (AlN), ya que la mayoría de los fuegos emiten en el UVB. k) *Curar adhesivos y recubrimientos* que tienen fotoiniciadores que polimerizan con el UV en una reacción rápida. Se aplica en pegar a vidrios y plásticos, recubrimientos de pisos y rellenos dentales.

*Espectroscopia UV-Visible*. Es una técnica ampliamente utilizada en la química para *análisis* de estructuras químicas. En la Figura 41 se muestra un diagrama de un espectrofotómetro UV-visible típico.

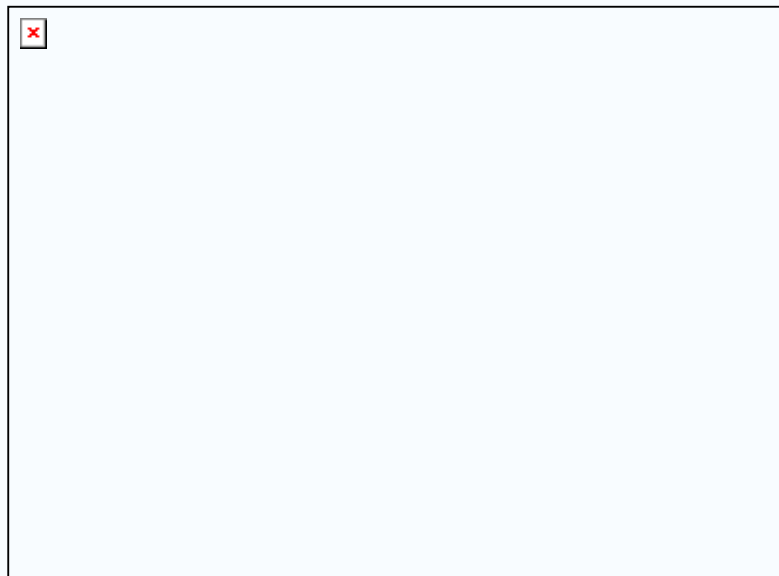


Figura 41. Diagrama de un espectrofotómetro UV-visible

El haz de luz de la fuente (lámpara UV ó lámpara visible) es separado en sus componentes (longitudes de onda) por una rejilla de difracción (o un prisma). El haz monocromático (una sola longitud de onda) se separa en dos haces de igual

intensidad por un espejo (medio espejo rotatorio). Un haz de *referencia* pasa por una celda de referencia (que contiene el solvente transparente, por ejemplo) y el otro haz pasa por la celda de la *muestra*, que contiene la solución de la muestra de interés. Las intensidades de los dos haces son detectados y medidos por detectores electrónicos (fotomultiplicadores, fotodiodos o CCD) y sus intensidades comparadas. La intensidad del haz de referencia se define como  $I_0$  y la intensidad del haz de la muestra como  $I$ . El instrumento hace un barrido completo desde la región del ultravioleta (200 -400 nm) y de la región visible (400- 800 nm). (Instrumentos modernos presentan todo el espectro completo en tiempo real a un arreglo de fotodiodos que cubre todo el rango o a un dispositivo CCD).

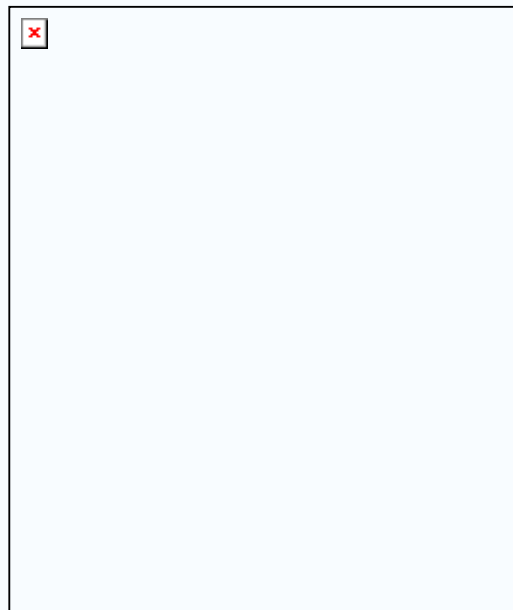


Figura 42. Espectro UV-visible de un aldehído en 95% alcohol

En la Figura 42 se muestra el espectro UV-visible de una muestra coloreada. Si la muestra no absorbe a una determinada longitud de onda,  $I = I_0$ . Si la muestra absorbe, entonces  $I < I_0$  y la diferencia se grafica como Intensidad vs. Longitud de onda (Ver Figura 42). La absorción se presenta como *transmitancia* ( $T = I / I_0$ ) o

como *absorbancia* ( $A = \log I_0 / I$ ). Si no hay absorción,  $T = 1.0$  y  $A = 0$ . La mayoría de los espectrofotómetros presentan Absorbancia en el eje vertical (desde  $A=0$  (100% transmitancia) hasta  $A=2$  (1% transmitancia)) y longitud de onda,  $\lambda$  (en nm). La longitud de onda de máxima absorbancia es característica de la muestra se designa como  $\lambda_{\max}$ . Se requiere el uso de solventes transparentes (que no absorben) tales como: agua, etanol, hexano, ciclohexano. La absorbancia de la muestra es proporcional a la concentración de la muestra de acuerdo a la ecuación:

$A = \epsilon c l$  (ecuación de Lambert- Beer), donde  $\epsilon$  = absorptividad molar,  $c$  = concentración en moles/ litro,  $l$  = longitud de la celda en cm. En el ejemplo de la Figura 42, la solución tiene 0,249 mg del aldehído en 95% etanol ( $c = 1,42 \times 10^{-5}$  moles/litro) en una celda de 1 cm. Utilizando la ecuación arriba se obtiene para las dos absorciones: a 395 nm,  $\epsilon = 36500$  y a 255 nm,  $\epsilon = 14000$ . La solución es de color naranja, que son las longitudes de onda que la solución no absorbe y deja pasar. Las sustancias con absorción fuerte tienen valores de  $\epsilon$  grandes ( $\epsilon > 10000$ ) y las sustancias con absorciones débiles tienen  $\epsilon = 10$  a 100.

Existen muchas otras espectroscopías que hacen uso de la radiación UV-visible en modalidades de absorción, emisión o dispersión. En la modalidad de absorción está la *espectroscopía de absorción atómica* (AAS) en la que la muestra está en fase gaseosa y atómica, se ilumina con radiación específica de un tubo de emisión con el elemento de interés y se analiza la proporción de absorción de dicha radiación por transiciones electrónicas del elemento de interés. Como cada elemento tiene una absorción característica, el método es bastante sensible y específico. La *espectroscopía atómica de emisión* (AES) utiliza la emisión característica de radiación por los átomos de un elemento excitados en una chispa o arco, para su análisis; muy aplicado a nivel industrial en la metalúrgica. La *espectroscopía de emisión de llama* (FES) utiliza una llama para volatilizar y

excitar los átomos y analizar la emisión de radiación; muy utilizado para el análisis de metales alcalinos y alcalinotérreos. La *espectroscopia de fotoelectrones con UV* (PES) activa la muestra con luz UV y excita electrones interiores, los cuales son analizados como fotoelectrones; se obtiene información sobre las energías de los niveles electrónicos de los elementos en una muestra (Ver XPS, 3C-3 arriba). La *fotoluminiscencia*, *fluorescencia* y *fosforescencia* son variantes de procesos de excitación de sustancias por la radiación. La *fluorescencia* corresponde a un proceso en el que la muestra es excitada por radiación desde el estado fundamental a un nivel excitado y luego *emite* radiación al retornar al estado fundamental. La *fosforescencia* es un proceso análogo, pero ha ocurrido una transición interna (entrecruzamiento de niveles sin radiación) a otro estado, que por sus características de simetría no se le permite una transición al estado fundamental; el proceso de emisión y caída al estado fundamental toma más tiempo y la fosforescencia está retrasada. La *espectroscopia Raman* corresponde a un proceso de dispersión de radiación por una muestra de radiación láser incidente. La dispersión puede mantener la frecuencia de la radiación incidente (dispersión *Rayleigh*) o modificarla a través de algún proceso interno de la sustancia (por procesos vibracionales/ rotacionales, dispersión *Raman*). La *dispersión óptica rotatoria* y el *dicroísmo circular* son espectroscopías que permiten analizar la absorción de *luz polarizada* por sustancias o moléculas que tienen *actividad óptica*. (tienen centros quirales que hacen que la estructura y su imagen especular no sean superponibles)

*Celdas fotovoltaicas (PVC) ó celdas solares.* Las *celdas fotovoltaicas* son dispositivos de semiconductores, usualmente de silicio, que convierten la luz solar directamente en electricidad. No contienen líquidos, sustancias químicas corrosivas o partes móviles. Producen electricidad mientras la luz incide sobre ellas, requieren muy

poco mantenimiento, no producen contaminación y son silenciosas, siendo la energía fotovoltaica el método más seguro y limpio de producir energía. La energía solar es un recurso renovable y amigable al ambiente, está disponible para todos y es gratuita. La energía solar puede proveer calor, luz, potencia mecánica y electricidad. Las celdas fotovoltaicas más sencillas proveen energía a relojes y calculadoras, pero en arreglos de paneles pueden proveer electricidad en el hogar, oficina o fábrica o proveer de electricidad al sistema de red eléctrica. En la Figura 43 se muestran varios ejemplos de celdas fotovoltaicas. En la Figura 44 se indica el arreglo de paneles para producir electricidad. Las celdas fotovoltaicas vienen en varios tamaños, pero la mayoría son de

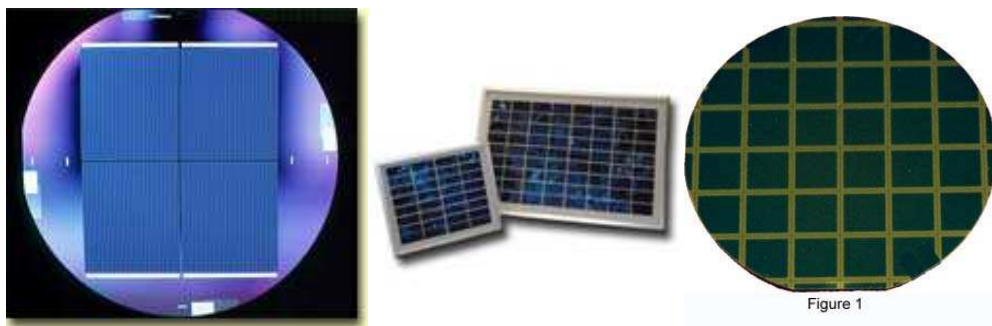


Figura 43. Ejemplos de celdas fotovoltaicas

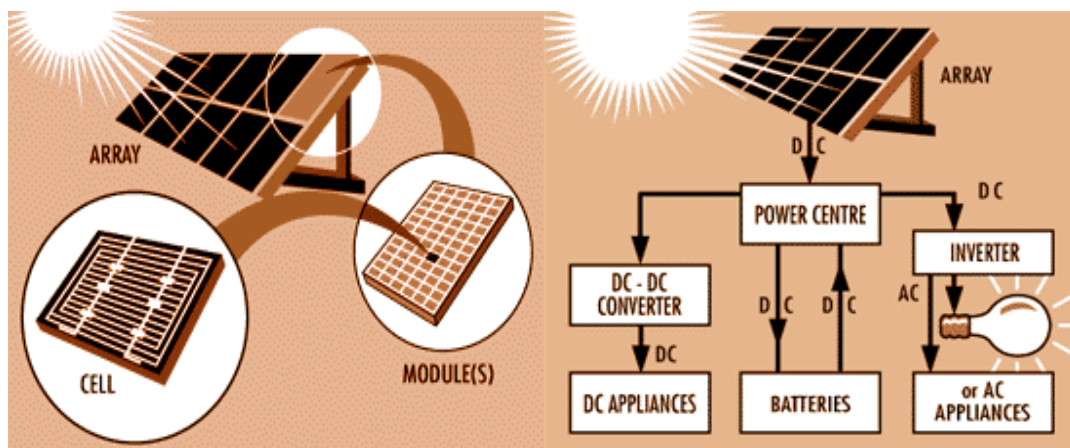


Figura 44. Arreglo de paneles solares para producir electricidad.

10 cm x 10 cm y generan cerca de  $\frac{1}{2}$  voltio de electricidad. Las PVC se agrupan en módulos o paneles para producir mayor voltaje y mayor potencia. Por ejemplo un módulo de 12 voltios puede tener de 30 a 40 celdas PV. Un módulo de 50 vatios de potencia mide cerca de 40 cm x 100 cm. La eficiencia de los paneles solares está entre 12 y 15%, pero nueva tecnología está llegando a 30% eficiencia. Las celdas PV producen corriente directa (DC), igual que una batería. Las lámparas incandescentes requieren 120 voltios de corriente alterna (AC), así que parte de la corriente DC se convierte en AC con un *inversor*. Igualmente se requiere de un *convertidor DC-DC* para los implementos eléctricos como televisión (TV), estereos, radios, horno microondas y computadoras. (Ver Figura 44). Parte de la energía producida en los paneles solares se almacena en baterías para proveer energía durante la noche o en días nublados. La energía solar se puede utilizar directamente y eficientemente para calentar agua (en dispositivos sencillos de cobre). Además del silicio, otros materiales semiconductores se pueden utilizar. Semiconductores III-V como arsenuro de galio (GaAs) y antimonuro de galio (GaSb) pueden convertir luz visible en electricidad; GaSb puede convertir el infrarrojo. Se han utilizado en aplicaciones en la tierra y espaciales. Otro tipo de celda fotovoltaica son las de *películas delgadas* de silicio amorfo, diselenuro de cobre e indio ( $\text{CuInSe}_2$ ), telurio de cadmio (CdTe). *Dispositivos de multiunión* son dispositivos que contienen varias capas que permiten capturar y convertir más eficientemente el rango total de luz solar. La primera capa absorbe la luz de mayor energía; se utiliza GaAs, silicio amorfo,  $\text{CuInSe}_2$ , fosfuro de galio e indio (GaInP). Ya existen celdas solares que pueden integrarse en la construcción de los edificios (paredes, tragaluces, techos, etc)

*Pantallas para visión:* Existen una gran variedad de tipos de pantallas para lograr visualizar imágenes y textos en las diversas aplicaciones: televisión,



monitores para computadoras, pantallas de computadora, pantallas de celulares, relojes, cámaras y calculadoras, osciloscopios, pantallas de cajeros automáticos, paneles de información y propaganda. Entre los más comunes están: a) *tubos de rayos catódicos* (CRT). b) *pantallas de cristal líquido* (LCD). c) *Pantallas de plasma*. d) *Diodos orgánicos emisores de luz* (**OLED**, *organic light-emitting diode*)

*Tubos de rayos catódicos* (CRT): Es un dispositivo para mostrar imágenes comúnmente utilizada en televisores, monitores de video, pantallas de computadoras, osciloscopios. En la Figura 45 se presenta un diagrama de un tubo de rayos catódicos utilizado en los televisores. Los rayos catódicos son flujos de

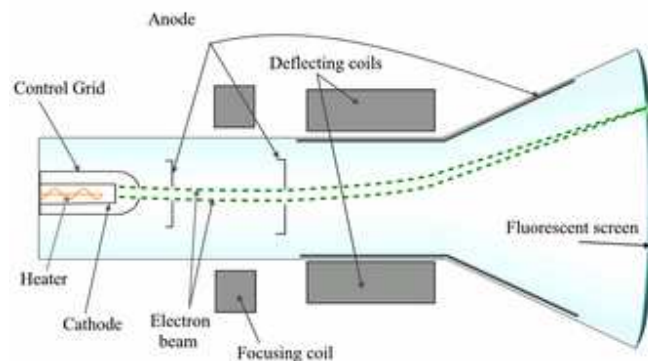


Figura 45. Tubo de rayos catódicos con pantalla fluorescente.

electrones de alta velocidad, emitidos por un cátodo calentado, acelerados por ánodos a alto voltaje, en un tubo al vacío. El haz de electrones es desviado por campos magnéticos (deflexión magnética) y eléctricos (deflexión electrostática), enfocado y barrido sobre la superficie de observación (alrededor de la cual se encuentra el ánodo), que está cubierta con un material *fosforescente* (usualmente conteniendo metales de transición o tierras raras); cuando los electrones chocan contra el material se emite luz. En los televisores y monitores de computadora, el área frontal se le hace un barrido con un patrón fijo y la imagen se crea modulando

la intensidad del haz de electrones de acuerdo a un programa de la señal de video. En un *osciloscopio*, la intensidad del haz de electrones se mantiene constante, la deflexión horizontal es proporcional al tiempo y la vertical es proporcional a la señal; la deflexión es con los campos eléctricos que son más rápidos que los magnéticos. En un tubo a colores, se utilizan diferentes materiales que emiten luz roja, verde y azul empaquetados en tiras o en cúmulos; tres pistolas de electrones, una para cada color, tienen la energía adecuada para excitar el material del color respectivo solamente. La cubierta de vidrio con plomo bloquea los rayos X que se producen por el bombardeo de electrones en los materiales. La superficie se carga de electricidad estática que atrae el polvo, que debe limpiarse periódicamente.

*Pantallas de cristal líquido (LCD):* Las *pantallas de cristal líquido* son dispositivos de presentación delgados y planos que tienen un número de *pixels* de colores o monocromáticos colocados en frente de una *fente de luz* o de un reflector. Utiliza poca electricidad, siendo muy útil para equipos electrónicos de baterías. En la Figura 46 se presentan las láminas que forman parte de un LCD en

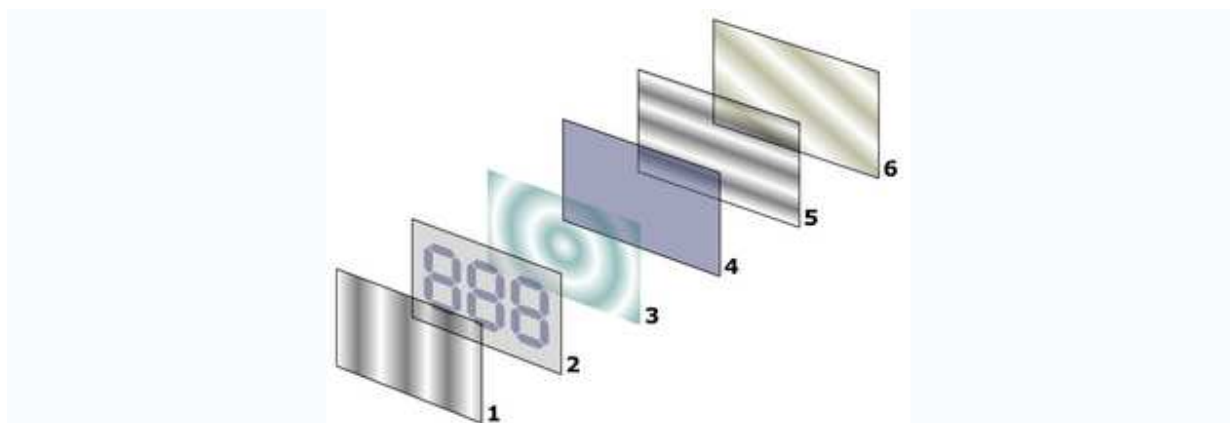


Figura 46. LCD reflejado de cristal nemático torcido (ver texto)

modalidad de *reflejado*. Cada *pixel* (picture element, elemento del cuadro) consiste de una columna de moléculas de cristal líquido (3, nemático torcido) suspendida

entre dos *electrodos transparentes* (2 ITO, 4 ITO) y dos *filtros polarizantes* con los ejes de polarización perpendiculares entre sí (1 vertical; 5 horizontal); al final hay una superficie reflectora (6) si el LCD depende de luz externa o una *fuentes de luz*. Las formas de los electrodos transparentes (2) determinan las formas oscuras cuando el LCD está prendido; tiene canales verticales grabados en la superficie de modo que el cristal líquido se alinee con la luz polarizada. (filtro 1) (el otro electrodo (4) tiene canales horizontales para alinear con el filtro horizontal (5)). El cristal líquido tuerce la polarización de la luz entrando en un filtro para permitir su paso a través del otro filtro. Las moléculas de cristal líquido tienen cargas eléctricas. Al aplicar carga eléctrica en los electrodos transparentes en cada *píxel* (o *subpíxel* si es de colores), las moléculas se alinean paralelo al campo eléctrico por fuerzas electroestáticas. Esto cambia la torsión en la molécula y permite pasar (o no pasar) una cantidad de luz a través de los filtros polarizantes. El LCD puede ser de colores, cada píxel tiene subpíxel rojo, verde y azul y filtros adicionales. Los LCD reflejados se utilizan en relojes y calculadoras y tienen matrices pasivas. Los LCD de transmisión se utilizan en monitores de computadoras, asistentes personales digitales, teléfonos celulares y televisores y tienen matrices activas (tienen una matriz de miles de transistores en película delgada que controlan cada píxel, son más rápidos, más brillantes y con mejor resolución). Las pantallas LCD pueden ser colocadas sobre una pared y pueden variar mucho en tamaño.

*Pantallas de Plasma:* Los paneles de *plasma* de los televisores contienen un arreglo de celdas pequeñas, llamados *pixels*, que contiene *fósforos* correspondientes a los colores rojo, verde y azul. Colocado contra estas celdas es una franja muy delgada de celdas pequeñas con gas noble (Ne, Xe) que al excitar pasan al estado de plasma. Impulsos eléctricos excitan al gas, que emite un destello de luz ultravioleta en sitios e intervalos precisos. Los fósforos absorben estas

señales y re-irradian la energía como luz visible, produciendo las imágenes vivas que aparecen en la pantalla. En la Figura 47 y Figura 48 se muestra un diagrama de cómo funciona el método y como es el arreglo de los componentes en la pantalla de plasma. En la Figura 49 se muestra una pantalla de televisor en operación.

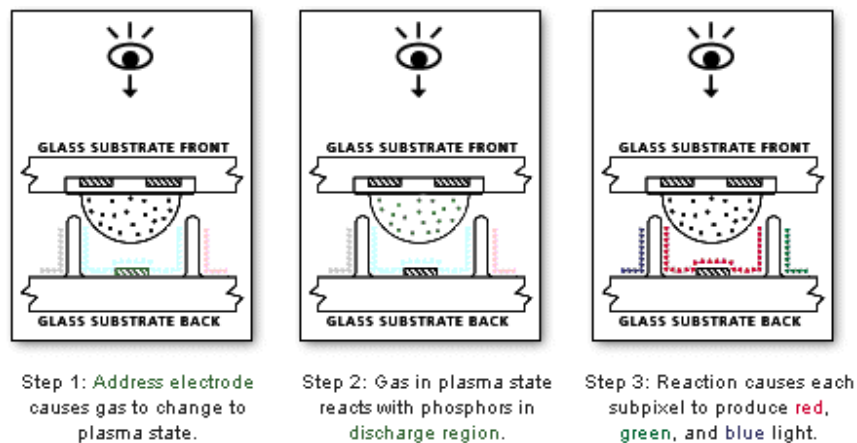


Figura 47. Diagrama del método de funcionamiento del plasma.

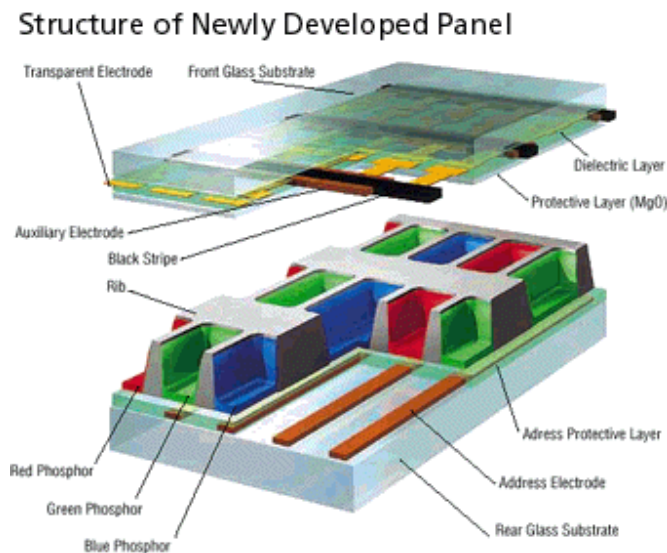


Figura 48. Estructura de un arreglo de componentes de la pantalla de plasma.



Figura 49. Pantalla de plasma de un televisor.

Las pantallas tienen alta resolución, excelente capacidad para data y video, son visibles en luz normal del cuarto, tiene alta compatibilidad (VCR, DVD, gráficos), operación muy silenciosa, visibilidad en 160 grados, bajo mantenimiento, larga vida (10 años), pueden ser tan grandes como 200 cm diagonal.

*Diodos orgánicos emisores de luz (OLED):* Un OLED es un diodo emisor de luz (LED) en película delgada (Ver 3D-1) en el que la franja emisora es un compuesto orgánico (usualmente un polímero conductor). Estos dispositivos son más baratos de fabricar que los LED comunes. Cuando el material emisor es polimérico se pueden depositar varias capas de OLED en una superficie para crear pantallas a color para televisores, pantallas de computadora, pantallas portátiles y



Figura 50. Muestra de pantallas usando diodos orgánicos emisores de luz

avisos de propaganda. Uno de los atributos de los OLED es su flexibilidad. En la Figura 50 se muestran dos ejemplos de aplicaciones de OLED. Estos no requieren una fuente de luz atrás como los LCD y consumen menos energía, haciéndolos muy útiles en teléfonos celulares y cámaras digitales. Se pueden aplicar a tamaños grandes (se han fabricado hasta de 42 pulgadas). Los dispositivos fabricados con polímeros conductores también se conocen como *diodos de polímeros emisores de luz* (PLED). Los OLED tienen una vida limitada (20 000 horas), especialmente los compuestos que emiten en el azul, pero se están desarrollando sustancias que tengan mayor vida.

*Importancia de la luz UV-visible en la biosfera:* Debido a que Sol emite fuertemente en la región UV-visible- Infrarrojo, los seres vivos en el planeta Tierra han evolucionado para aprovechar la energía que nos llega del Sol. Los productores primarios de la cadena alimenticia (plantas y fitoplancton) utilizan la luz solar para producir sustancias diversas en el proceso de *fotosíntesis*. La energía almacenada en esas sustancias orgánicas es utilizada de allí en adelante por toda la cadena alimenticia para su sobre-vivencia. Muchas especies de animales han desarrollado la capacidad de “ver” o ser sensibles a la región visible (y algunos al UV e IR, como insectos y aves) y han desarrollado órganos especializados de *visión*. Esto ha conducido a la evolución de pelaje, plumaje o cobertura muy coloreada y vistosa en muchas especies para transmitir información a su especie o a sus depredadores. La región ultravioleta generalmente es muy energética y suele ser dañina para las especies vivas en la tierra. Los animales marinos están protegidos por el agua, que absorbe la luz UV. En el planeta Tierra se ha desarrollado una capa protectora contra la luz UV de más alta energía (UVB, UVC) que es la *capa de ozono* ubicada en la estratosfera y formada por la acción de la misma radiación UV con las moléculas de oxígeno. La capa de ozono permitió el

desarrollo de la vida fuera del agua. Recientemente se ha observado destrucción de la capa de ozono por sustancias gaseosas que contienen cloro, tales como los clorofluorocarbonos (CFC), el cloroformo y tetracloruro de carbono. Esto aumentará los daños en los seres vivos causado por el UV, incluyendo cáncer de la piel en humanos. La radiación infrarroja que llega del sol y la característica de la atmósfera terrestre, mantiene una temperatura apropiada para la vida en este planeta, ya que los seres vivos funcionan dentro de un rango de temperatura adecuado. La presencia de gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono, metano y otros mantienen esa temperatura a través del *efecto invernadero*. Recientemente un aumento desmesurado del dióxido de carbono en la atmósfera producto del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) como fuentes primarias de energía, está conduciendo a un calentamiento global que puede tener consecuencias muy serias para la biosfera en el planeta. Para la especie humana, la presencia de luz visible le ha permitido organizar la mayoría de las actividades de la sociedad durante el período diurno y cualquier otra necesidad de luz se cubre con fuentes artificiales que producen la radiación necesaria (alumbrar ambientes internos y nocturnos). La especie humana también ha utilizado fuentes de luz visible y ultravioleta para efectuar reacciones químicas inducidas por la luz (reacciones fotoquímicas, fotólisis, fotolitografía, máquinas fotocopadoras, impresoras láser, impresión de microcircuitos)

### **3E-1. Infrarrojo. Origen y fuentes**

El *infrarrojo* (IR) es radiación electromagnética de una longitud de onda mayor que la luz visible, pero menor que *microondas*. El nombre indica que está “por debajo” del rojo, que es el color visible de mayor longitud de onda. El IR se extiende desde 700 nm a 1 mm (1000  $\mu\text{m}$ ). La zona de IR del espectro no se puede

ver, pero si se puede detectar. El IR frecuentemente se subdivide en cuatro regiones: a) Infrarrojo cercano (NIR, 780 -3000 nm); b) Infrarrojo medio (MWIR, 3000-6000 nm); c) Infrarrojo lejano (LWIR, 6000- 15000 nm); d) Extremo infrarrojo (0,015 -1,0 mm). EL NIR se utiliza en *comunicaciones con fibra óptica* debido a la baja pérdida por atenuación en el SiO<sub>2</sub> . Las bandas de infrarrojo para telecomunicaciones se dividen en varias zonas, dependiendo de la disponibilidad de fuentes de radiación, materiales que transmiten o absorben (fibras) y los detectores:

**banda O** 1260–1360 nm ; **banda E** 1360–1460 nm ; **banda S** 1460–1530 nm

**banda C** 1530–1565 nm; **banda L** 1565–1625 nm; **banda U** 1625–1675 nm

Los objetos que generan calor también generan radiación infrarroja y estos objetos incluyen animales y el cuerpo humano, cuya emisión es fuerte a 9,4 μm. IR no pasa a través de muchos materiales que son transparentes en el visible como el vidrio, el agua o el plástico y algunos materiales opacos al visible son mas transparentes en el IR como el germanio y silicio.

Un cuerpo caliente emite radiación como un *cuerpo negro*. Max Plank propuso que el cuerpo emite radiación no en forma de ondas continuas, sino en pequeñas porciones llamadas *cuanta* o *paquetes de ondas*, la suma de muchos paquetes daría una onda. Esto dió origen a la teoría cuántica. La ecuación de la

emisión de un emisor perfecto es:  $W_{\lambda} = 2\pi hc^2 \left[ \lambda^5 \left( e^{ch/\lambda kT} - 1 \right) \right]^{-1}$  donde  $h$  es la constante de Plank ( $6.626 \times 10^{-34}$  Js),  $c$  es la velocidad de la luz ( $2.9979 \times 10^8$  m/s),  $\lambda$  es la longitud de onda,  $k$  es la constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K) y  $T$  es la temperatura absoluta en K. La *emisión radiante espectral*,  $W_{\lambda}$  , es la potencia óptica irradiada en un hemisferio por unidad de área de superficie emisora por



unidad de longitud de onda; esto se muestra en la Figura 51, para un cuerpo negro a temperatura ambiente (20 °C). Es costumbre dar las unidades de longitud de onda

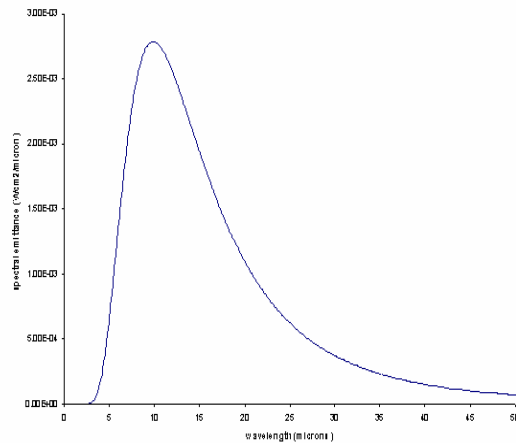


Figura 51. Emisión electromagnética de un cuerpo negro a 20 °C

En micras ( $\mu\text{m}$ ) y las áreas en  $\text{cm}^2$ . El máximo de emisión para el cuerpo a 20 °C es de 10  $\mu\text{m}$  y cae rápidamente hacia cero, siendo la mayoría de la radiación en el infrarrojo. Conforme aumenta la temperatura del cuerpo negro, aumenta la emisión en todas las longitudes de onda, pero el incremento es mayor a longitudes de onda menores, haciendo que el pico de la distribución se desplace hacia longitudes de onda menores (hacia el UV); esto se ilustra en la Figura 52 para 100 °C y 1000 °C. Cuando un objeto se calienta empieza a brillar, primero como rojo caliente y finalmente como blanco caliente. La emisión en el rango de longitudes de onda grandes en el visible (alrededor de 0.7  $\mu\text{m}$ ) empieza a incrementar conforme aumenta la temperatura, hasta llegar a cubrir buena parte del espectro visible, pero aun antes del punto de fusión de los metales, la distribución está todavía en el

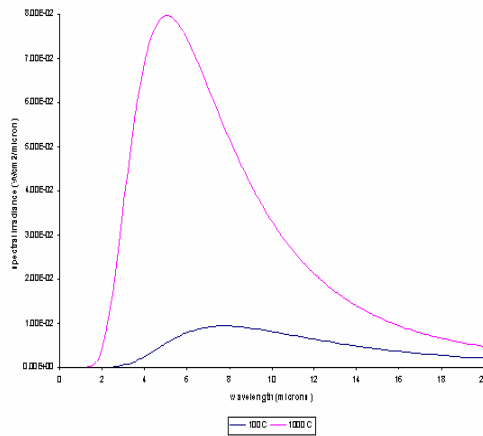


Figura 52. Emisión electromagnética de cuerpos negros a 100°C and 1000°C infrarrojo. Un bombillo incandescente emite una luz “caliente” que se inclina hacia el rojo y emite mucho calor, y una lámpara fluorescente es mas “blanca”. En la Figura 53 se muestra una *fente de radiación de cuerpo negro* comercial

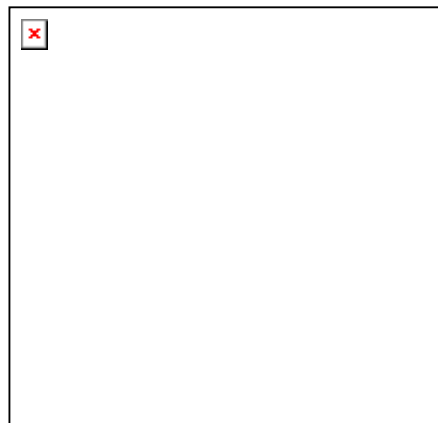


Figura 53. Fuente de radiación de cuerpo negro.

En la Figura 54 se muestra una “imagen” de un perro en la región “infrarrojo medio” (térmico) con “colores falsos” y la relación con la temperatura. En la Figura 55 se muestra la transmitancia de la atmósfera en la región infrarroja.

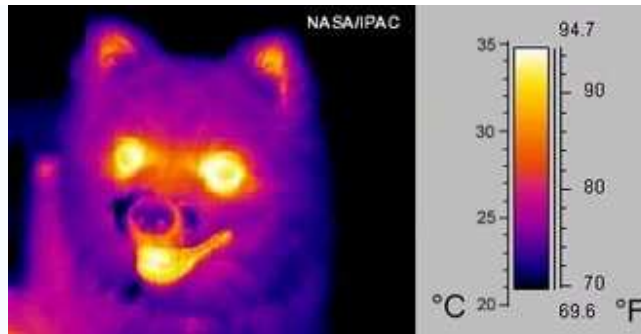


Figura 54. Imagen de un perro en el infrarrojo medio con “colores falsos”.

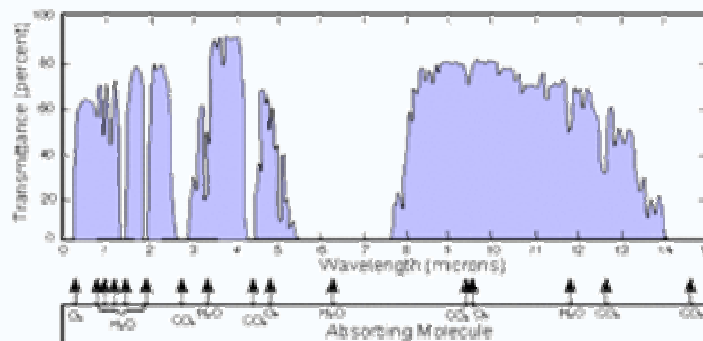


Figura 55. Transmitancia de la atmósfera en la región infrarrojo.

Se indica el tipo de región donde las diferentes moléculas de la atmósfera absorben. La Tierra es un emisor en el infrarrojo: la Tierra absorbe la luz UV, visible e infrarrojo cercano que recibimos del Sol y re-emite la mayoría de la energía como infrarrojo medio y lejano hacia la atmósfera (alrededor de  $10000 \text{ cm}^{-1}$ ). Los gases atmosféricos (principalmente *agua*, *dióxido de carbono*, pero también *metano*, *óxido nitroso*, *clorofluorocarbonos*,  $\text{SF}_6$ ) absorben en el infrarrojo (Ver Figura 55) y re-irradian en todas direcciones; esto produce el *efecto invernadero* que hace que aumente la temperatura promedio del planeta.

*Fuentes de radiación infrarrojo:* Se han desarrolla una gran variedad de fuentes emisoras de radiación infrarroja, motivado por la cantidad de nuevas

aplicaciones del uso de esta región del espectro electromagnético, especialmente en la tecnología de controles y telecomunicaciones. Existen fuentes *incandescentes* que utilizan metales (lámparas de W, Re) o cerámicas incandescentes (radiadores de Nerst), *diodos emisores de luz* (LED) en el infrarrojo (ver 3D-1, Fig. 35 a,b) han tenido un desarrollo muy amplio y cubren prácticamente todas las regiones del infrarrojo. Las fuentes de infrarrojo de banda ancha se muestran en la Figura 56.

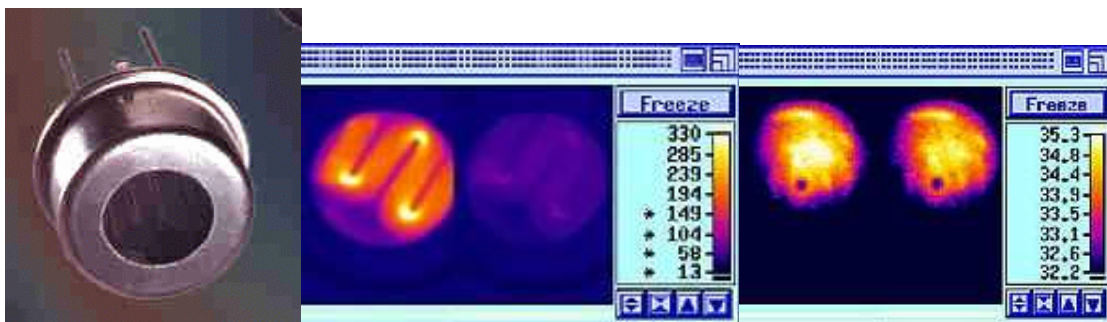


Figura 56. Fuente de banda ancha de IR. La imagen térmica de fuente pulsando. Imagen térmica pulsando de un bulbo.

Estas fuentes ofrecen alta intensidad, bandas de 2-20  $\mu\text{m}$ , pulsos u operación continua, amplia modulación de temperatura, estabilidad a largo plazo. Ofrecen alta emisividad en infrarrojo medio (MWIR, 2-5  $\mu\text{m}$ ) e infrarrojo lejano (LWIR, 8-12  $\mu\text{m}$ ), a menores temperaturas que lámparas de tungsteno (W). Los emisores pulsados se enfrían rápidamente en “apagado” (a diferencia de un bulbo, que mantiene su temperatura entre pulsos (Ver Figura 56, centro y derecha). Otra fuente importante de radiación infrarroja son los *láseres de infrarrojo* entre los cuáles se encuentran láseres de estado sólido (semiconductores) en el IR con muchas aplicaciones como sensores, lectores de discos compactos y los láseres de  $\text{CO}_2$  que tienen muchas aplicaciones industriales (Ver 3D-1, Figura 32, 34).

### 3E-2. Interacción con la materia

La mayoría de la materia en los diferentes estados (gas, líquido, sólido) tiene la capacidad de interactuar con la radiación infrarroja. La radiación puede ser transmitida (la sustancia es transparente al IR, por ejemplo los gases diatómicos homonucleares ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ) de la atmósfera; Si, Ge en varias regiones del IR, cristales de haluros alcalinos (NaCl, KBr, CsI) en varias regiones del IR.); reflejada (como varias superficies pulidas de metales), o absorbida (por la mayoría de las moléculas y los materiales). Al absorber la radiación infrarroja, el contenido energético de la sustancia aumenta. Al absorber radiación IR ocurren transiciones en los movimientos vibracionales y rotacionales de las moléculas o los movimientos de red de las sustancias sólidas. (Ver 3E-3, espectroscopia infrarroja). Al absorber esa energía la sustancia adquiere una mayor *temperatura*. O sea la temperatura de una sustancia mide la magnitud de los movimientos de los átomos, moléculas o redes. En los sistemas semiconductores, para muchas sustancias, la brecha de energía puede ser suficientemente pequeña que se logre “excitar” los electrones (desde la banda de valencia (llena) a la banda de conducción (vacía), o desde otros niveles incorporados en impurezas (de tipo p ó de tipo n)) Este tipo de semiconductores se utilizan en los “detectores de IR” (Ver abajo). Algo similar se observa en los polímeros conductores, donde una “banda de absorción” puede ocurrir en la región del infrarrojo cercano. Ciertas transiciones electrónicas en ciertos complejos denominados de “valencia mixta”, también se han observado en el infrarrojo cercano. Muchos animales, incluyendo los humanos, son “sensibles” a la radiación infrarroja y tienen sensores (generalmente en la piel) que indican cuando recibimos radiación infrarroja, que la detectamos como sensación de *calor*. Igualmente muchos animales (por ejemplo reptiles, que se dicen que tienen “sangre fría”) necesitan absorber energía calórica para su metabolismo, y se colocan en el sol diariamente a conseguir ese calor.

### 3E-3. Aplicaciones del infrarrojo

*Detectores de radiación infrarroja:* Muchas de las aplicaciones interesantes de la región infrarrojo se han desarrollado gracias a la gran variedad de *detectores de infrarrojo* que ya existen. Estos detectores son *electro-ópticos*: absorben radiación electromagnética y producen una señal eléctrica que usualmente es proporcional a la irradiancia (intensidad de la radiación electromagnética incidente). Dependiendo del tipo de detector y como opera, la producción puede ser un voltaje o una corriente. Un detector electro-óptico es usado para sentir o medir la radiación emitida o reflejada por objetos dentro del campo de vista óptico del detector. Los detectores se dividen en dos clases: *detectores térmicos* ó *detectores cuánticos*.

*Detectores térmicos:* Los *detectores térmicos* simplemente absorben la radiación incidente, el movimiento de los átomos se incrementa y la temperatura del detector aumenta o disminuye hasta llegar a un cuasi-equilibrio con la radiación siendo absorbida. La temperatura cambiará hasta que la energía siendo irradiada y conducida térmicamente es igual a la velocidad a la que es absorbida de la radiación incidente. Cuando la radiación incidente está por encima del ambiente, el detector absorbe más energía y la vibración de sus átomos y su temperatura aumenta. Los detectores térmicos más comúnmente usados son: la *termopila*, *detectores piroeléctricos* y *bolómetros*.

*Termopilas:* Las *termopilas* es una combinación en serie de *termocuplas*. Un grupo de uniones de las termocuplas está unido como reservorio de calor a la caja del detector mantenido a la temperatura del ambiente. El otro grupo de uniones está pegado a una *membrana* que está térmicamente aislada del ambiente. La radiación incidente es absorbida por la membrana, y la temperatura de la

membrana con el grupo de uniones pegados cambia en correspondencia. El voltaje generado a través de una termocupla es lineal con la diferencia en temperatura entre las dos uniones y por consiguiente proporcional a la potencia óptica incidente en el detector. La energía absorbida y la rapidez para equilibrarse dependen del tamaño del detector.

*Detectores piroeléctrico:* Los sensores *piroeléctricos* están hechos de un material cristalino que genera una carga eléctrica superficial cuando se expone al calor en forma de radiación infrarroja. Cuando la cantidad de radiación que incide sobre el cristal cambia, también cambia la cantidad de carga generada que se mide con electrónica adecuada. Como los elementos del detector son sensibles en un rango amplio, se pueden utilizar filtros para limitar ese rango si es necesario. En la Figura 57 se presenta una configuración típica de un detector piroeléctrico.

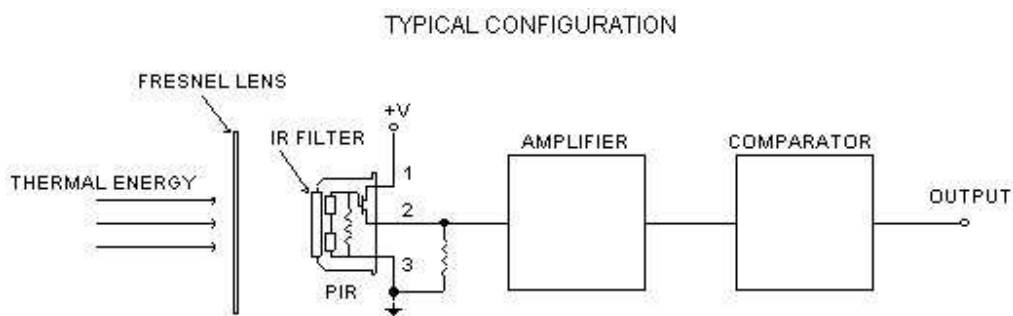


Figura 57. Configuración típica de un detector piroeléctrico

Los materiales piroeléctricos muy comúnmente también son materiales piezoeléctricos (que son aislantes que generan un dipolo eléctrico cuando están bajo tensión mecánica). Cuando el cristal piroeléctrico se calienta (o se enfría), la expansión (o la contracción) es anisotrópica causando que el material se tense y genere un voltaje debido al campo del dipolo resultante. El detector piroeléctrico puede operar en modo de voltaje o de corriente.

*Bolómetros:* Un *bolómetro* es un dispositivo aislado térmicamente que absorbe radiación y convierte la energía de esta radiación en calor. Conforme se calienta el material, el aumento en temperatura se siente con un transductor térmico que genera una señal eléctrica. Los mejores bolómetros requieren absorbedores y transductores con calor específico pequeño (que produce un aumento grande en temperatura por la carga de radiación incidente). También el cambio en resistencia por el cambio en temperatura se puede medir pasando una corriente pequeña y midiendo el voltaje. En la Figura 58 se presentan varios ejemplos de bolómetros.

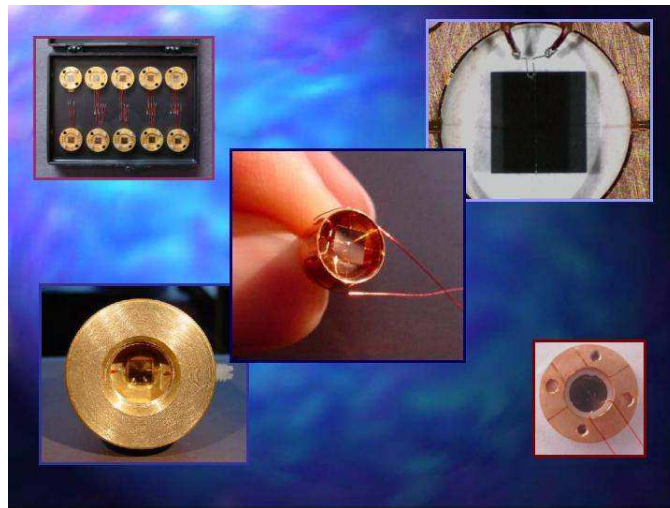


Figura 58. Ejemplos de bolómetros comerciales.

Los bolómetros están encontrando aplicaciones en imagenología térmica. Microbolómetros son depositados en celdas de un circuito integrado. El número de pixeles puede ser de 100 000 o más, y alcanzan una resolución similar a las cámaras visibles digitales. Igualmente se utilizan en espectrofotómetros de infrarrojo.

*Detectores cuánticos:* Los *detectores cuánticos* son hechos con semiconductores en los que la radiación infrarrojo incidente excita electrones de la



banda de valencia a la banda de conducción del material. Los detectores se mantienen a temperatura constante. La longitud de onda crítica es  $\lambda_c = hc/E_g$  donde  $E_g$  es la brecha de energía del material. Longitudes de onda por debajo del valor crítico producen pares de electrón-hueco para la conducción, pero longitudes de onda mayores (menor energía) no excitan el material. Silicio detecta radiación con longitudes de onda menores que 1,1  $\mu\text{m}$ . y se utilizan como arreglo de detectores en cámaras de televisión. PbS detecta radiación con longitudes de onda menores de 3,0  $\mu\text{m}$  y es un buen detector para SWIR. PbSe e InSb detectan radiación con longitud de onda menor que 5  $\mu\text{m}$  y son buenos para detectores de MWIR. Conforme se reduce  $E_g$ , mas electrones se pueden excitar por agitación térmica, lo que produce ruido térmico. Los detectores para MWIR y LWIR mejoran su respuesta si se enfrían, por ejemplo con enfriadores termoeléctricos que pueden enfriar hasta  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  o con nitrógeno líquido (78K). Los electrones excitados por los fotones pueden pasar a niveles por encima del mínimo de la banda de conducción, pero rápidamente decae y genera calor. Alguno de los electrones se recombinan con los huecos, o sea que no todos los electrones son detectados; la relación de electrones a fotones es la *eficiencia cuántica* y siempre es menor que la unidad (o 100%). En la Figura 59 se muestra la respuesta (responsivity) de un fotodiodo de InGaAs con la longitud de onda de radiación incidente y a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Para longitudes de onda menores que un valor crítico (a mayores energías) la respuesta es alta, pero decae rápidamente a cero a longitudes de onda mayores (menor energía) que el valor crítico, excepto que se observa una “cola” debido a la excitación térmica presente a temperatura ambiente. Las ondulaciones observadas para  $\lambda$  menores que  $\lambda_c$ , es debido a la dependencia de la absorbtividad del material con la longitud de onda.

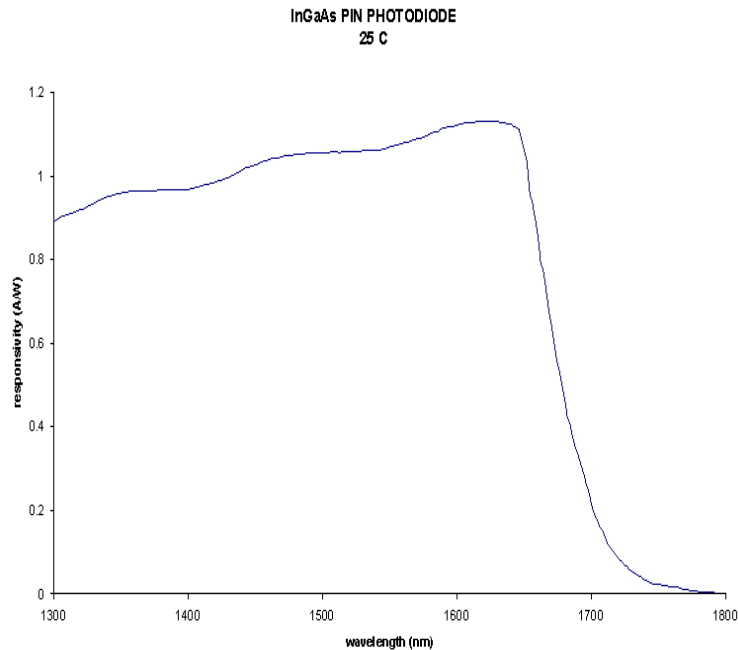


Figura 59. Respuesta espectral de un fotodiodo PIN de InGaAs a 25 °C.

Existen dos tipos de detectores cuánticos: *fotoconductores* y *fotodiodos*.

*Fotoconductores:* Los *fotoconductores* están hechos de semiconductores que han sido fuertemente “dopados” tipo-n ó tipo -p y frecuentemente se utilizan para detección en el infrarrojo. Tienen una conductividad eléctrica finita que aumenta con la temperatura y una resistencia entre 10  $\Omega$  y 10 M $\Omega$ . Cuando se exponen a la radiación se generan pares adicionales de electrón- hueco que reducen la resistencia (del orden de un 1%). Los fotoconductores se operan a un voltaje fijo y se mide la corriente que fluye en el circuito. La corriente en la ausencia de radiación se llama *corriente oscura*. La *foto-señal* es el aumento de la corriente cuando el detector se expone a la radiación. Como la brecha de energía de los detectores en el IR es pequeña, hay un número considerable de termo-excitación de electrones, que puede dar una señal por encima de la foto-corriente. Para poder eliminar el ruido, se utiliza una señal modulada de la radiación incidente y la señal aparece a la frecuencia de modulación. Los materiales más comúnmente utilizados

para detectores fotoconductores en infrarrojo son: PbS (para SWIR,  $\lambda < 3 \mu\text{m}$ ), PbSe (MWIR,  $\lambda < 5 \mu\text{m}$ ) y HgCdTe (La mitad de los sitios son Te, la otra mitad se divide entre Hg y Cd; respuesta depende de la concentración de Hg y Cd: 30% Cd, 70% Hg,  $\lambda > 5 \mu\text{m}$ , MWIR; 20% Cd, 80% Hg,  $\lambda < 10 \mu\text{m}$ , LWIR) . Este detector se enfría con nitrógeno líquido. La Figura 60 muestra un detector de fotoconductividad de HgCdTe comercial. Tiene uso en espectroscopia IR.

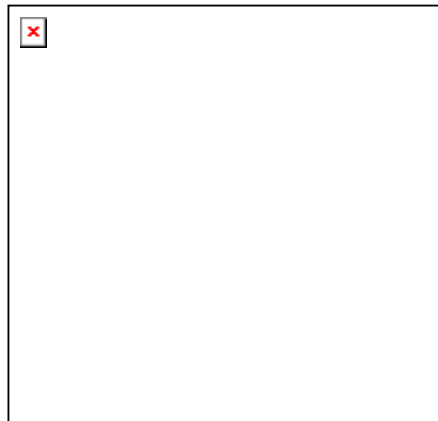


Figura 60. Detector de fotoconductividad de HgCdTe.

*Fotodiodos:* Un diodo consiste de un semiconductor de cristal único, donde una porción ha sido dopada tipo-n y el resto tipo-p. Los electrones en la banda de conducción del lado tipo-n tenderán a moverse a través de la unión entre los dos lados y se combina con los huecos en el lado tipo-p. Esto genera una carga negativa neta del lado tipo-p y se genera una diferencia de potencial en la unión. Cuando el fotodiodo se expone a la radiación infrarrojo se generan cargadores de carga adicionales. Si no se permite que fluya una corriente, se genera un voltaje que depende logarítmicamente con la intensidad de la radiación. Los materiales más comunes para fotodiodos infrarrojo son: InGaAs (  $\lambda < 1,6 \mu\text{m}$ , SWIR), Si (NIR), InSb, HgCdTe (enfriados 78K, LWIR, MWIR) En la Figura 61, se muestran varios ejemplos de fotodiodos para la región de IR.

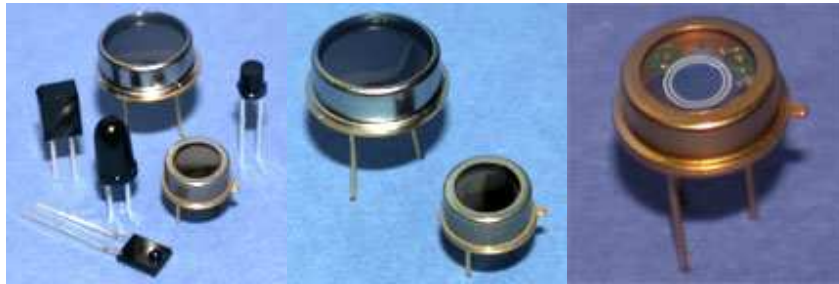


Figura 61. Ejemplos de fotodiodos comerciales sensibles al infrarrojo.

Estos fotodiodos tienen como material sensible el silicio y tienen un filtro para la parte visible y pasan solamente el NIR (700 nm – 1100 nm), que cubre muy bien las líneas de 880 nm de GaAlAs y 940 nm GaAs LED NIR diodos y otras fuentes de radiación infrarroja. Estos arreglos de fuente –detector se utilizan en cortinas de seguridad de IR, sensores industriales de IR, sensores de proximidad IR, detectores de láseres IR, sensores para NIR, sensores médicos de IR, teleguía con láser, transmisión de alta velocidad de datos en IR.

*Estudios en Infrarrojo del Espacio.* Astronomía Infrarroja es la detección y estudio de radiación infrarroja (energía del calor) emitida por los objetos del Universo. Cada objeto que tenga una temperatura radiará en el infrarrojo. La astronomía infrarroja cae en la región donde los detectores son sensibles (entre 1 y 300  $\mu\text{m}$ . El ojo humano no puede detectar longitudes de onda mayores que 0,75  $\mu\text{m}$ , a no ser que la fuente sea extremadamente brillante. El Universo envía una enorme cantidad de información en el IR. Con los telescopios en órbita, se puede detectar y estudiar esa radiación. El observatorio IRAS (Infrared Astronomical Satellite) detectó mas de 300 000 fuentes de infrarrojo. El observatorio ISO (Infrared Space Observatory) enviado por la Agencia Europea Espacial tiene capacidad para observar de 2,5 a 240  $\mu\text{m}$ . En el 2003 la NASA lanzó el SIRTIF

(Space Infrared Telescope Facility) en una órbita heliocéntrica. En la Figura 62 se muestra una imagen de la Vía Láctea vista en el infrarrojo (que puede traspasar las nubes de polvo cósmico que bloquea la luz visible)

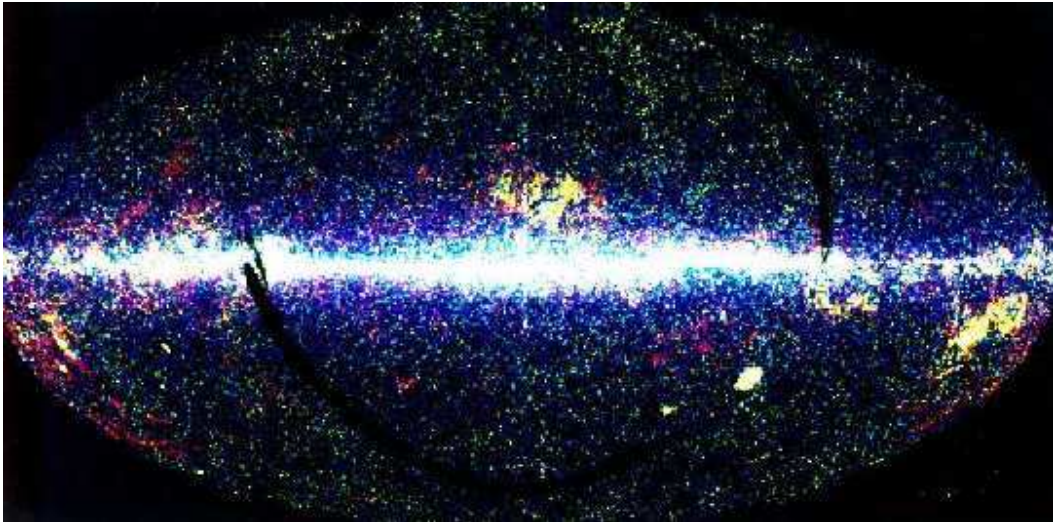


Figura 62. Vista de la Vía Láctea en el infrarrojo.

Debido al desplazamiento rápido alejándose de nosotros, la luz de los objetos más distantes se desplaza hacia el rojo (efecto Doppler), siendo posible detectarlos sólo en la región del infrarrojo.

*Otras aplicaciones del Infrarrojo. 1. Control remoto.* Hoy día la mayoría de los instrumentos de la casa (televisores, equipos de sonido, DVD, VHS, computadoras portátiles, las puertas del garaje, el aire acondicionado, juguetes) son controladas a distancia con *controles remoto*, que operan con luz infrarroja. En la Figura 63 se muestra un control remoto comercial. El control remoto tiene un circuito impreso que traduce cada tecla a un código, que le envía información a un LED que emite radiación de alta frecuencia (30 kHz a 40 kHz); el receptor (ej. la TV) tiene un detector sensible al IR que recoge la señal y la traduce en acción.



Figura 63. Control remoto de un televisor (infrarrojo)

Los diferentes implementos eléctricos tienen su propio código de pulsos para comunicarse. Algunos utilizan el tamaño del pulso para codificar la señal, otros utilizan señales codificadas en el espacio, o sea utilizan el tiempo entre pulsos de luz para enviar la información, otros utilizan combinación de tamaño y tiempo de los pulsos. Los controles remotos universales tienen la capacidad de enviar los diferentes tipos de señales y hasta pueden copiar los códigos de otros controles.

2. *Visión Nocturna*: El equipo para *visión nocturna* utiliza el infrarrojo cuando hay insuficiente luz visible para ver un objeto. La radiación infrarroja emitida por el objeto es transformada en una “imagen” en una pantalla (o una pantalla para cada ojo); los objetos más calientes se muestran más brillantes. Esto permite al



Figura 64. Anteojos especiales y binoculares para visión nocturna.

usuario “ver” claramente a personas o animales, o a un bombero ver a través del humo en un incendio. En la Figura 64 se muestra unos anteojos y unos binoculares para visión nocturna. Algunos anteojos poseen una fuente de radiación IR para iluminar los objetos y poder “ver” en la oscuridad absoluta. La *termografía* permite ver la imagen de un objeto en el infrarrojo, y tiene aplicaciones militares, industriales y médicas.

3. *Detectores de movimiento*: Los *detectores de movimiento* utilizan luz infrarroja (que es invisible) para sistemas de seguridad. En la Figura 65 se muestra

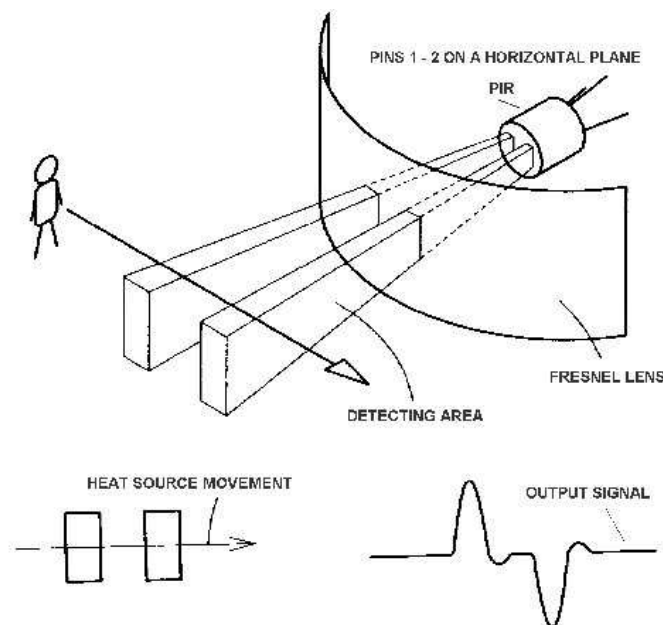


Figura 65. Sistema de infrarrojo para detectar movimiento un sistema para detectar movimiento. El elemento sensor, tiene dos sectores donde detecta la emisión de radiación infrarroja (por ejemplo, una persona), y solamente responde si los dos detectores se activan uno primero y el otro después. Se utiliza

una lente Fresnel para enfocar la radiación sobre el detector. Los movimientos debido a vibraciones, cambios de temperatura o luz del día se cancelan.

*Espectroscopia Infrarroja:* La porción del espectro electromagnético que es útil para el análisis de compuestos y moléculas es la región desde 2500nm a 16000 nm (frecuencia de  $1,9 \times 10^{13}$  a  $1,2 \times 10^{14}$  Hz. (Ver Figura 66)

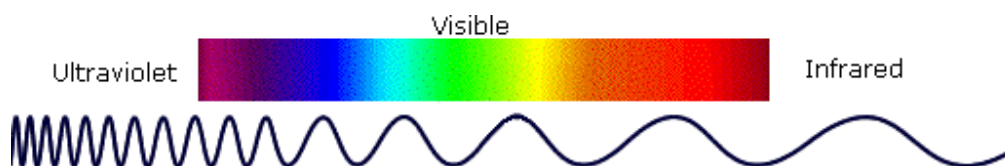


Figura 66. Espectro electromagnético a ambos lados de la región visible.

La energía de los fotones en el infrarrojo (1 a 15 kcal /mol) no es suficiente para excitar electrones, pero induce excitación o movimiento *vibracional* de átomos y grupos enlazados covalentemente. En la Figura 67 se muestra el espectro de la

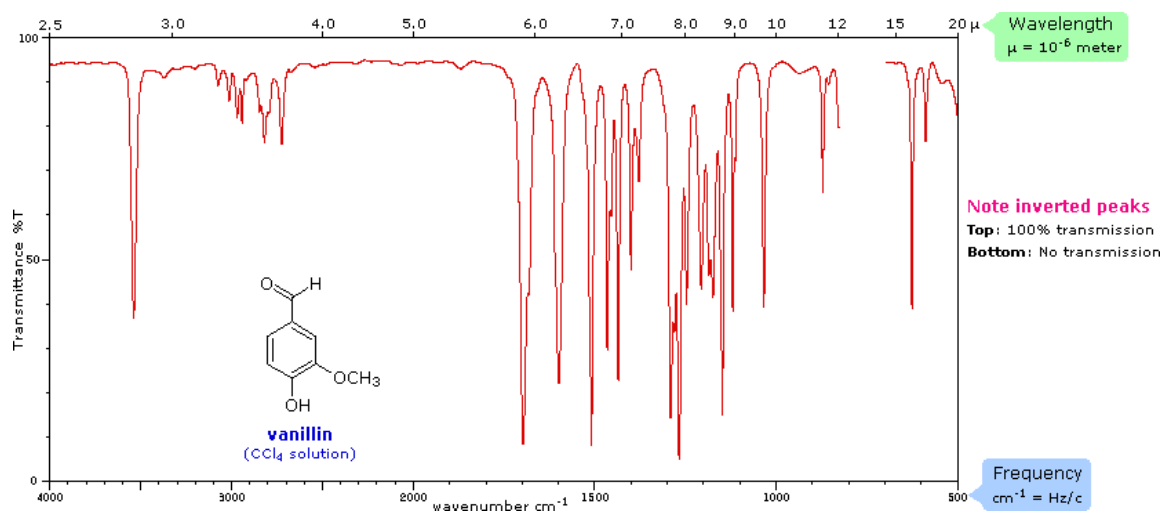


Figura 67. Espectro infrarrojo de *vanillin* en  $\text{CCl}_4$  como solvente.



sustancia *vanillin* (que le da el olor y sabor a la vainilla). La escala de frecuencia se da en  $\text{cm}^{-1}$  (centímetros recíprocos, el número de ciclos de la onda en un centímetro) y no en Hz. La longitud de onda está en micrones ( $\mu\text{m}$ ). El número de vibraciones esperadas para una molécula es  $3N-6$ , donde N es el número de átomos. El espectro de infrarrojo se puede sacar en fase gaseosa, líquida, solución o sólido. La intensidad de las bandas depende del cambio en *momento bipolar* que se produzca con la vibración. La región donde absorben las diferentes sustancias depende de la naturaleza del enlace (enlace sencillo o enlace múltiple) y de la masa de los átomos vibrando (átomos livianos vibran a frecuencias mayores, o sea a mayor energía). En la Figura 68 se presentan las regiones donde diferentes grupos absorben. En el Apéndice 4 se amplía esta lista de absorción IR de grupos.

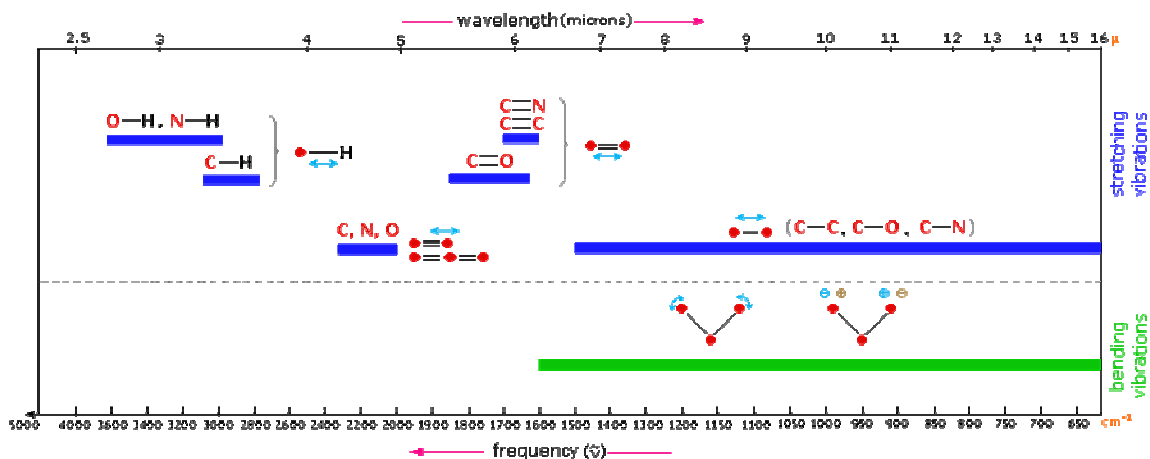


Figura 68. Regiones de absorción IR para diversos grupos.( línea azul: estiramientos; línea verde: torsión de ángulos)

La zona de  $4000 \text{ cm}^{-1}$  a  $1450 \text{ cm}^{-1}$  corresponde a las frecuencias de los *grupos* y de  $1450 \text{ cm}^{-1}$  a  $600 \text{ cm}^{-1}$  a la zona de *huella*.

Los instrumentos modernos de espectroscopia infrarrojo normalmente cubren el rango de  $4000 \text{ cm}^{-1}$  hasta  $400 \text{ cm}^{-1}$  con óptica de KBr, o hasta  $150 \text{ cm}^{-1}$  con

óptica de CsI. Los instrumentos son de transformada de Fourier que ofrecen alta resolución, alta sensibilidad, rapidez y facilidad de muestreo.

### 3F-1. Microondas. Origen y Fuentes.

Las *microondas* son ondas electromagnéticas con longitud de onda mayores que el infrarrojo, pero menores que las ondas de radio. Las microondas tienen longitud de onda aproximadamente en el rango de 30 cm (frecuencia = 1GHz) a 1 mm (300 GHz). También se incluye el rango de 1 GHz a 1000 GHz, aunque la mayoría de las aplicaciones van de 1 a 40 GHz. El límite entre el infrarrojo lejano, las microondas y las ondas de radio de ultra alta frecuencia son bastante arbitrarias. El rango de microondas incluye: *frecuencia ultra alta* (UHF) (0,3 – 3 GHz), *super alta frecuencia* (SHF) (3- 30 GHz) y *extremadamente alta frecuencia* (EHF) (30- 300 GHz). La región entre 1000 GHz y 3000 GHz (submilímetro (<1 milímetro) y 100 micrometros) se denomina la *radiación terahertzio (onda terahertzio, rayos-T, luz-T y THz)*. Por encima de 300 GHz hasta 3000 GHz, la atmósfera de la Tierra absorbe fuertemente la radiación electromagnética, (Ver Figura 69) lo que limita su utilización en comunicaciones.

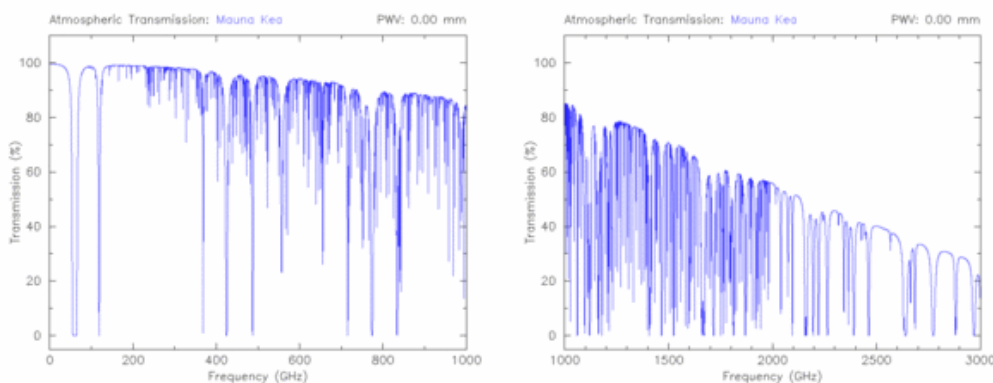


Figura 69. Espectro de absorción de la atmósfera terrestre húmeda en la región de  
a) microondas y b) terahertzio

Bandas de frecuencia Microondas	
Designación	Rango de Frecuencia
banda L	1 a 2 GHz
banda S	2 a 4 GHz
banda C	4 a 8 GHz
banda X	8 a 12 GHz
banda K <sub>u</sub>	12 a 18 GHz
banda K	18 a 26 GHz
banda K <sub>a</sub>	26 a 40 GHz
banda Q	30 a 50 GHz
banda U	40 a 60 GHz
banda V	50 a 75 GHz
banda E	60 a 90 GHz
banda W	75 a 110 GHz
banda F	90 a 140 GHz
banda D	110 a 170 GHz

*Fuentes de radiación microondas:* Las microondas se generan de varias maneras, generalmente dividido en dos categorías: *dispositivos de estado sólido* y *dispositivos de tubos de vacío*. Los *dispositivos de estado sólido* están basados en semiconductores tales como: *silicio* o *GaAs* e incluye: *transistores de efecto de campo* (FET), *transistores de unión bipolar* (BJT), *diodos Gunn* y *diodos IMPATT*. Variantes de BJT incluye *transistores de heterounión bipolar* (HBT) y variantes de FET incluye el *MESFET* y *HEMT* (HFET). Los *dispositivos de tubos de vacío* operan en base a movimiento de electrones al vacío bajo la influencia de campos eléctricos y magnéticos controladores, e incluye: el *magnetron*, el *klystron*, *tubo de onda viajera* (TWT) y *gyrotron*.

*Transistores de efecto de campo (FET):* Es un transistor que depende de un campo eléctrico para controlar la forma y la *conductividad* de un “canal” en un material semiconductor; se utilizan a veces como resistencia controlada por voltaje. Los terminales de un FET son: *puerta(gate)*, *drenaje(drain)* y *fuente(source)*. El voltaje aplicado entre la puerta y la fuente modula la corriente entre la fuente y el drenaje. Tipos de FET: *MOSFET* (Metal- Oxido-Semiconductor FET); *JFET* (Junction FET); *MESFET* (Metal- Semiconductor FET, se usa en *CMOS* circuitos integrados; construidos con GaAs, InP o SiC; operan a 30 GHz y se usan en comunicaciones con microondas y radar); *HEMT* (HFET, heteroestructura; High Electron Mobility Transistors; utiliza una combinación de GaAs y AlGaAs; pueden trabajar a más de 200 GHz, aplicaciones en comunicaciones de microondas y onda milímetro, radar y radio astronomía); *TFT* (película delgada).

*Transistores de unión bipolar (BJT):* Están construidos con semiconductores “dopados” y emplea ambos tipos de cargadores de carga (electrones y huecos). Tienen un sándwich de tres franjas (PNP o NPN)

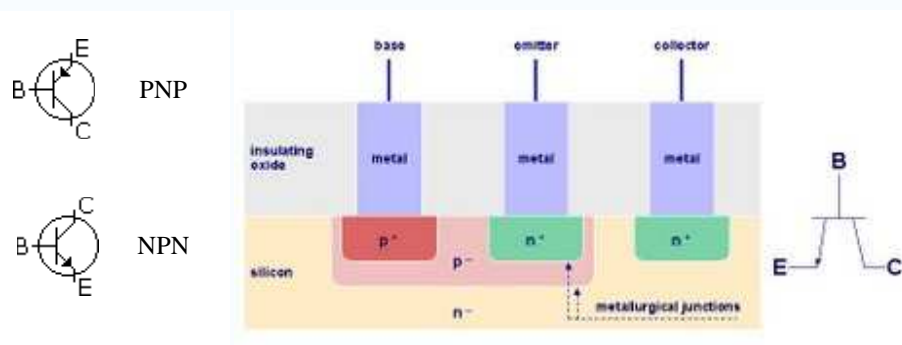


Figura 70. Modelo de transistor BJT (NPN)

La franja central es la *base* (B, de alta resistividad); al variar la corriente hacia la base, se puede variar la corriente que fluye entre el *emisor* (E) y un tercer terminal, el *colector* (C) (ambos de baja resistividad). Se usan como amplificadores de corriente.

*Diodo Gunn*: (dispositivo de electrón transferido (TED)) es un diodo utilizado en electrónica de alta frecuencia; consiste de semiconductores dopado N. (dos franjas altamente dopadas N; franja fina en medio, débilmente dopada; tiene una región de “resistencia diferencial negativa”). Se utilizan en osciladores de relajación para frecuencias de 10 GHz o mayores (THz), con una cavidad de resonancia para controlar la frecuencia.

*Diodos IMPATT* (IMPact ionization Avalanche Transit Time): Son diodos de alta potencia usados en electrónica de alta frecuencia y dispositivos de microondas; hechos de SiC. Operan en frecuencias entre 3 y 100 GHz o más y tienen aplicación en sistemas de radar.

*Transistores de heterounión bipolar* (HBT): En una mejora de los BJT para manejar señales de muy alta frecuencia (varios cientos de GHz); son utilizados en circuitos ultra-rápidos, en sistemas de radio frecuencia (RF). Utilizan diferentes materiales para el sustrato: Si, Si-Ge; AlGaAs; GaAs; InP; InGaP; GaN; InGaN.

*Tubos de vacío*: Son dispositivos utilizados para *amplificar* o modificar una señal. Antes de los transistores y los circuitos integrados eran utilizados en circuitos eléctricos. Hoy se utilizan para circuitos especiales y como *microtubos emisores de campo*. En la Figura 71 aparecen modelos de diodos y triodos. Los tubos tienen una cobertura de vidrio en alto vacío, un *filamento* (cátodo, W) que al calentar emite electrones por el proceso de *emisión termiónica*. En un *diodo*, los electrones son atraídos hacia un *plato metálico* (ánodo), cargado positivamente respecto del filamento, produciendo una corriente (en una sola dirección). En un *triodo*, se agrega una *rejilla* entre el filamento y el plato, a la que se aplica un voltaje que controla la corriente.

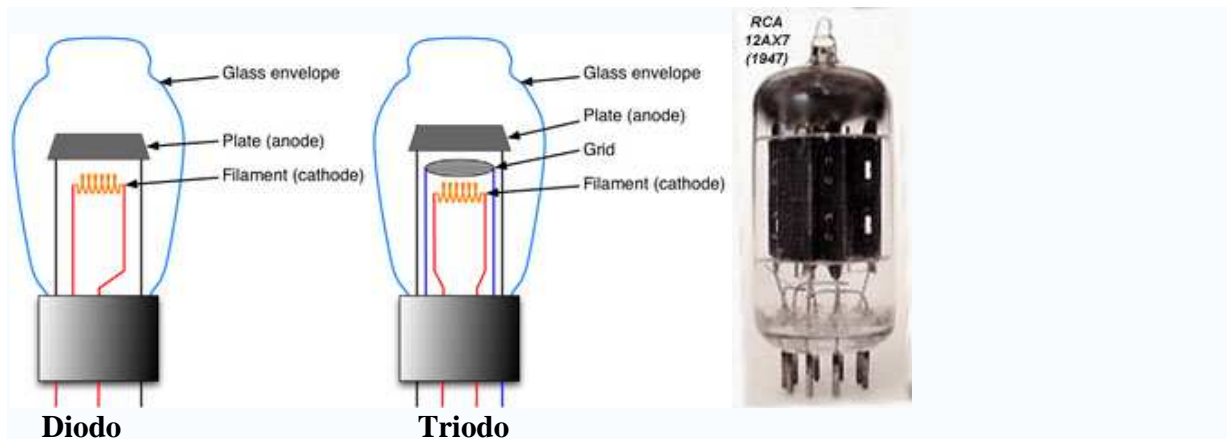


Figura 71. Modelos de tubos de vacío: diodo y triodo.

*Microtubos emisores de campo:* Estos nuevos tubos aparecen en circuitos integrados; son *emisores de campo como cátodos fríos*, que emiten electrones de un número de nano-puntas formadas en la superficie del cátodo metálico. Son estables, producen alta potencia y bajo consumo de energía. Se utilizan en dispositivos para microondas incluyendo teléfonos móviles, en radar, transmisiones Wi-Fi y comunicaciones satelitales.

Existen varias aplicaciones de tubos de vacío (o sus semejantes) para dispositivos especiales. Ya hemos destacado anteriormente los *tubos de rayos catódicos* y los *fotomultiplicadores* (Ver 3C-3). Más adelante se describirán el *magnetron*, *klystron*, *tubo de onda viajera* y *gyrotron*. Las pantallas fluorescentes utilizadas comúnmente en VCR y en los tableros de los autos son realmente tubos de vacío, que utilizan ánodos cubiertos con *fósforos* para formar los caracteres que se muestran y usan un cátodo en filamento caliente como fuente de electrones.

*El magnetron:* Es un tubo de vacío de alta potencia que genera microondas coherentes. En la Figura 72 se presentan ejemplos de magnetrones comerciales. El magnetron consiste de un filamento (cátodo)



Figura 72. Magnetrones comerciales. A. Corte de magnetron

caliente, mantenido o pulsado a un potencial negativo alto (con una fuente de poder de corriente directa (DC) de alto voltaje). Este cátodo está en el centro de una cámara evacuada con lóbulos circulares y un campo magnético perpendicular (magneto permanente). Los electrones emitidos por el filamento son atraídos por la pared externa (positiva) y efectúan un espiral en una trayectoria circular debido al campo magnético. En la pared externa hay cavidades cilíndricas, abiertas y conectadas al espacio común de la cavidad. Los electrones en movimiento inducen una alta frecuencia de radio resonante en la cavidad; una parte de este campo está conectado a una *guía de onda* (tubo metálico de sección rectangular) que dirige la energía de la radiación hacia la carga (una cámara de cocinar en *horno de microondas* o a una antena de alta ganancia en *radar*). El tamaño de las cavidades determina la frecuencia de resonancia y la frecuencia de la radiación producida. La frecuencia no es controlable en forma precisa, pero para muchas aplicaciones no es indispensable, por ejemplo en hornos de microondas (ver abajo) que tiene una frecuencia aproximada de 2450 MHz (2,450 GHz) o en radar. Para frecuencias más precisas se utiliza el *klystron* (ver abajo).

*El klystron:* Es un tubo de vacío especializado llamado un *tubo de haz lineal*. Se utilizan como osciladores o amplificadores en frecuencias de microondas y ondas de radio para producir señales de referencia de baja potencia (para receptores

superheterodino en radar) o para ondas cargadoras en comunicaciones de alta potencia y también para la fuerza de empuje en *aceleradores lineales*. En la Figura 73 se muestran ejemplos de klystrones.



Figura 73. Ejemplos de klystrones. a) En la sección superconductora de acelerador lineal de partículas. b) Klystron comercial.

Tienen la ventaja de amplificar coherentemente una señal de referencia, así que la radiación de salida tiene su amplitud, frecuencia y fase bien controlada. Existen diversos arreglos de las cámaras en los klystrones que determinan como se establece la cavidad de resonancia para la onda estacionaria de radiación producida. Existen: *klystron de doble cámara*, *klystron reflex*, *klystron multicavidad*, *klystron multihaz*, *klystron de tubo de acumulación flotante* (floating drift). Los klystron tienen aplicación como amplificadores para producir señales HF, VHF, UHF y EHF de alta potencia (varios vatios) (los sistemas de estado sólido son inadecuados). Se utilizan en *radar* (ver abajo), comunicación satelital y de banda ancha de alta potencia (transmisión de televisión, terminales satelitales EHF), física de alta energía y aceleradores de partículas.

*Tubo de onda viajera (TWTA)*: También llamado *tubo amplificador de onda viajera* es un dispositivo utilizado para producir señales de radio frecuencia (RF)



de alta potencia. Puede operar en rangos de frecuencia de 300 MHz a 50 GHz, con ganancia de voltaje de 40 decibeles. En la Figura 74 se muestra un diagrama de un TWTA. Los electrones producidos por la

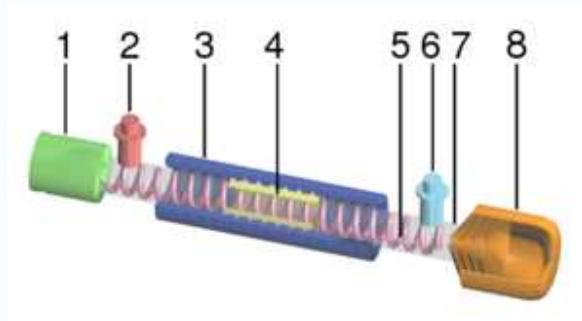


Figura 74. Tubo de onda viajera (TWTA) 1. Pistola de electrones; 2. Entrada de RF; 3. Magnetos; 4. Atenuador; 5. Alambre en hélice; 6. Salida de RF; 7. Tubo de vacío; 8. Colector

pistola de electrones (cátodo caliente) son enfocados a un haz por el campo magnético de un selenoide (o un magneto permanente), dirigidos dentro del alambre de hélice y recogidos en el colector. La corriente que se genera sirve para amplificar la señal RF que se introduce. Un TWTA de cavidad acoplada puede producir 15kW de potencia. Se utilizan en radar y comunicación satelital.

*El gyrotron:* Es un tubo de electrones de alta potencia, que emite radiación de milímetros de longitud de onda, haciendo que los electrones tengan un movimiento de *ciclotron* en un campo magnético muy fuerte. Las potencias de salida son de decenas de kW a 1-2 MW. Frecuencias de salida desde 20 a 200 GHz, en forma de pulsos o continua o sea produce radiación en la zona de teraherzios. Los gyrotrones son una especie de *maser* (amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación). Los electrones tienen efecto relativístico pequeño.

*Fuente de microondas del espacio:* Desde cualquier punto del espacio se detecta radiación microondas en forma muy isotrópica y corresponde a la Radiación de fondo cósmica de microondas (CMB, Cosmic Microwave Background radiation). En la Figura 75 se muestra la imagen

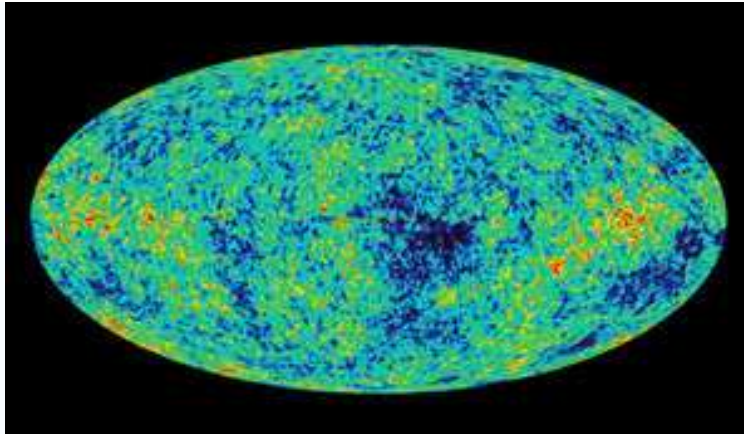


Figura 75. Distribución de radiación de microondas del Universo (CMB)

WMAP de la radiación microonda cósmica. Esta radiación corresponde a una radiación de “cuerpo negro” con una temperatura de 2,725 K. En la Figura 76 se muestra el espectro de distribución de la radiación de microondas. El rango de frecuencias es de 0,3 GHz a 630 GHz con un máximo en 160,4 GHz. La radiación de fondo se considera como el remanente de la energía emitida en el “Big Bang” (Gran Explosión) del inicio del Universo hace de 10 a 20 billones de años. Otras evidencias como el corrimiento hacia el rojo de la radiación procedente de las galaxias más distantes y la abundancia de elementos como hidrógeno y el helio, también apoyan la teoría del Big Bang.

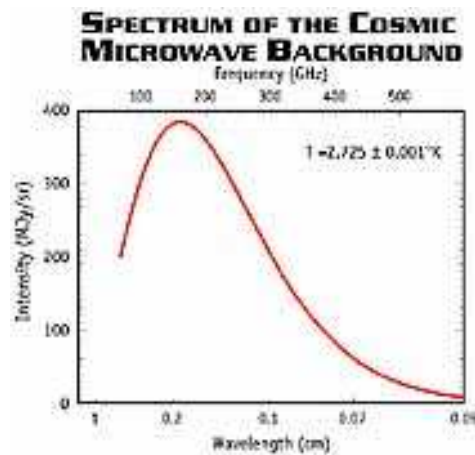


Figura 76. Espectro de radiación microondas de fondo cósmica

### **3F-2. Interacción con la materia**

Las microondas interactúan principalmente con los movimientos de rotación de moléculas gaseosas y con movimientos moleculares rotacionales en líquidos y sólidos. En esto se basa la capacidad de hornos de microondas para calentar los alimentos, pues el agua que contienen absorbe la energía de microondas y se calienta. (Ver abajo) La atmósfera terrestre es muy buena como absorbedor de radiación entre 300 GHz hasta 3000 GHz, (Ver Figura 69) debido a los gases atmosféricos, principalmente el vapor de agua. Las microondas son reflejadas por los metales; esto es útil para las antenas utilizadas en transmisiones vía microondas y en los tubos guía rectangulares utilizados para guiar las microondas. Las microondas pueden penetrar materiales no conductores: ropa, papel, cartón, madera, plástico, cerámica. Puede penetrar neblina y nubes, pero no puede penetrar metales o el agua.

### **3F-3. Aplicaciones de las microondas.**

La región de *microondas* tiene muchas aplicaciones: en *hornos de microondas* para calentar y cocinar alimentos; transmisiones de *radiodifusión* y *telecomunicaciones* debido a un ancho de banda grande, como por ejemplo en *televisión vía microondas*; *comunicación satelital*; *radar* para transporte aéreo y *radar doppler* para seguir huracanes y tornados; protocolos *inalámbricos* (wireless) en comunicaciones e Internet (banda ISM, 2,4 GHz; 5GHz) ; redes en áreas metropolitanas (MAN) (2 a 11 GHz); *televisión de cable* e *Internet* (en cable coaxial); redes de *teléfonos celulares*; procesamiento de semiconductores (proceso de *plasma*); transmisión de energía; *maser*.

*Hornos de microondas:* El horno de microondas es un utensilio electrodoméstico que emplea radiación de microondas para cocinar o calentar alimentos. En la Figura 77 se muestran hornos de microondas comerciales. Los hornos utilizan un *magnetron* para producir las microondas



Figura 77. Hornos de microondas comerciales.

con una frecuencia aproximada de 2,45 GHz.(longitudde onda = 12.24 cm) El horno cocina los alimentos haciendo que las moléculas de *agua* y otros compuestos vibren y roten con la radiación. Las vibraciones y rotaciones crean el *calor* que calienta la comida, que como ésta suele contener bastante agua, se cocina fácilmente por este método. El agua, grasas y moléculas de azúcar absorben la radiación microondas a través de un proceso de *calentamiento dieléctrico*. Los *dipolos* de las moléculas oscilan tratando se alinearse con los campos magnéticos o eléctricos y esto produce calor. El magnetron tiene un circuito de control con un microcontrolador. Una guía de onda dirige la radiación hacia la cámara de cocinar, que es una jaula de Faraday metálica que previene que las ondas de microondas se escapen hacia los alrededores. La ventana del horno es de vidrio, pero tiene una malla conductora que mantiene la protección, debido a que la dimensión de los huecos de la malla son menores que la longitud de onda de la radiación de microondas (12 cm). La radiación de los hornos de microondas, si se escapara, puede interferir con las conexiones inalámbricas de redes de computadoras personales, que se comunican con radiación de frecuencias similares. Un horno de

microondas puede consumir alrededor de 1100 W y entrega unos 700 W en potencia de microondas. Los 400 W restantes se utilizan en la luz, la bandeja rotatoria y el ventilador del horno y el resto se disipa como calor. Si el horno se opera sin material o comida para calentar, la radiación de microondas retorna al magnetron y lo puede dañar. El magnetron requiere de alto voltaje (3000 V) para funcionar; este voltaje se obtiene utilizando un transformador de alto voltaje (que convierte el voltaje de 115 V de la casa al alto voltaje requerido).

*Radar:* (Radio Detection And Ranging; Radio Angle Detection And Ranging). Es un sistema usado para detectar y determinar la distancia de objetos como aviones o barcos (reflexión del metal) y delinear mapas como de lluvias, tornados y huracanes (reflexión del agua). El transmisor emite fuertes ondas de microondas o radio y el receptor escucha cualquier *eco* reflejado. La señal es amplificada y analizada para identificar el objeto reflector y estimar su distancia. La radiación producida en pulsos cortos de alta energía por la fuente (magnetron, klystron o TWTA) es dirigido por una guía de ondas hasta la *antena* que puede ser un *reflector parabólico*. (Ver Figura 78). El eco reflejado desde el objeto es colimado por la antena parabólica hacia un receptor muy sensible. Esta señal es amplificada y analizada y mostrada como un “mapa” de radar en un *tubo de rayos catódicos*(CRT) o en una pantalla de *crystal líquido*.

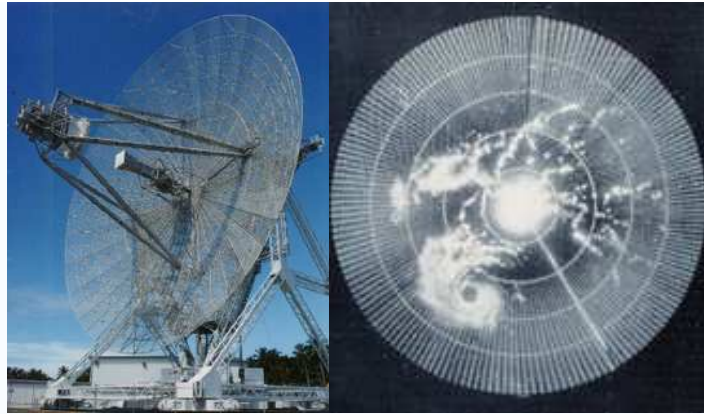


Figura 78. A. Antena parabólica para RADAR. (40 m de diámetro).B. Pantalla de “mapa” de RADAR

Para obtener buenas imágenes de radar reflejadas es importante utilizar radiación de longitudes (de unos pocos centímetros) de onda menores que las dimensiones del objeto. La mejor reflexión se obtiene cuando los bordes de las superficie reflectoras son perpendiculares. Los aviones *stealth* utilizan superficies poco reflectoras y ángulos muy pequeños en los bordes para evitar ser detectados por radar. Las ondas electromagnéticas no se transmiten bien bajo agua, siendo preferible el *sonar* (basado en ondas sonoras) para detectar submarinos. El radar es susceptible de interferencia debido a *ruido*, *señales azarosas de reflexión*, *ecos de multitraectoria* (del suelo o de la ionósfera, objetos “fantasma”), *señales de interferencia de la misma frecuencia* (guerra electrónica). Algunas de estas interferencias se pueden reducir controlando la polarización de las microondas. La medida de distancia a un objeto está dada por la relación:  $\text{Distancia} = c\tau / 2$ , donde  $c$  = velocidad de la luz,  $\tau$  = tiempo para el viaje de ida y vuelta de la radiación (se mide el tiempo que tarda el eco del pulso enviado en retornar). Para mejor detección, se controla el tamaño o duración de los pulsos y el tiempo entre pulsos (PRF). Las distancias también se pueden calcular con mayor precisión utilizando modulación de frecuencia (efecto similar al radar doppler, utilizado para medir

velocidades). Sistemas de radar modernos utilizan *arreglos en fase* que son varias antenas sin partes móviles que están acopladas electrónicamente.

En la Tabla abajo se indican los diferentes rangos de frecuencia de la región de microondas utilizadas en Radar.

Frecuencia de Bandas de Radar			
Nombre Banda	Rango Frecuencia	Rango Longitud de onda	Notas
HF	3-30 MHz	10-100 m	Sistema radar costero 'alta frecuencia'
P	< 300 MHz	1 m+	'P' por 'previo', aplicado retrospectivamente a sistemas de radar anteriores.
VHF	50-330 MHz	0.9-6 m	Rango muy grande, penetra el suelo; 'muy alta frecuencia'
UHF	300-1000 MHz	0.3-1 m	Rango muy grande (ej. alarma temprana balística), penetra el suelo; 'ultra alta frecuencia'
L	1-2 GHz	15-30 cm	Rango grande, control de tráfico aéreo y vigilancia; 'L' por 'long' (grande)
S	2-4 GHz	7.5-15 cm	Control de terminal de tráfico aéreo, rango grande para estado del tiempo, radar marino; 'S' por 'short' (corto)
C	4-8 GHz	3.75-7.5 cm	Un compromiso (por eso 'C') entre bandas X y S; estado del tiempo.
X	8-12 GHz	2.5-3.75 cm	Guía de misiles, radar marino, estado del tiempo; en USA el corto rango de 10.525GHz ±25MHz es usado para radar de aeropuertos.
K <sub>u</sub>	12-18 GHz	1.67-2.5 cm	Mapeo de alta resolución, altimetría de satélites; frecuencia justo debajo de banda K (por eso 'u')
K	18-27 GHz	1.11-1.67 cm	Del alemán <i>kurz</i> , que quiere decir 'corto'; de uso limitado debido a la absorción del vapor de agua, así que K <sub>u</sub> y K <sub>a</sub> se usen para vigilancia. Banda K es usada para detectar nubes por meteorólogos, y por la policía para detectar motoristas veloces. Pistolas de radar de banda K operan a 24.150 ± 0.100 GHz.
K <sub>a</sub>	27-40 GHz	0.75-1.11 cm	Mapeo, rango corto, vigilancia en aeropuertos; frecuencia justo encima de la banda K band (por eso 'a') Foto- radar, se utilice para disparar cámaras que toman fotos de número de placa de carros que se pasan una luz roja, opera a 34.300 ± 0.100 GHz.

mm	40-300 GHz	1 - 7.5mm	Banda 'milímetro' , se subdivide como abajo
V	40-75 GHz	4.0 - 7.5 mm	
W	75-110 GHz	2.7 - 4.0 mm	Usado como sensor visual en vehículos experimentales autónomos, observación meteorológica de alta resolución

*Radar Doppler:* El radar Doppler usa el efecto Doppler para obtener información adicional de un sistema de radar, debido al cambio en frecuencia del haz del radar producido por el movimiento del objeto; esto permite una medida directa y muy precisa de la velocidad de éste. Originalmente desarrollado para uso militar, se utilizan en radar para el estado del tiempo y “pistolas de radar” de la policía de tránsito y en deportes. Esto se muestra en la pantalla de radar del huracán Katrina (nivel 5) recientemente (Ver Figura 79)

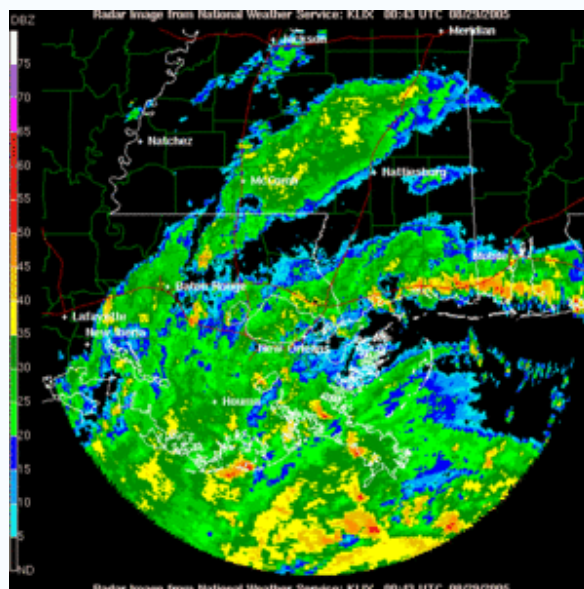


Figura 79. Radar Doppler del huracán Katrina (0:43 UTC, 8-29-05)



El radar Doppler envía una señal continua, lo que maximiza la cantidad de energía que retorna del objeto, y la señal de retorno con frecuencia cambiada se filtra de la señal enviada. Los instrumentos modernos utilizan la misma antena para enviar y recibir las señales. El radar detecta precipitación (lluvia o granizo) por reflexión de las microondas, y por el efecto Doppler se determina la velocidad del viento en tiempo real hacia el detector y alejándose del detector. El proceso de emitir una señal, escuchar la señal de retorno y volver a emitir la señal siguiente es muy rápido (alrededor de 1300 veces por segundo), pero la mayoría del tiempo la antena está escuchando. El radar Doppler permite detectar precipitación a una distancia de 80 millas náuticas o un huracán, nieve o fuerte precipitación hasta 140 millas náuticas, pero se utiliza un ángulo pequeño de inclinación de la antena por encima del horizonte (no más de 4.5 ° en tiempo claro y hasta 19.5 ° durante una tormenta para analizar la altura de ésta) y una rotación de 360 °.(Ver Apéndice 5)

*Teléfonos celulares:* Los teléfonos celulares trabajan transmitiendo señales de microondas o ondas de radio a una *torre de celulares*. Estas torres varían en su capacidad de recibir las señales de los teléfonos celulares: algunos reciben señales de distancias de solamente 1.5 a 2.4 km (1 a 1.5 millas), mientras otros pueden recibir señales tan lejos como 48 a 56 km (30 a 35 millas). El área cubierta (alrededor de 10 millas cuadradas) por la torre se llama una *celda*. Las torres están conectadas en red a una estación de distribución central (MTSO, Movil Telephone Switching Office) a través de cable eléctrico, cable de fibra óptica o por microondas y también está conectado directamente al sistema de teléfonos con cables eléctricos. El teléfono celular recibe señales de la torre y funciona parecido a un radio portátil (Ver Figura 80) y los hay analógicos (AMPS) y digitales (TDMA, GSM). El teléfono celular utiliza ondas FM de baja energía para

transmitir voz o mensaje a la antena en la *celda* más cercana. Además, el teléfono celular puede cumplir otra serie de funciones que lo hacen muy práctico:



Figura 80. Teléfonos celulares comerciales

almacena información sobre los contactos (tiene directorio telefónico, guarda mensajes de voz o de texto), mantiene listas de actividades a cumplir (organizador de citas), tiene calculadora matemática, reloj, manda y recibe correos electrónicos, obtiene y presenta en pantalla información del Internet (noticias, entretenimiento, música, valores de la bolsa), permite jugar juegos, se integra a otros aditamentos (PDC, MP3, receptores GPS, sistema posicional global)

Ya existe el sistema de teléfono celular satelital (Globalstar satellite phone) que utiliza la conexión CDMA (Code Division Multiple Access) o con tecnología analógica de 800 MHz.

*Espectroscopía de Microondas de transformada de Fourier (FT-MWS):* La espectroscopía de microondas se utiliza para analizar las transiciones rotacionales de moléculas y complejos en la fase gaseosa. La energía rotacional está cuantizada, y las moléculas solo pueden poseer ciertos valores de *momento angular rotacional*. La energía requerida para una molécula realizar una transición entre un nivel de energía rotacional al siguiente la puede proveer un fotón en la región de microondas (por ejemplo entre 5- 18 GHz). FT-MWS permite obtener información estructural con mucha precisión: distancias y ángulos de enlace con 8 cifras

significativas. El espectro rotacional permite la determinación de parámetros conocidos como *constantes rotacionales*, que son inversamente proporcionales a los *momentos de inercia* de las especies y que permiten las determinaciones estructurales. La alta resolución de la técnica permite determinar estructura hiperfina debido a *desdoblamiento cuadrupolar nuclear*, interacción *rotación-spin* y *spin-spin*, y determinación de isótopos en su abundancia natural.

*Resonancia de Spin Electrónico* (ESR, EPR): Es una técnica que permite analizar especies *paramagnéticas* o sea que tienen electrones desapareados ( $S > 0$ ). Estas especies pueden ser: electrones en bandas de conducción no llenas de sólidos, electrones atrapados en sitios producidos por daños por radiación, radicales libres orgánicos o inorgánicos, iones o complejos de metales de transición o tierras raras con electrones  $d$  o  $f$  no apareados, biradicales, especies en estados triplete.

En ESR la muestra se coloca en un campo magnético fuerte, lo que produce un desdoblamiento de los niveles correspondientes a la orientación que el momento magnético derivado del spin del electrón (o electrones) desapareado asume frente al campo (efecto Zeeman). (Ver Figura 81). La diferencia de energía está dada por la ecuación  $\Delta E = h\nu = g\beta B$ , (donde  $h$  = constante de Planck;  $\nu$  = frecuencia de la radiación microondas;  $g$  = factor de desdoblamiento Zeeman;  $\beta = \mu_B$  = magnetón de Bohr;  $B$  = campo magnético aplicado)

Al irradiar la muestra con fotones de la energía apropiada (energía de *resonancia*) se produce una transición entre los diferentes estados de spin. Para un electrón desapareado existen dos niveles ( $M_s = -1/2$  y  $+1/2$ ) y para un campo magnético típico (0.71 Tesla), esta radiación está en la región de microondas (como 20 GHz). El espectro ESR muestra una banda de

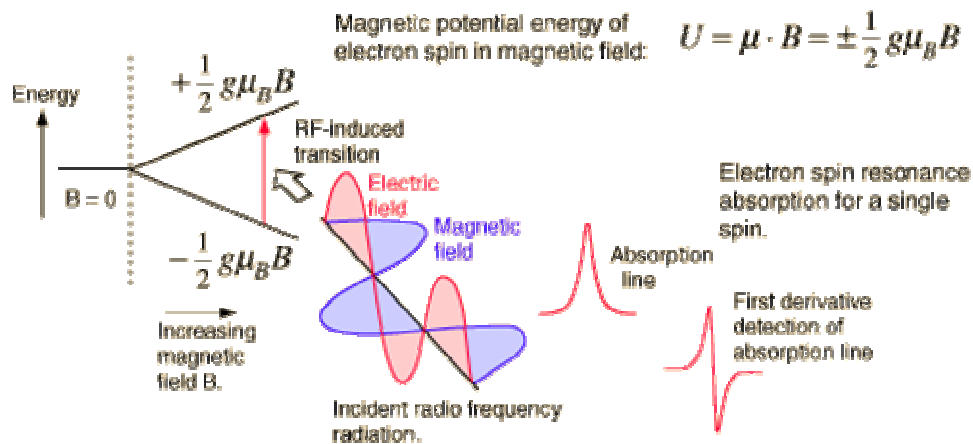


Figura 81. Diagrama correspondiente al ESR de un electrón desapareado.

absorción que se presenta como la primera derivada. El espectro es más complicado si existen más de un electrón desapareado ( $S > 1/2$ ) o si existe acoplamiento del momento magnético del electrón con los momentos magnéticos nucleares ( $I > 0$ ) (ENDOR). En la Figura 82 se muestra un esquema de un instrumento ESR y un instrumento ESR comercial.



Figura 82. A. Esquema del instrumento ESR. B. ESR comercial.

La muestra se coloca en una cavidad de resonancia en el campo magnético fuerte (varios miles de Gauss) y se expone a una radiación ortogonal de baja amplitud y

alta frecuencia (microondas, GHz) producida por un klystron y llevada a la muestra por una guía de ondas rectangular. El detector (diodo de microondas) utiliza detección sensible a la fase (por eso la primera derivada es muy útil). Los estudios de ESR tienen aplicación en muchos campos: biología, física, geología, química, ciencias médicas, ciencias de los materiales, antropología. Las muestras pueden ser sólidos, líquidos o gases y las concentraciones de radicales puede ser muy baja ( $10^{-9}$  molar). (Ver Apéndice 6)

### 3G-1. Ondas de radio. Origen y fuentes

*Radio frecuencia* (RF) se refiere a la porción del espectro electromagnético en el cual las ondas electromagnéticas (menores frecuencias y mayores longitudes de onda, de algunos milímetros a miles de kilómetros) son generadas por una *corriente alterna* (partículas cargadas moviéndose para atrás y para adelante, cambian de dirección o se aceleran) que se introduce en una *antena*. La atmósfera de la Tierra es transparente a longitudes de onda de unos pocos milímetros hasta 20 metros. Las ondas de radio viajan en línea recta, pero son reflejadas por la ionosfera, permitiendo que las ondas viajen alrededor del mundo.

La Tabla siguiente describe el espectro de radio frecuencias:

#### Espectro de radio frecuencias

Nombre de Banda	Abrev	Banda ITU	Frecuencia Longitud de onda	Ejemplo de usos
			< 3 <u>Hz</u> > 100,000 <u>km</u>	

Frecuencia extremadamente baja	ELF	1	3–30 <u>Hz</u> 100,000 km – 10,000 km	
Frecuencia super baja	SLF	2	30–300 <u>Hz</u> 10,000 km – 1000 km	
Frecuencia ultra baja	ULF	3	300–3000 <u>Hz</u> 1000 km – 100 km	
Frecuencia muy baja	VLF	4	3–30 <u>kHz</u> 100 km – 10 km	Comunicación militar
Frecuencia baja	LF	5	30–300 <u>kHz</u> 10 km – 1 km	Navegación, señales de tiempo, Radiodifusión AM onda larga
Frecuencia media	MF	6	300–3000 <u>kHz</u> 1 km – 100 <u>m</u>	Radiodifusión AM
Frecuencia alta	HF	7	3–30 <u>MHz</u> 100 m – 10 m	Radiodifusión onda corta y radio amateur
Frecuencia muy alta	VHF	8	30–300 <u>MHz</u> 10 m – 1 m	Radiodifusión FM y Televisión
Frecuencia ultra alta	UHF	9	300–3000 <u>MHz</u> 1 m – 100 <u>mm</u>	Radiodifusión televisión, LAN inalámbrico
Frecuencia super alta	SHF	10	3–30 <u>GHz</u> 100 mm – 10 mm	Dispositivos microondas , teléfonos móviles
Frecuencia extremadamente alta	EHF	11	30–300 <u>GHz</u> 10 mm – 1 mm	

			Encima de 300 <u>GHz</u> < 1 mm	
--	--	--	------------------------------------	--

Nota: Por arriba de 300 GHz, la absorción de la radiación electromagnética por la atmósfera terrestre es tan grande que la atmósfera es efectivamente opaca a esta radiación; vuelve a ser transparente en la región de infrarrojo y visible

En la Tabla abajo se indican las bandas y frecuencias del radio amateur y de las bandas para frecuencia de telefonía (SHF, EHF) en Estados Unidos y en la Unión Europea. Diferentes regiones utilizan diferente nomenclatura para sus bandas.

<b>Frecuencias de radio amateur</b>		<b>Frecuencias IEEE, EE.UU</b>		<b>Frecuencias U.E., <u>NATO</u></b>	
<b>Banda</b>	<b>Rango de Frecuencia</b>	<b>Banda</b>	<b>Rango de Frecuencia</b>	<b>Banda</b>	<b>Rango de Frecuencia</b>
160 m	1.815 a 1.89 MHz	<u>banda I</u>	a 0.2GHz	<u>banda A</u>	a 0.25 GHz
80 m	3.5 a 3.8 MHz	<u>banda G</u>	0.2 a 0.25 GHz	<u>banda B</u>	0.25 a 0.5 GHz
40 m	7 a 7.1 MHz	<u>banda P</u>	0.25 a 0.5 GHz	<u>banda C</u>	0.5 a 1.0 GHz
30 m	10.1 a 10.15 MHz	<u>banda L</u>	0.5 a 1.5 GHz	<u>banda D</u>	1 a 2 GHz
20 m	14 a 14.35 MHz	<u>banda S</u>	2 a 4 GHz	<u>banda E</u>	2 a 3 GHz

15 m	21 a 21.45 MHz	<u>banda C</u>	4 a 8 GHz	<u>banda F</u>	3 a 4 GHz
12 m	24.89 a 24.99 MHz	<u>banda X</u>	8 a 12 GHz	<u>banda G</u>	4 a 6 GHz
10 m	28.0 a 29.7 MHz	<u>banda K<sub>u</sub></u>	12 a 18 GHz	<u>banda H</u>	6 a 8 GHz
6 m	50.08 a 51 MHz	<u>banda K</u>	18 a 26 GHz	<u>banda I</u>	8 a 10 GHz
2 m	144 a 146 MHz	<u>banda K<sub>a</sub></u>	26 a 40 GHz	<u>banda J</u>	10 a 20 GHz
70 cm	430 a 440 MHz	<u>banda V</u>	40 a 75 GHz	<u>banda K</u>	20 a 40 GHz
23 cm	1240 a 1300 MHz	<u>banda W</u>	75 a 111 GHz	<u>banda L</u>	40 a 60 GHz
				<u>banda M</u>	60 a 100 GHz

*Telefonía móvil:* Las frecuencias del sistema *GSM* para operar los *teléfonos móviles* (teléfonos multi modo) tiene cuatro versiones principales: GSM- 900 (usa 890- 915 MHz para enviar información de la Estación Móvil a la BTS (Base Transceiver Station) y 935- 960 MHz en la otra dirección, provee 124 canales RF) y GSM-1800 (llamado PCS (Servicio de Comunicación Personal) en Hong Kong y Reino Unido, usa 1710-1785 MHz para enviar información de la Estación Móvil a la BTS y 1805- 1880 MHz en la otra dirección, provee 299 canales RF) usadas en la mayoría del mundo, excluyendo Estados Unidos y Canadá. GSM-850 (también



llamado GSM-800 o *celular*, usa 824-849 MHz para enviar información de la Estación Móvil a la BTS y 869-894 MHz para la otra dirección) y GSM-1900 (usa 1850-1910 MHz para enviar la información de la Estación Móvil a la BTS y 1930-1990 MHz para la otra dirección) usados en Estados Unidos y Canadá. Algunos países han extendido las bandas GSM-900 (E-GSM, que usa las frecuencias 880-915 MHz en una dirección y 925- 960 MHz en la otra dirección y 50 canales de tráfico); la banda R-GSM se utiliza en los ferrocarriles (usa las frecuencias 876-915 MHz en una dirección y 921 – 960 MHz en la otra dirección)

*Banda Ciudadana (CB)*: Es un servicio de comunicación de voz en dos direcciones para uso personal o en negocios, con un rango de unas cinco millas; utiliza 27 MHz de frecuencia en EE.UU. y en Europa (versiones: LA, canales 1-22 y 11A, AM y FM, 5W de potencia; PR, canales 1-40, FM, 4W de potencia; CB, canales 1-40, AM, 4W /FM, 1W/SSB, 4W). *PMR-446* (Radio Móvil Personal): servicio de radio europeo para radios portátiles de dos vías (walkie- talkie) para uso personal o de negocios, sin licencia; se usa como alternativa al sistema CB. Tiene 8 canales en frecuencia UHF (446 MHz, 500 mW potencia, alcance de dos a tres kilómetros. *FRS* (Servicio de Radio Familiar, EE.UU.): servicio de radio de voz de dos vías, de muy baja potencia y corto alcance en la banda de 460 MHz (UHF, 14 canales, 500mW), para uso de familias y grupos pequeños; sin licencia. *TETRA* (Radio Terrestre Truncado, europeo): tecnología digital de radio móvil para teléfonos celulares con comunicación de datos rápida (28,8 kbit/seg); utiliza frecuencia de 410- 430 MHz, pero se le han asignado otras bandas para el futuro.

*Fuentes de ondas de radio en el Universo*: En general la radiación electromagnética es emitida por partículas cargadas tal como los electrones cuando cambian de velocidad, de dirección o se aceleran. La radiación se puede producir por mecanismos *térmicos* o *no-térmicos*. La emisión térmica sólo depende de la

temperatura del objeto emisor e incluye: *radiación de cuerpo negro*, *emisión libre-libre* de un gas ionizado y *emisión de línea espectral*. Emisión no-térmica no depende de la temperatura, e incluye: *radiación sincrotrón*, *emisión girosincrotrón* de *pulsares* y *emisión maser* en el espacio.

*Radiación de cuerpo negro*: Dependiendo de la temperatura, los astros y estrellas emiten radiación como un espectro con un máximo en diferentes valores del espectro. Las estrellas emiten en la región ultravioleta-visible y el infrarrojo. Para emitir en las ondas de radio, el cuerpo debe estar a temperatura muy baja. En la zona de microondas se observa la *radiación de fondo de microondas* (CMB) remanente del Big Bang.

*Emisión libre- libre*: Otra forma de emisión térmica viene de gas ionizado o de *plasma*, principalmente de hidrógeno, que es el elemento más abundante. Los electrones son acelerados, pasan cerca de protones libres, pero no se combinan y emiten radiación continuamente. Este tipo de emisión es libre-libre o *bremsstrahlung*. Algunas fuentes de emisión libre-libre en la región de ondas de radio incluyen gas ionizado cerca de regiones de *formación de estrellas* y en *núcleos galácticos activos* (AGN)

*Emisión de línea espectral*: La emisión de fotones viene de transiciones de electrones en átomos desde un nivel de energía alto a un nivel de energía mas bajo. La energía del fotón corresponde a la diferencia de energía entre los dos niveles. Una línea espectral en la región de ondas de radio es la línea de 21 cm del hidrógeno neutro, debida a la transición del spin del electrón en la misma dirección que el spin del protón en el núcleo a tener un spin en dirección opuesta al spin del protón. Esta línea no es muy afectada por la presencia de polvo cósmico, lo que permite observar el centro de nuestra galaxia. El efecto Doppler en esta línea permite verificar la velocidad de las nubes dentro de la galaxia. El efecto Doppler de la línea Balmer del hidrógeno de los *quasares* hacia la región visible permite

determinar que estos objetos están muy lejos y se están alejando de nosotros a más de 92% de la velocidad de la luz.

*Emisión sincrotrón:* Surge de la aceleración de partículas cargadas como los electrones por campos magnéticos. El movimiento es en forma de espiral alrededor del campo magnético y la frecuencia emitida está relacionada con la velocidad de la partícula, siendo más importante para electrones “relativísticos” que se mueven cerca de la velocidad de la luz. Esto ocurre en fuentes de muy alta energía como residuos de supernovas, quasares y otras formas de núcleo galáctico activo (AGN).

*Emisión girosincrotrón:* Es emitida por *pulsares*, que resultan de la muerte de estrellas masivas, que al consumir su combustible nuclear, ocurre un colapso que genera una supernova, dejando después de la explosión, una *estrella de neutrones*, que tiene una altísima densidad y crea un campo magnético muy intenso. Al rotar la estrella de neutrones, acelera electrones y otras partículas en el intenso campo magnético, produciendo un pulso de radiación sincrotrón, incluyendo ondas de radio, que se observa como un faro. Se han observado pulsares en el centro de los residuos de una supernova (Crab Nebula, M1) que rota 33 veces por segundo.

*Maser* (Amplificación de microondas por emisión estimulada): Asociado a moléculas en nubes que rodean estrellas antiguas. Los niveles de energía de las moléculas son poblados con electrones que han sido “bombeados” por radiación de la estrella, cuando los electrones decaen al nivel fundamental, emiten la radiación respectiva. Se ha observado para especies como el radical hidroxilo (OH), óxido de silicio (SiO), agua (H<sub>2</sub>O), metanol (CH<sub>3</sub>OH), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y formaldehído (H<sub>2</sub>CO).

### **3G-2. Interacción con la materia**

Las ondas de radio son reflejadas por la ionósfera (la parte de la atmósfera superior conformada por diversas especies cargadas o iones), especialmente las de longitud de onda mas grandes; esto permite las comunicaciones globales de radio de onda corta. Igualmente las ondas de radio son reflejadas por la tierra, pero son absorbidas por los mares. Ondas más cortas que unos centímetros son absorbidas por las gotas de agua o por las nubes, y las menores a 1,5 cm pueden ser absorbidas selectivamente por el vapor de agua en una atmósfera clara.

### **3G-3. Aplicaciones de las ondas de radio**

*Aplicaciones en radio astronomía:* La radio astronomía se puede desarrollar en la superficie terrestre ya que la atmósfera es bastante transparente en la región de ondas de radio. Sin embargo los observatorios en el espacio tienen ciertas ventajas. Hay varios radio telescopios en el espacio: Polar, Cluster II, ISEE 1, ISEE 2, GOES 9 y Voyager 1. Una técnica especial en radio astronomía llamada *interferometría*, permite utilizar dos o mas telescopios que están muy separados para crear *imágenes* que tienen la misma *resolución* como si hubiera un gran telescopio tan grande como la distancia entre los telescopios individuales. Un sistema de esos es el Arreglo de Línea Base Muy Grande (VLBA) que consiste de 10 radio telescopios desde Hawai a Puerto Rico (Arecibo). En la Figura 83 se muestra el caso del EVLA (Arreglo Expandido Muy Grande) en el estado de Nuevo México, que constará de varios radio telescopios conectados por fibra óptica, dando gran diámetro y gran resolución.

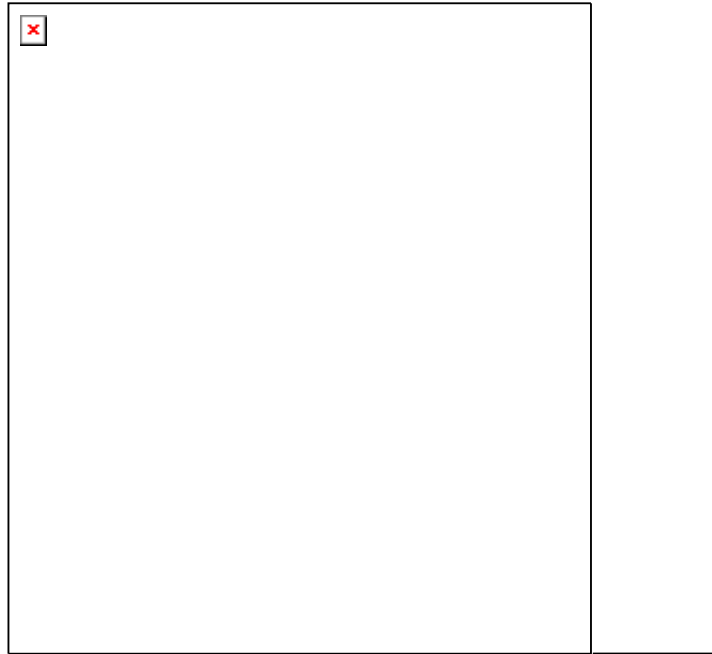


Figura 83. El EVLA de radio telescopios en Nuevo Mexico

Las ondas de radio son invisibles y los humanos no las detectamos, pero son hoy día indispensables en la sociedad moderna. Las siguientes tecnologías dependen de las ondas de radio: *radiodifusión AM y FM, teléfonos inalámbricos, abridor de puertas del garaje, redes inalámbricas, juguetes controlados por radio, radiodifusión de televisión, teléfonos celulares, receptores GPS (sistema de posicionamiento geográfico), radio aficionados, comunicación satelital, radio policial, relojes inalámbricos, monitores de bebés, satélites de comunicación y navegación, comunicación de navegación de aviones, acceso a Internet inalámbrico.*

*Radiodifusión AM, FM y Televisión:* Un sistema típico de radio comunicación tiene dos componentes básicos: un *transmisor* y un *receptor*. El transmisor genera oscilaciones eléctricas a una radio frecuencia llamada la *frecuencia cargadora*. Se puede entonces modular la *amplitud* (AM) o la

*frecuencia* (FM) para variar la frecuencia cargadora y superponer la información de la voz u otro sonido en radiodifusión o las alteraciones de luz y oscuridad en la imagen de la televisión.

El radio transmisor incluye un *generador de oscilación* (de cristal de cuarzo o un circuito LC) para producir la radio frecuencia deseada, un *amplificador* para aumentar la intensidad de las oscilaciones, un *transductor* para convertir la información a ser transmitida en un cambio de voltaje proporcional a la intensidad. Para la transmisión de sonido, el transductor es el *micrófono* y para la transmisión de video, el transductor es un dispositivo *fotoeléctrico*. Otro componente es el *modulador* que utiliza los cambios de voltaje para controlar las intensidades de la oscilación o la frecuencia instantánea de la frecuencia cargadora y la *antena* que irradia la onda cargadora modulada.

La *modulación* de la señal se puede hacer por: a) *Modulación de pulso*, utilizada en relojes controlados por radio. b) *Modulación de la Amplitud*, se produce por la superposición de ondas con la información y la onda cargadora para variar la amplitud de la onda. c) *Modulación de la Frecuencia*, se obtiene al cambiar levemente la frecuencia de la onda cargadora con la frecuencia de la onda con la información: (Ver Figura 84)

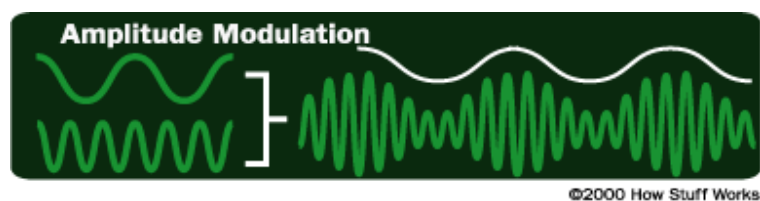




Figura 84. Modulación de la Amplitud (AM) y Modulación de la Frecuencia (FM)

La modulación de frecuencia (FM) tiene la ventaja que es mucho menos sensible al ruido y la interferencia debida al sistema de ignición de los automóviles y las tormentas eléctricas, que afectan seriamente a la señal con modulación de amplitud (AM). La radiodifusión FM se hace a frecuencia alta (88 a 108 MHz, ancho de banda de 50 Hz a 15 kHz con sonido estereo, 10W a 100 kW de potencia) que es favorable para señales anchas, pero tiene un rango de recepción limitado. La televisión comercial, el sonido se envía por FM y el video por AM. En frecuencia super alta (SHF), el video también se puede enviar por FM, como también para transmitir la televisión digital.



Figura 85. Diferentes tipos de antenas para telefonía y radiodifusión.

*Antenas:* Las antenas utilizadas para telefonía y radiodifusión (Ver Figura 85) son muy variadas en tamaño y forma dependiendo del uso y el alcance de la señal. Radiodifusión comercial de frecuencias medianas y radio de onda corta, radio FM y televisión requieren antenas muy grandes y altas, especialmente si se desea una

cobertura amplia de la señal. La mejor ubicación de la antena es en un sitio alto y alejado de la ciudad, aunque los estudios de radio y televisión suelen estar en el corazón de la ciudad; la conexión del estudio con la antena es transmitida por cables eléctricos o preferiblemente por cables coaxiales o fibra óptica. Las antenas antiguas de televisión tienen varios brazos perpendiculares a una barra central, de diferentes tamaños correspondientes a las diferentes regiones de la señal (UHF, VHF). Las antenas también pueden ser *parabólicas*, especialmente las utilizadas para comunicación satelital.

*Receptores:* Las partes esenciales de un receptor de radio (o de televisión) son: una *antena* para recibir las ondas electromagnéticas y convertirlas en oscilaciones eléctricas; un *amplificador* (pueden ser varios transistores) para aumentar la intensidad de estas oscilaciones; un equipo de detección (puede ser un diodo) para *demodular* la señal; un *parlante* para convertir los impulsos en ondas *sonoras* que sean oíbles por el oído humano (y en televisión un *tubo* o *pantalla* para convertir la señal en ondas de luz visible); un *oscilador* (por ejemplo *superheterodino*) que genera radio frecuencia para “mezclar” con la frecuencia cargadora y poder discriminar las frecuencias que ingresan a la antena. Para “sintonizar” a las diferentes frecuencias, la frecuencia del oscilador se varía, pero se produce una frecuencia intermedia que siempre se mantiene (455 kHz para AM y 10,7 MHz para FM). La mayoría de las estaciones de radio AM no pueden reproducir fielmente sonidos por debajo de 100 Hz ó por encima de 5 kHz; las estaciones de FM tienen un rango de frecuencias de 50 Hz a 15 kHz. Los receptores modernos, especialmente los de FM, tienen muy buena resolución de la señal, o sea mantienen *alta fidelidad*, pueden responder a señales en *estereo*, tienen *bajo ruido*, *baja distorsión*.



*Monitores de bebés:* Son los sistemas más sencillos de transmisión de ondas de radio. Consta de un transmisor (que está en el cuarto del bebé) y un receptor (que los padres utilizan para escuchar el bebé) (Ver Figura 86)



Figura 86. Receptor y transmisor de un monitor de bebé.

El transmisor es una “pequeña estación de radio”, con AM, 49 MHz de rango de frecuencia, 2 frecuencias, 0,25 W de potencia, 61 metros de alcance de la transmisión.

*Control remoto con radio:* El uso de control remoto para controlar juguetes (aviones, botes, carros) es muy divertido. La persona que controla tiene un transmisor de radio (con alcance limitado), que envía señales codificadas (27 MHz a 49 MHz) que el receptor del juguete recibe y opera sobre algún servo-motor. Los controles para *abrir puertas de garaje* operan con un principio similar. Se supone que cada persona adquiere un control con un código propio.

*Radio modems:* Permiten comunicación digital de datos a través de ondas de radio. Las ondas cargadoras se pueden modificar para incorporar data digital variando su amplitud, frecuencia o fase. AM se utiliza para transmisiones lentas; FM para transmisiones más rápidas (hasta 1200 bytes/seg); PSK o modulación de fase, para mayores velocidades (hasta 4800 bytes/seg).

*Resonancia Magnética Nuclear (NMR):* Es un fenómeno físico basado en las propiedades magnéticas de un núcleo atómico. RMN estudia un núcleo magnético, alineándolo con un campo *magnético* externo y perturbando esta alineación con un campo *electromagnético* que normalmente está en la región de ondas de radio. La espectroscopia RMN es la principal técnica usada para obtener información física, química, electrónica y estructural sobre moléculas. Núcleos como  $^1\text{H}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{13}\text{C}$ , pueden absorber energía RF cuando se colocan en un campo magnético de determinada fuerza. Cuando esta absorción ocurre, el núcleo se describe como en *resonancia*. Solo los núcleos con momento magnético nuclear,  $I > 0$  (o sea que tienen spin nuclear) son efectivos en RMN. Esto se puede determinar si: a) Si el número de neutrones y el número de protones son ambos pares, entonces el núcleo NO tiene spin (no son activos en RMN). b) Si el número de neutrones mas el número de protones es impar, entonces el núcleo tiene un spin medio integral (ej.  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ , etc.  $^1\text{H}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{13}\text{C}$  tienen  $I = 1/2$ ). c) Si el número de neutrones y el número de protones son ambos impar, entonces el núcleo tiene un spin integral (ej. 1, 2, 3, etc). Un núcleo con spin nuclear  $I$ , tendrá  $2I + 1$  posibles orientaciones cuando se coloca en la presencia de un campo magnético. Así, un núcleo con  $I = 1/2$  tendrá dos posibles orientaciones, que tienen igual energía en ausencia de un campo magnético. Si se aplica un campo magnético, los niveles de energía se separan, dependiendo de la fortaleza del campo aplicado. (Ver Figura 87). Cada nivel tiene un *número cuántico magnético*,  $m$ , y el spin del núcleo se alinea con el campo (nivel de menor energía) o está en dirección opuesta al campo aplicado

(nivel de mayor energía). Al irradiar el sistema con una frecuencia adecuada (en la region de RF) puede ocurrir una transición del sistema del nivel de energía más bajo hasta el nivel de mayor energía.

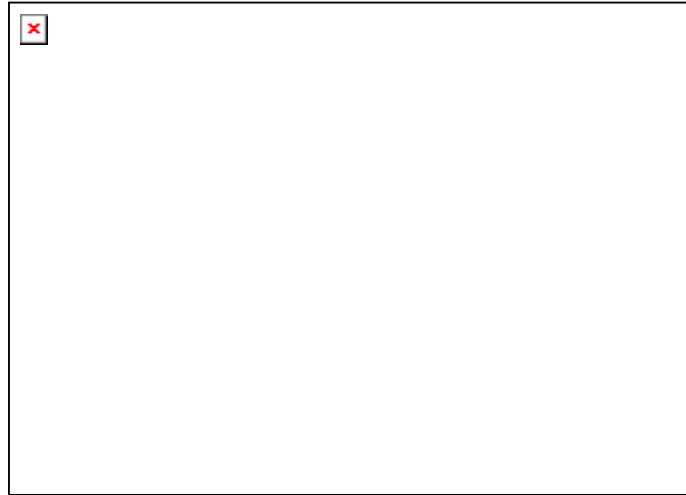


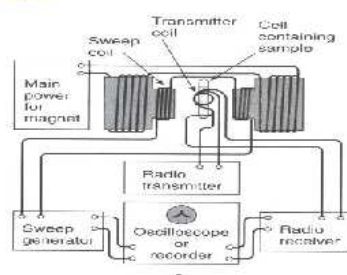
Figura 87. Niveles de energía para un núcleo con  $I=1/2$

En un experimento de RMN, los átomos se excitan con un pulso magnético de alta frecuencia, y luego se mide la radiación RF re-emitida por esos átomos cuando retornan al nivel normal. Las frecuencias donde ocurren las transiciones dependen del entorno sentido por los átomos respectivos y el número de átomos vecinos que tengan spin nuclear, siendo esto muy informativo sobre la estructura de las moléculas. Los instrumentos modernos son de transformada de Fourier (FT-RMN), donde se puede analizar un rango de frecuencias simultáneamente. La muestra se irradia con un *pulso* corto de radio frecuencia que contiene todas las frecuencias necesarias para excitar cada núcleo bajo estudio. Los detectores analizan el decaimiento de los núcleos a los niveles más estables como un patrón dependiente del tiempo, conocido como *decaimiento por inducción libre* (FID). Este patrón se puede convertir a un patrón de frecuencias realizando una *transformada de Fourier* dando el *espectro*, que estamos acostumbrados a ver. Este proceso matemático lo realiza el sistema de computación del instrumento muy rápidamente. En los

instrumentos modernos se utilizan pulsos de diferentes formas, frecuencias y duraciones en patrones diseñados específicamente o en secuencia de pulsos para obtener informaciones diversas sobre las moléculas. Esto ha permitido realizar experimentos de RMN en dos y tres dimensiones, tales como COSY (espectroscopía de correlación homonuclear), que proveen mucha información sobre la estructura molecular.

En la Figura 88 se muestra un diagrama de la zona de muestreo de un instrumento RMN. La celda contiene la muestra que va a ser estudiada. El magneto grande crea el campo magnético que rodea la muestra. La frecuencia de radio (RF) producida por un transmisor de radio irradia la muestra. El generador de barrido crea un campo de “búsqueda” para encontrar el campo magnético correspondiente al núcleo a ser estudiado. Finalmente el receptor de radio detecta la radio frecuencia después de irradiar las moléculas. El osciloscopio o registrador registra la radio frecuencia y el sistema de computación muestra el espectro. Los instrumentos modernos de FT-NMR, utilizan campos magnéticos muy altos producidos por magnetos superconductores y sistemas de irradiación de pulsos y detección de señales de alta sensibilidad. En la Figura 89 se muestra

## The NMR Spectrometer



Laidler, Keith J. and John H. Meiser. *Physical Chemistry*. Boston, Houghton Mifflin Company, 1999.

- The *cell containing sample* contains the material intended to be studied
- The *large magnets* create a magnetic field surrounding the sample
- A radio frequency bombards the sample after originating from the *radio transmitter*
- The *sweep generator* creates a "searching" field to find a corresponding magnetic field for the nuclei to be studied
- Finally the *radio receiver* detects the radio frequency after bombarding the molecules
- The *oscilloscope* records the subsequent radio frequency

Figura 88. Diagrama del sistema de muestreo de un instrumento RMN.



Figura 89. Instrumento FT-RMN con magneto superconductor.

un instrumento FT-NMR de 750 MHz con magneto superconductor (enfriado con He líquido y nitrógeno líquido).

Los momentos magnéticos nucleares debido al spin nuclear de un determinado átomo en una molécula, sienten la presencia de los electrones que conforman los electrones interiores de los átomos y los electrones de los enlaces químicos en las moléculas. Estos electrones hacen cambiar las

frecuencias de resonancia de las transiciones entre los diferentes niveles del spin nuclear. Estos cambios corresponden a los *desplazamientos químicos* que son característicos de los diferentes grupos en las moléculas. Una muestra de los rangos de valores de desplazamientos químicos ( $\delta$ , ppm, con

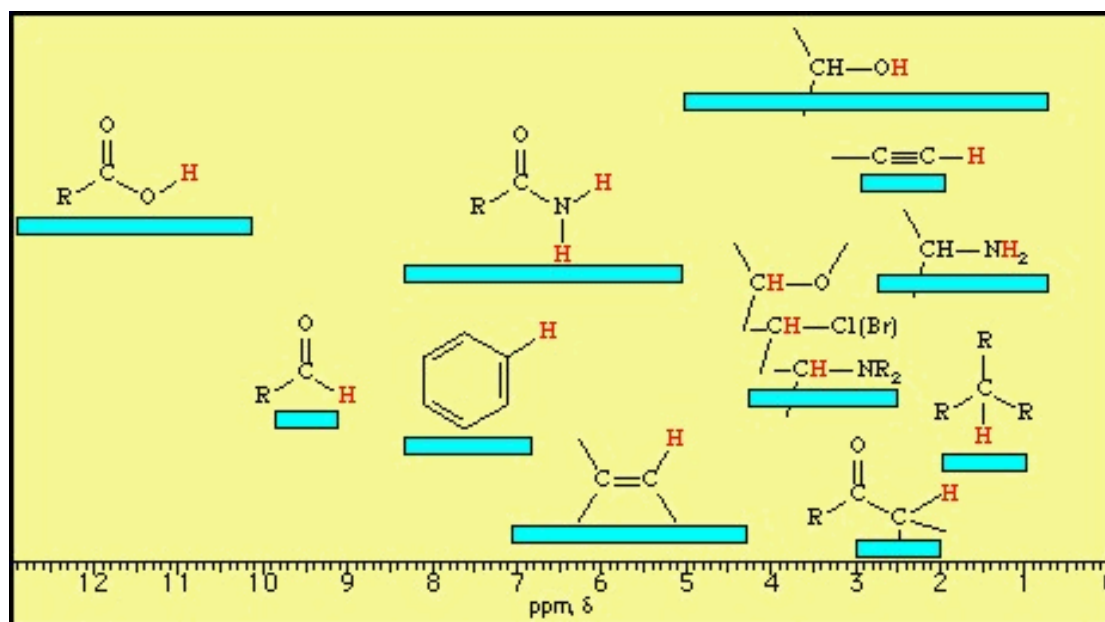


Figura 90. Desplazamientos químicos,  $\delta$  (ppm) de protones en diferentes entornos químicos (grupos funcionales)

referencia de  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  (tetrametilsilano, TMS) en  $\delta = 0$  ppm, se muestra en la Figura 90. Si la señal se desplaza hacia menores valores de  $\delta$ , se dice que el núcleo está siendo electrónicamente “apantallado” (tiene mayor densidad electrónica alrededor) y se ha desplazado hacia *campos más altos*. Si ocurre el efecto hacia valores de  $\delta$  más altos, el núcleo está “desapantallado” y la señal se ha desplazado hacia *campos más bajos*. Esto ocurre cuando el átomo está enlazado a otro átomo más electronegativo (ej. oxígeno, halógeno, nitrógeno, que ejercen efecto *inductivo*). El otro factor importante en los espectros RMN son los *acoplamientos spin-spin*,  $J$ , que ocurren entre

los núcleos con  $\text{spin} > 0$ . Los valores de J y el número de transiciones observadas también proveen mucha información sobre la estructura de la molécula. (Ver Apéndice 7)

*Imagenología con Resonancia Magnética (MRI):* También llamada *Tomografía con Resonancia Magnética (MRT)*, es un método de crear imágenes del interior de órganos opacos en organismos vivos o detectar agua contenida en estructuras geológicas como rocas. Es usada principalmente para demostrar alteraciones patológicas o fisiológicas de tejidos vivos en *imagenología médica*. Tiene como base la resonancia magnética nuclear (NMR), principalmente de los átomos de hidrógeno en las moléculas de agua que contienen los tejidos vivos. En la presencia de un campo magnético muy fuerte, los spines de los protones asumen posiciones paralelas o antiparalelas al campo magnético. Un pulso de radio frecuencia (RF) en un plano perpendicular al campo magnético, causa que algunos núcleos estén temporalmente no alineados con el campo en un nivel de energía mayor. Para obtener la imagen, reaplican tres gradientes magnéticos ortogonales (X,Y, Z): el primero es la selección del “corte”, aplicado durante el pulso RF, luego es el gradiente de la fase y tercero el gradiente de la frecuencia. Conforme los núcleos en los niveles de mayor energía emiten energía, proveen información acerca de su entorno. Estos procesos de decaimiento están relacionados con *relajación longitudinal*,  $T_1$  o *relajación transversal*,  $T_2$ . Se aplica una secuencia en las tres dimensiones de gradiente de campo que provee información sobre la posición de los átomos. Un análisis por transformada de Fourier de las señales de relajación provee las “imágenes” observadas, con una resolución de  $1\text{mm}^3$ . Las “imágenes” permiten diferenciar los tejidos normales de los tejidos patológicos (ej. un tumor cerebral). En la Figura 91 se destacan algunas imágenes de MRI.



Figura 91. Imágenes de Imagenología con Resonancia Magnética (MRI)

La alta resolución obtenida en MRI ha permitido múltiples aplicaciones de la técnica a nivel médico, siendo una tecnología no invasiva de mucho futuro en el área médica.



## 4.

### **Consecuencias importantes del conocimiento y uso del espectro electromagnético**

La radiación electromagnética está a nuestro alrededor, algunas regiones no las podemos “sentir” directamente ya que no poseemos “sensores” propios adecuados para esa sensibilidad, pero otras si sentimos: la región *visible* la detectamos con los ojos y la región *infrarrojo* con los sensores de “calor” que tenemos en la piel. Otras regiones, por la cantidad de energía que poseen los fotones respectivos pueden “causar daño” que nos hace “sensibles” a esas regiones: las de radiación ionizante como son: los *rayos gamma*, *rayos X* y *luz ultravioleta*; otras regiones como las *microondas* por las interacciones con el agua del cuerpo. Un factor importante en todas las interacciones con el espectro electromagnético es la *densidad de radiación* a la que estamos expuestos. Cuando la densidad de radiación provee una dosis de fotones muy alta, como por ejemplo en el *láser*, *maser* o *radiación sincrotrón* aun las radiaciones menos energéticas pueden ser peligrosas y se deben tomar todas las precauciones necesarias. Gracias al conocimiento y la tecnología, se han desarrollado fuentes y sensores en prácticamente todas las regiones del espectro electromagnético que nos permite “ver” y utilizar esas regiones.

*Peligros de la radiación electromagnética:* La región de *rayos gamma* y *rayos X* es la más energética y es capaz de producir daños severos a las células. Los rayos gamma pueden ser derivados de sustancias *radioactivas* y como son muy penetrantes hay que cuidarse cuando las dosis son muy altas. La radiación de rayos-X es también ionizante y hay que prevenir exposición derivada de fuentes

importantes como tubos de rayos catódicos (CRT), radiografías médicas, o radiación sincrotrón. Las pantallas de televisión de CRT, normalmente tienen una pantalla gruesa de vidrio plomado en frente que filtra los rayos X que se producen cuando los electrones acelerados chocan con los pigmentos *fósforos* que producen las imágenes. Otra radiación ionizante, como lo es la región *ultravioleta* puede dañar el material genético y romper la molécula de ADN. En la Figura 92 se representa el daño producido al ADN por un fotón UV incidente. En un evento común, se rompen los enlaces entre las bases que están a través de la “escalera” del ADN, y se reforman enlaces con bases adyacentes en una de las cadenas, creando una protuberancia que distorsiona la molécula y no permite su normal funcionamiento.

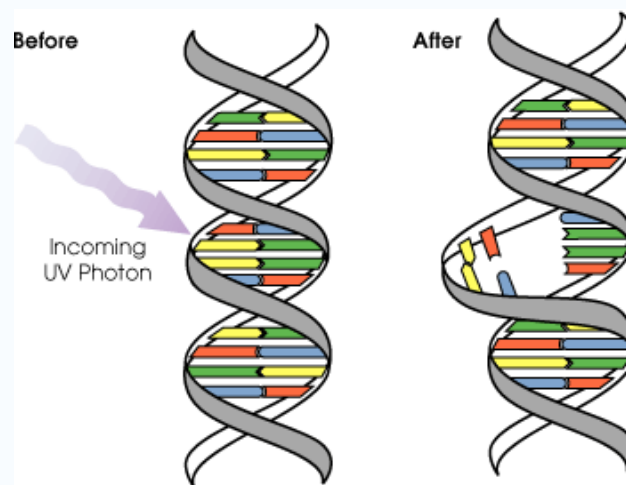


Figura 92. Daño al ADN producido por un fotón UV incidente.

En general, la región UVA es la menos dañina, pero contribuye al envejecimiento de la piel y posiblemente a cáncer de la piel. Penetra profundamente y no causa “quemadura del sol”, pero es importante que las lociones “bloqueadores de sol” corten ambos UVA y UVB. Alta intensidad de UVB, es muy peligrosa para los ojos tanto del sol como la luz UV de la “soldadura

de arco eléctrico”, siendo indispensable el uso de la pantalla o los lentes protectores para proteger la retina. UVA, UVB y UVC pueden dañar las fibras del *colágeno*, lo que acelera el envejecimiento de la piel. Las lámparas de *tungsteno-halógeno* tienen bulbos hechos de cuarzo que es transparente al UV y no de vidrio ordinario que lo filtra, siendo fuentes peligrosas de UVB. La región UVA se conoce como “luz- oscura”, puede penetrar por las ventanas, penetra profundamente en la piel y causa las arrugas de la piel. UVB ha sido conectada con cáncer de la piel como el *melanoma*. La mutagenicidad del UV se puede observar en cultivos de bacterias. La pérdida de la *capa de ozono*, produce aumentos en la cantidad de UV que penetra la atmósfera y causa incremento en los daños a los seres vivos. Exposición a dosis moderadas de luz solar (incluyendo el UV) son necesarias para la producción de *vitamina D* en la piel, siendo indispensable para la formación sana de los huesos. El organismo humano tiene un sistema natural de defensa contra el UV que es la producción del pigmento café oscuro *melanina*, que filtra el UV y que produce el “bronceado” al exponerse al sol o que determina la pigmentación de la piel en las diferentes razas. Para las personas de tez blanca se recomienda el uso de “bloqueador solar” (con número de bloqueo alto) cuando se exponen al sol en la playa o las montañas (mayor UV a mayor altura y se refleja de la nieve y el hielo). Para la vista, se recomiendan “lentes solares” de plástico (como policarbonato que bloquea la mayoría del UV).

Todas las radiaciones ionizantes, más UV-visible y el infrarrojo en grandes cantidades se producen en las explosiones nucleares, siendo muy peligrosas y dañinas las pruebas nucleares en la atmósfera. En el caso de guerra nuclear, como todos estaremos muertos, estas consideraciones ya no serían relevantes.

En la región de microondas, los peligros a la salud se pueden relacionar al calentamiento local producido por la absorción de radiación por el agua y los

tejidos. Se proponen daños a la lente del ojo o incidencia de *cataratas*. Esto podría ocurrir si, por ejemplo, el horno de microondas está defectuoso o tiene la puerta con fugas de radiación. El límite permisible de fuga de radiación es de  $1 \text{ mW/cm}^2$  a 5 cm de un horno nuevo (un horno viejo es 5 veces mayor). En comparación, un teléfono celular (GSM) emite 1 W a 1800 MHz que corresponde a  $2 \text{ mW/cm}^2$  a 5 cm. Los líquidos se pueden “supercalentar” en un horno de microondas (especialmente si no se revuelven o giran) y es peligroso porque al moverlo ebulle explosivamente y puede quemar. Huevos o recipientes cerrados pueden explotar al calentarse por la presión del vapor de agua. Metales o papel aluminio no debe incorporarse en el horno microondas, pues producen chispas y pueden encender los alimentos o materiales.

Existe mucha controversia sobre el uso de teléfonos celulares (que se comunican por microondas) y la aparición de tumores cerebrales en personas jóvenes. Igualmente, la exposición prolongada a ondas de radio (o las ondas producidas por líneas de alta tensión eléctricas) se ha argumentado que producen cáncer o leucemia. No existen estudios definitivos que esclarezcan este debate.

En los estudios MRI o en los estudios de RMN se debe tener cuidado con los altos campos magnéticos que son utilizados en el instrumento, o sea no se deben acercar ningún objeto ferromagnético o la presencia de implantes metálicos (prótesis quirúrgicos o marcapasos). Igualmente interacción con la radio frecuencia produce calentamiento en cualquier objeto metálico o implante y causar un daño.

## 5

### **Bibliografía**

Levine, I.N. “Fisicoquímica”, Cuarta Edición, McGraw Hill, España, 1999.

Halliday, D, Resnick, R, “Physics- For students of Science and Engineering”, Wiley, New York, 1960

Enciclopedia de las Ciencias, Orbis S.A., España, 1986.

Feynman, R. “QED- The strange theory of Light and Matter”, Princeton Science Library, New Jersey, 1985.

Fontal, B. “Sistemas materiales y lenguaje de la química”, Fac. de Ciencias, Mérida, 1987.

Goddard Space Flight Center – NASA. Página web.

Wikipedia. Página web.

Howstufworks. Página web

# 6

## Apéndice 1. Ecuaciones básicas del Electromagnetismo (Ecuaciones de Maxwell)

Nombre	Ecuación	Describe	Experimento clave
Ley de Gauss de electricidad	$\epsilon_0 \Phi_E = q$	Carga y el campo eléctrico	1. Cargas iguales se repelen y desiguales se atraen, como el inverso del cuadrado de su separación. 1'. La carga de un conductor aislado se mueve a su superficie externa.
Ley de Gauss de magnetismo	$\Phi_B = 0$	El campo magnético	2. Es imposible crear un polo magnético aislado.
Ley de Ampere (ampliada por Maxwell)	$\frac{1}{\mu_0} \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + i$	El efecto magnético de una corriente o de un campo eléctrico cambiante	3. Una corriente en un alambre crea un campo magnético cerca del alambre. 3'. La velocidad de la luz se puede calcular de medidas puramente electromagnéticas
Ley de inducción de Faraday	$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$	El efecto eléctrico de un campo magnético cambiante	4. Una barra magnética, introducida a través de un aro cerrado de alambre, producirá una corriente en el aro.

$\epsilon_0$  = permitividad =  $8.85415 \times 10^{-12}$  coul<sup>2</sup>/nt-m<sup>2</sup>;  $\mu_0$  = permeabilidad =  $1.26 \times 10^{-6}$  henry/m ; q = carga eléctrica (coulombios);  $\Phi_E$  = campo eléctrico;  $\Phi_B$  = campo magnético

## Apéndice 2

### El efecto Mössbauer:

En el efecto Mossbauer se pueden observar tres interacciones hiperfinas: 1. Desplazamiento Isomérico ( $\delta$ ), 2. Desdoblamiento cuadrupolar ( $\Delta$ ) y 3. Desdoblamiento nuclear Zeeman.

Desplazamiento Isomérico ( $\delta$ ): Tiene su origen en las interacciones electrostáticas entre el núcleo y sus alrededores que desplaza los niveles de energía nucleares. Se observa el desplazamiento isomérico si la configuración electrónica es diferente entre la fuente de rayos gamma y el absorbedor. Se presenta en los espectros como valores en cm/seg desplazados desde el zero de velocidad.

Desdoblamiento cuadrupolar ( $\Delta$ ): Se observa como un desdoblamiento de las líneas en el espectro derivado del hecho que existe un gradiente de campo  $q$  y no es esféricamente simétrico. Se mide como valores en cm/seg entre los picos . Se reporta en cm/seg.

Efecto nuclear Zeeman: Se produce cuando los niveles nucleares se desdoblan en varios otros niveles debido a la presencia de un campo magnético externo. Debido al desdoblamiento y los otros niveles presentes, el espectro presenta mayor número de bandas en el espectro o sea se manifiesta como estructura hiperfina.

### Apéndice 3 Frecuencia de grupos en el IR

En la Tabla abajo se presentan las frecuencias (en  $\text{cm}^{-1}$ ) para los grupos típicos de compuestos orgánicos.

Clase funcional	Vibraciones de estiramiento		Vibraciones de flexión de ángulo	
	Rango (Intens) Asignación		Rango(Intens) Asignación	
Alcanos	2850-3000 (f)	CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub> & CH 2 o 3 bandas	1350-1470 (m) 1370- 1390 (m) 720-725	CH <sub>2</sub> & CH <sub>3</sub> deformación CH <sub>3</sub> deformación CH <sub>2</sub> balanceo
Alquenos	3020- 3100 (m)  1630-1680 (var) 1900-2000 (f)	=C-H & =CH <sub>2</sub> (usualmente fina)  C=C (simetría reduce intensidad)  C=C estiramiento asimétrico	880-995(m)  780-850(m)  675-730 (deb)	=C-H & =CH <sub>2</sub> (flexión fuera de plano)   cis-RCH=CHR
Alquinos	3300 (f)  2100-2250 (var)	C-H (usualmente fina)  C≡C (simetría reduce intensidad)	600-700 (f)	C-H deformación
Arenos	3030 (var)  1600 & 1500 (m-deb)	C-H (pueden ser varias bandas) C=C (en anillo) (2 bandas) (3 si conjugado)	690-900 (f-m)	C-H flexión & plegar el anillo
Alcoholes y fenoles	3580-3650 (var)  3200-3550 (f)  970-1250 (f)	O-H (libre), usualmente fina O-H (H-enlace puente), usualmente ancho C-O	1330-1430 (m)  650-770 (var-deb)	O-H flexión (en el plano) O-H flexión (fuera del plano)
Aminas	3400-3500 (soln dil.) (deb) 3300-3400 (soln dil.) (deb) 1000-1250 (m)	N-H (1°-aminas), 2 bandas N-H (2°-aminas)  C-N	1550-1650 (m- f)  660-900 (var)	NH <sub>2</sub> tijereo (1°-aminas) NH <sub>2</sub> & N-H balanceo (se desplaza con



Aldehidos y cetonas	2690-2840 (2 bandas) (m) 1720-1740 (f) 1710-1720 (f)  1690 (f) 1675 (f) 1745 (f) 1780 (f)	C-H (aldehido C-H)  C=O (aldehido saturado) C=O (cetona saturada)  aril cetona $\alpha$ , $\beta$ -insaturación ciclopentanona ciclobutanona	1350-1360 (f) 1400-1450 (f) 1100 (m)	H-enlace puente) $\alpha$ -CH <sub>3</sub> flexión $\alpha$ -CH <sub>2</sub> flexión C-C-C flexión
Acidos carboxílicos y derivados	2500-3300 (ácidos) sobrepone a C-H (f) 1705-1720 (ácidos) (f) 1210-1320 (ácidos) (m- f)  1785-1815 (acilo haluros) (f) 1750 & 1820 (anhídridos) (f) 1040-1100 (f) 1735-1750 (ésteres) (f) 1000-1300 (f) 1630-1695(amidas) (f)	O-H (muy ancha)  C=O (H-enlace puente)  O-C (a veces 2-picos)  C=O  C=O (2-bandas)  O-C C=O  O-C (2-bandas)  C=O (banda amida I)	1395-1440 (m)       1590-1650 (m)  1500-1560 (m)	C-O-H bending       N-H (1 <sub>j</sub> -amida) banda II N-H (2 <sub>j</sub> -amida) banda II
Nitrilos	2240-2260(m)	C≡N (fina)		
Isocianatos, Isotiocianatos, Diimidias, Azidas & Cetenos	2100-2270 (m)	-N=C=O, -N=C=S -N=C=N-, -N <sub>3</sub> , C=C=O		

Clase Funcional	Absorciones Características
<b>Funciones Azufre</b>	
<b>S-H</b> tioles	2550-2600 $\text{cm}^{-1}$ (deb & fina)
<b>S-OR</b> ésteres	700-900 (f)
<b>S-S</b> disulfuro	500-540 (deb)
<b>C=S</b> tiocarbonilo	1050-1200 (f)
<b>S=O</b> sulfóxido sulfona ácido sulfónico cloruro sulfonilo sulfato	1030-1060 (str) 1325 $\pm$ 25 (asim) & 1140 $\pm$ 20 (sim) (ambos f) 1345 (f) 1365 $\pm$ 5 (asim) & 1180 $\pm$ 10 (sim) (ambos f) 1350-1450 (f)
<b>Funciones Fósforo</b>	
<b>P-H</b> fosfina	2280-2440 $\text{cm}^{-1}$ (m & fina) 950-1250 (deb) P-H flexión
<b>(O=)PO-H</b> ácido fosfónico	2550-2700 (m)
<b>P-OR</b> ésteres	900-1050 (f)
<b>P=O</b> óxido de fosfina fosfonato fosfato fosforamida	1100-1200 (f) 1230-1260 (f) 1100-1200 (f) 1200-1275 (f)
<b>Funciones Silicio</b>	
<b>Si-H</b> silano	2100-2360 $\text{cm}^{-1}$ (f)
<b>Si-OR</b>	1000-11000 (f & ancho)
<b>Si-CH<sub>3</sub></b>	1250 $\pm$ 10 (f & fina)
<b>Funciones Nitrogeno Oxidado</b>	
<b>=NOH</b> oxima O-H (estiram) C=N N-O	3550-3600 $\text{cm}^{-1}$ (f) 1665 $\pm$ 15 945 $\pm$ 15
<b>N-O</b> óxido de amina alifático Aromático	960 $\pm$ 20 1250 $\pm$ 50
<b>N=O</b> nitroso nitro	1550 $\pm$ 50 (f) 1530 $\pm$ 20 (asim) & 1350 $\pm$ 30 (sim)

## Apéndice 5

### Ecuaciones de Radar

La cantidad de potencia que retorna a la antena receptora después de enviar la

primera señal es: 
$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2}$$
, donde:

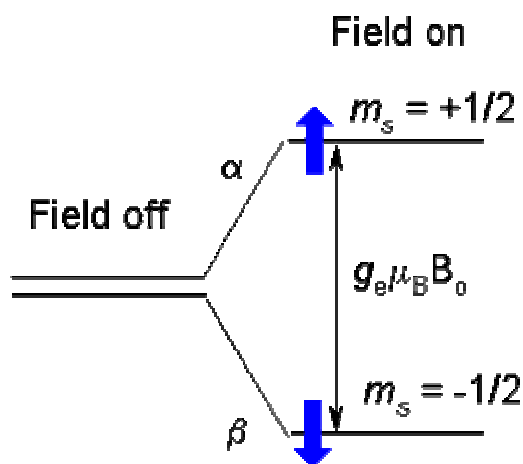
$P_t$  = potencia de la transmisión;  $G_t$  = ganancia de la antena transmisora;  $A_r$  = area o apertura efectiva de la antena receptora;  $\sigma$  = sector efectivo del radar o coeficiente de dispersión del objeto blanco;  $R_t$  = distancia del transmisor al objeto blanco;  $R_r$  = distancia desde el objeto blanco al receptor. Cuando el transmisor y el receptor están en el mismo sitio,  $R_t = R_r$  y la ecuación de radar queda como:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 R^4}$$
 que indica que la potencia varía como la cuarta potencia de la distancia al objeto que se quiere detectar, o sea que el radar no tiene un alcance muy grande.

## Apéndice 6

### Resonancia de spin electrónico (EPR):

La interacción de un electrón no apareado con el campo magnético aplicado produce un desdoblamiento de los niveles de energía (Efecto Zeeman). Corresponde a las dos orientaciones del momento magnético del electrón. Esto se muestra en la figura abajo:  $E_{ms} = g\mu_B \mathbf{B}_0 m_s$



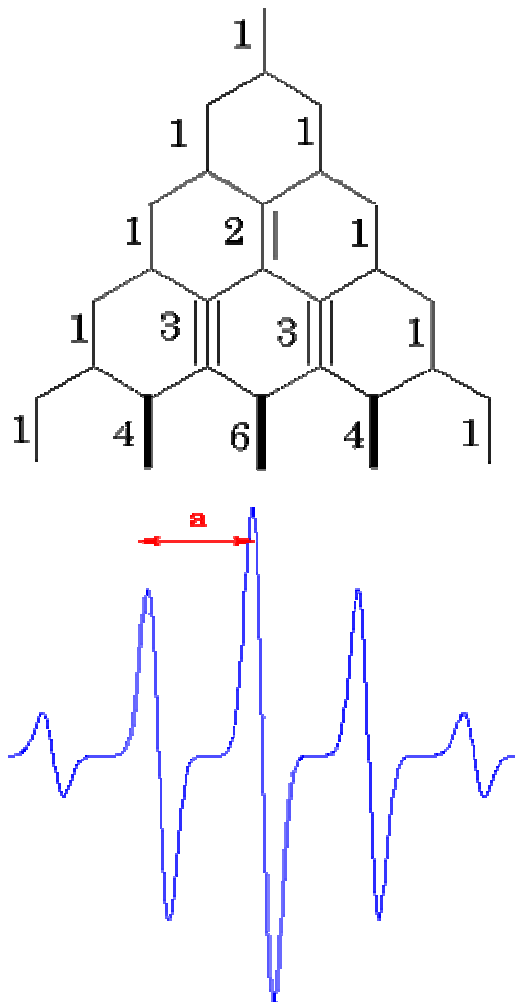
Donde:  $\mathbf{B}_0$  = fuerza del campo magnético externo aplicado (en Gauss,  $1\text{G} = 0,001$  Tesla);  $m_s = \pm 1/2$  para un solo electrón desapareado;  $\mu_B = [eh/4\pi m_e] = 9.2740 \times 10^{-24}$  J/T (Magnetón de Bohr),  $e$  = carga del electrón;  $m_e$  = masa del electrón;  $h$  = constante de Planck;  $g_e$  = valor de  $g$  del electrón = 2,0023193. Si el electrón tiene un momento angular  $L$  no igual a cero, el valor de  $g$  es: (Factor de Landé)

$$g = 1 + \frac{S(S+1) - L(L+1) + J(J+1)}{2J(J+1)}$$

El momento magnético efectivo es:

$$\pi_{\text{eff}} = g\mu_B[J(J+1)]^{1/2}, J = \text{momento angular total.}$$

Si los núcleos de la molécula tienen spin nuclear = I, el momento magnético nuclear será:  $\mu = g_N\mu_N[I(I+1)]^{1/2}$ , donde  $\mu_N$  = magnetón de Bohr nuclear =  $5,051 \times 10^{-27}$  J/T. Si ocurre la interacción electrón- núcleo,  $E_{mI} = Am_I m_s$ , donde A= constante de interacción hiperfina. En la Figura abajo se representa el acoplamiento de un electrón no apareado con n = 4 hidrógenos (I = 1/2) equivalentes. El número de picos esperado es  $2nI+1 = 5$  líneas con intensidades 1:4:6:4:1



## Apéndice 7

### Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

El fenómeno se aplica a sistemas que tienen spin nuclear,  $I$ , no igual a cero. El núcleo posee un momento magnético nuclear, que en la presencia de un campo magnético externo, asume valores cuantizados ( $2I + 1$ ). La energía  $E = -mh\gamma\mathbf{B}_0/2\pi$ , donde  $m$  = número cuántico magnético,  $\gamma$  = razón magnetogiro ( $\gamma = 2\pi\mu/hI$ ),  $\mathbf{B}_0$  = campo magnético aplicado. Para una transición entre los niveles cuánticos se requiere una radiación  $h\nu$  igual a la diferencia en energía  $\Delta E$  entre los niveles. La frecuencia sería entonces:  $\nu = \gamma\mathbf{B}_0/2\pi$ , correspondiente a la *resonancia* que da origen al espectro RMN.

*Valores de RMN de protones de productos del petróleo: Grupos funcionales de interés. Posición de los picos en ppm, utilizando TMS como referencia:*

- 0.5-1.0**       $\text{CH}_3$   $\gamma$  y más lejos, algunos nafténicos CH y  $\text{CH}_2$ . Separación a 1.0 ppm está resuelto en la línea base.
  
- 1.0-1.7**       $\text{CH}_2$   $\beta$  y más lejos. Algunos  $\beta$  CH.
  
- 1.7-1.9**      Mayoría CH,  $\text{CH}_2$ ,  $\beta$  hidroaromático.
  
- 1.9-2.1**       $\alpha$  a olefínico. Sólo si un pico claro aparece, asociado con picos a 4.5-6.0 ppm
  
- 2.1-2.4**       $\text{CH}_3$   $\alpha$  a carbono aromático. Separación a 2.4 ppm generalmente no es línea base
  
- 2.4-3.5**      CH,  $\text{CH}_2$   $\alpha$  a carbono aromático
  
- 3.5-4.5**       $\text{CH}_2$  puente (difenilmetano)
  
- 4.5-6.0**      Olefínico
  
- 6.0-7.2**      Anillo aromático sencillo
  
- 7.2-8.3**      Di-aromático y mayoría Tri- and Tetra-aromáticos

**8.3-8.9** Algunos anillos tri- and tetra-aromáticos

**8.9-9.3** Algunos anillos tetra-aromáticos