

LECCIÓN 1: VIBRACIONES Y ONDAS

1.1.- OSCILACIONES

Una partícula oscila cuando se mueve periódicamente con respecto a una posición de equilibrio. Por ejemplo el movimiento de un péndulo, el de un resorte al estirarlo y soltarlo, el de una partícula flotante sobre la superficie del agua, etc.

Cada una de las secuencias que se repiten se llama **oscilación o vibración**, el tiempo que transcurre en una oscilación **periodo T** y a su inversa o número de oscilaciones por unidad de tiempo **frecuencia v**.

De todos estos movimientos, quizá el más interesante es aquel en el que la ecuación que representa el **desplazamiento y** de la partícula que oscila, respecto de una posición de equilibrio, viene expresado por la ecuación:

$$y = A \operatorname{sen} \omega t = A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t \right) = A \operatorname{sen} 2\pi v t$$

donde A es el desplazamiento máximo o amplitud, ω la frecuencia angular y t el tiempo. Debido a que el movimiento está representado por una función seno (o coseno), funciones armónicas, se le denomina **movimiento armónico simple**.

Se puede demostrar que este movimiento se produce por una fuerza proporcional y opuesta al desplazamiento. Por tanto, podríamos definirlo como aquél producido por fuerzas F, tales que: $F = -k y$. Estas dos definiciones son equivalentes.

Este es un movimiento ideal ya que en muchos casos la fuerza F que lo produce va disminuyendo con el tiempo, con lo que disminuye también la amplitud del movimiento, que ya no será constante (A), sino que decrece de forma exponencial: Se dice entonces que se trata de **oscilaciones amortiguadas**.

1.2 – PROPAGACIÓN DE OSCILACIONES: ONDAS

Todos estamos familiarizados con la **propagación** de una sacudida en una cuerda tensa o de las perturbaciones producidas en la superficie del agua al impactar un objeto en ella o del sonido generado por cualquier foco sonoro (cuerdas vocales, instrumentos musicales, etc.).

En todos estos fenómenos se origina un movimiento en una zona de un **medio material** y debido a las **propiedades elásticas** del mismo, esta perturbación se propaga a través de un medio (cuerda, superficie del agua, aire). En todos los casos descritos se trata de un fenómeno similar, que llamaremos **movimiento ondulatorio u onda** y que se presenta en muchas ramas de la Física.

En esta sección nos limitaremos a las ondas en medios deformables o elásticos. Estas ondas se conocen con el nombre de **ondas elásticas u ondas mecánicas**, lo que nos indica las dos condiciones esenciales del medio en el que se produce la propagación: **inercia y elasticidad**.

Conviene notar que las oscilaciones de los elementos del medio son limitadas en su extensión, como se puede poner de manifiesto al observar el movimiento de objetos flotantes en el agua cuando pasa una onda. Lo que se propaga en el medio es un estado de movimiento, y por tanto energías cinética y potencial.

1.3.- TIPOS DE ONDAS

Las ondas se pueden clasificar en **longitudinales, transversales o mixtas**, según sea la perturbación o desplazamiento con respecto a la dirección de propagación. En las ondas longitudinales la perturbación se produce en la misma dirección de propagación: es el caso de las ondas sonoras, en el que las partículas del medio son obligadas a vibrar en dicha dirección. En las ondas transversales la perturbación se produce en la dirección perpendicular a la de propagación: sería el caso de las sacudidas en una cuerda. En las ondas mixtas la perturbación se produciría en ambas direcciones, como ocurre en las ondas en la superficie del agua, en las que las partículas se mueven tanto en vertical como en horizontal.

Las ondas también se pueden clasificar en **unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales**, según el número de dimensiones en que propaguen la energía. Así, las ondas en una cuerda serían unidimensionales, las olas u ondas superficiales en líquidos serían bidimensionales y el sonido sería una onda tridimensional.

En el caso de las ondas tridimensionales también se pueden caracterizar por la forma de las superficies a las que llega simultáneamente la perturbación producida, en un instante dado, por el foco emisor de las mismas. Cada una de estas superficies recibe el nombre de **superficie frente de ondas**. Según esto tendríamos ondas **esféricas, planas, cilíndricas, etc.** Las líneas perpendiculares en cada punto a las superficies frente de ondas reciben el nombre de **rayos**.

1.4.- ONDAS ARMÓNICAS

Si la perturbación producida en un punto se caracteriza por la expresión $y = f(t)$, y esta perturbación se propaga sin deformación en un medio unidimensional (lo que ocurre prácticamente en las ondas transversales en una cuerda), la perturbación en un punto situado a una distancia x tomará la forma $y = f(t-x/v)$, siendo v la velocidad de propagación de la onda.

Un caso particular, pero muy interesante, es aquel en el que la perturbación producida es un movimiento vibratorio armónico, nos llevaría a la ecuación:

$$y = f(t, x) = A \operatorname{sen} \omega(t - x/v) = A \operatorname{sen}(\omega t - kx) = A \operatorname{sen} 2\pi(t/T - x/\lambda)$$

que son diversas formas de expresar la ecuación de una **onda armónica** unidimensional.

Vemos que $y = f(t, x)$ presenta una **doble periodicidad**: se repite el valor de la perturbación en cada punto x dado, al cabo de un tiempo T , que llamaremos **periodo**; también se repite el valor de la perturbación en cada instante t dado, al avanzar en el espacio una distancia λ , que llamaremos **longitud de onda**. Otra forma de evidenciar esta doble periodicidad sería con los parámetros $\nu = 1/T$, que llamaremos **frecuencia** y que representa el número de oscilaciones en la unidad de tiempo, que mediremos en s^{-1} o hertz (Hz); y $\tilde{\nu} = 1/\lambda$, que llamaremos **número de ondas** y que representa el número de ondulaciones que existen en la unidad de longitud, y que mediremos en m^{-1} .

En algunas ocasiones usaremos los parámetros

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T \quad \text{y} \quad k = 2\pi\tilde{\nu} = 2\pi/\lambda$$

que reciben los nombres de frecuencia angular y número de ondas angular.

Es fácil verificar que se cumplen las relaciones

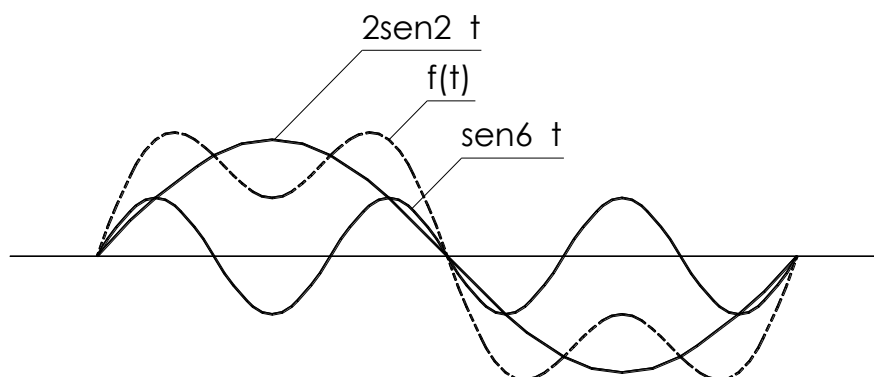
$$v = \lambda/T = \nu/\tilde{\nu} = \omega/k$$

lo que nos indica que una onda armónica avanza una longitud de onda en el tiempo en el que un punto material realiza una oscilación completa, es decir en un periodo.

1.5.- TEOREMA DE FOURIER

Si sumamos varias funciones sinusoidales de diferente amplitud, pero con frecuencias múltiplos de una dada se obtiene otra función periódica. En la figura se ha representado la función:

$$f(t) = 2\operatorname{sen} 2\pi t + \operatorname{sen} 6\pi t$$



Cabría preguntarse si la recíproca es cierta: Dada una función periódica ¿puede descomponerse en suma de funciones armónicas?. La respuesta está en un teorema, debido a **Fourier**, que daremos sin demostración: “Toda función periódica de periodo T puede descomponerse como suma de una función armónica de igual periodo, con otras funciones armónicas cuyas frecuencias sean múltiplos de la dada”. A la frecuencia de la función periódica se le llama **frecuencia fundamental** y a los múltiplos **armónicos**.

Este teorema podríamos sintetizarlo mediante la siguiente expresión:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n A_i \text{sen} 2\pi i \nu t$$

Podríamos aplicar estos resultados a la Física de la siguiente forma: “Todo movimiento periódico puede descomponerse como suma de movimientos armónicos simples, cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental”.

De la misma manera: “Toda onda periódica se puede descomponer en suma de ondas armónicas, cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental”, de ahí el interés en el estudio de las ondas armónicas.

LECCIÓN 2: ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

2.1.- CARACTERÍSTICAS GENERALES

En el estudio del electromagnetismo se puede ver como los campos magnéticos variables inducen campos eléctricos y también los campos eléctricos variables inducen campos magnéticos.

Por tanto, en cuanto se produce una perturbación de cualquiera de los dos, se produce también la del otro: debemos hablar del **campo electromagnético**.

De las ecuaciones de Maxwell en el vacío, se puede deducir que los campos eléctrico y magnético satisfacen las ecuaciones de onda, siendo **E** y **B** **perpendiculares entre sí** y **perpendiculares a la dirección de propagación de ambos**, con una velocidad:

$$c = \sqrt{K_e} / \sqrt{K_m} = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

donde K_e y K_m son las constantes eléctrica y magnética. Sustituyendo sus valores en el S.I. ($9 \cdot 10^9$ y 10^{-7} , respectivamente) tenemos el valor $3 \cdot 10^8$ m/s², es decir, la **velocidad de la luz**.

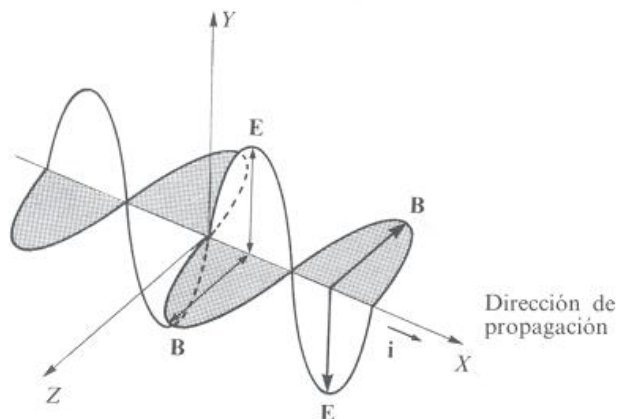
En consecuencia ambos campos se pueden expresar en la forma:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(t-x/c) \qquad \mathbf{B} = \mathbf{B}(t-x/c)$$

estas ecuaciones son las correspondientes a una onda plana que viaja en el sentido positivo del eje X, se trata de una **onda electromagnética**. En particular, si la onda es armónica de periodo $T = 2\pi / \omega$ y longitud de onda $\lambda = 2\pi / k$, tendremos:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \text{ sen}(\omega t - kx) \qquad \mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \text{ sen}(\omega t - kx)$$

estando relacionados los campos por: $E = c B$. Son ondas transversales, con los campos **E** y **B** perpendiculares entre sí. La dirección de propagación será, por lo tanto, la del vector **E x B**.



2.2.- MAGNITUDES QUE TRANSPORTA UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

La **densidad de energía** transportada por la onda, debida a los campos eléctrico y magnético, vale:

$$u = 1/2 \epsilon_0 E^2 + 1/2 B^2 / \mu_0 = \epsilon_0 E^2 = B^2 / \mu_0 = \epsilon_0 c E B$$

La energía transportada por la onda a través de un área A en el tiempo dt vale:

$$dU = \epsilon_0 E^2 A c dt$$

y la **intensidad de la onda** (energía por unidad de área y por unidad de tiempo) es:

$$I = dU/A \cdot dt = u c = \epsilon_0 c E^2 = \epsilon_0 c^2 E B$$

Como **E** y **B** varían con el tiempo, I también varía; el valor medio de su módulo en un punto es la intensidad media de la onda en dicho punto, y si la onda es armónica:

$$I_m = 1/2 \epsilon_0 c^2 E_0 B_0$$

(E_0 y B_0 son las amplitudes de E y B), su dirección es la de propagación de la onda y de la energía que ésta transporta.

Es decir, **una OEM transporta energía y momento** y cuando una partícula cargada absorbe o emite radiación electromagnética intercambia energía y momento.

2.3.- PRODUCCIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Evidentemente las OEM son producidas por las mismas fuentes que los campos electromagnéticos: las cargas eléctricas. Pero si integráramos el vector de Poynting a través de una superficie esférica centrada en una carga en movimiento rectilíneo y uniforme, obtendríamos un flujo neto de energía nulo. Concluimos que **una carga en movimiento rectilíneo y uniforme no irradia energía**, y por tanto no emite ondas electromagnéticas.

Por el contrario, si la carga está acelerada esto ya no es así, se transfiere energía a través de la superficie esférica al espacio exterior: **una carga acelerada irradia energía electromagnética**, con una potencia $P = K z^2 a^2$, donde z es la carga y a la aceleración.

Debido a que en la naturaleza existen dipolos eléctricos y magnéticos, los tipos de emisores de OEM más importantes son los **dipolos** eléctricos y magnéticos **oscilantes**. En átomos y moléculas la emisión dipolar eléctrica es mucho más intensa que la dipolar magnética, mientras que en los núcleos son comparables.

LECCIÓN 3: FOTONES Y ESPECTRO DE LAS O.E.M.

3.1.- ABSORCIÓN DE O.E.M. POR LA MATERIA: CONCEPTO DE FOTÓN

En el caso de los átomos, moléculas o núcleos, cuando por algún medio (colisiones, absorción de calor, absorción de radiación, etc.) absorben energía, se excitan a niveles (discretos) de energía superior y casi inmediatamente ($\approx 10^{-8}$ s en la mayoría de los átomos y moléculas y $\approx 10^{-15}$ s en los núcleos) se desprende energía en forma de radiación electromagnética. A veces la transición es poco probable y el estado excitado permanece tiempos muy superiores (estados **metastables**).

De lo dicho se deduce que tanto la **absorción** como la **emisión de OEM** por átomos, moléculas o núcleos, no puede tener cualquier energía, sino **sólo los valores correspondientes a las diferencias de energía entre dos niveles o estados** en que pueda encontrarse. Estas cantidades bien definidas, cuantificadas, reciben el nombre de **fotones** o cuantos de radiación electromagnética.

Su **energía** viene dada por la expresión de Plank

$$E = h \nu \quad (h: \text{constante de Plank})$$

y su **momento lineal** por

$$p = E/c = h \nu / c = h / \lambda$$

Cuando la materia absorbe OEM de baja energía y frecuencia, produce un **aumento de** la agitación térmica, es decir, de la **temperatura**. Si la OEM es de energía y frecuencia algo mayores, **excitan e ionizan** los átomos, moléculas y cristales, también pueden romper enlaces moleculares, **generando radicales libres**.

Por último, pueden interaccionar con los núcleos produciendo **reacciones nucleares** (fotorreacciones) que, en ocasiones, generan isótopos radiactivos.

En estos últimos casos se habla de **Radiaciones Ionizantes**.

Al ser las OEM ondas tridimensionales, aunque el **medio no absorba energía**, la **intensidad disminuye al alejarnos** del foco, ya que progresivamente se distribuye sobre una superficie mayor. Supongamos una onda producida por un foco puntual en un medio homogéneo e isótropo: las superficies frente de ondas serán esféricas y si consideramos que la potencia se conserva entre dos de ellas, de radios R_1 y R_2 , se cumplirá:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow I_1 \cdot S_1 = I_2 \cdot S_2 \Rightarrow I_1 R_1^2 = I_2 R_2^2, \text{ por tanto}$$

$$I_1 / I_2 = (R_2 / R_1)^2$$

es decir, **la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia**.

Si el **medio es absorbente**, la atenuación de la onda es de tipo exponencial:

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

donde x es el espesor atravesado por la onda y μ el **coeficiente de atenuación lineal**, que depende de la naturaleza del medio (densidad y número atómico promedio) y de la energía (o frecuencia) de los fotones. Dado que los exponentes no tienen dimensiones, μ se mide en cm^{-1} o m^{-1} . En la **atenuación** se tiene en cuenta tanto los fenómenos de **absorción** como los de **dispersión**.

Se conoce como **densidad óptica** de un medio a la relación:

$$D = \log[I(0)/I(x)]$$

En muchas **disoluciones** resulta $\mu = \mu'c$, donde c representa la concentración. Por tanto:

$$I(x) = I(0) e^{-\mu'cx} = I(0)10^{-\epsilon cx} \text{ (Ley de LAMBERT-BEER)}$$

y a la densidad óptica se le llama **absorbancia**, resultando:

$$A = \log[I(0)/I(x)] = \epsilon cx$$

recibiendo ϵ el nombre de **coeficiente de extinción**, que es función de la frecuencia de la radiación.

3.2.- ESPECTRO DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Las ondas electromagnéticas se extienden en un amplio intervalo de frecuencias o longitudes de onda y pueden clasificarse según su forma de producción o utilización. Esta clasificación no tiene límites precisos, ya que diferentes formas de producción pueden producir ondas en intervalos de frecuencia que se superpongan.

La clasificación más habitual podría ser la que sigue:

Radiofrecuencia

Generación: Son ondas generadas fundamentalmente por dispositivos electrónicos, principalmente circuitos oscilantes. Sus longitudes de onda van desde algunos kilómetros hasta 0,3 metros; la energía de los fotones va desde casi 0 hasta 10^{-5} eV.

Aplicaciones: Estas ondas se usan en los sistemas de radio y televisión. En Medicina se utilizan en diagnóstico (RM) y en terapia (diatermia y onda corta).

Microondas

Generación: Se generan fundamentalmente con dispositivos electrónicos especiales, y también en ciertas transiciones atómicas y moleculares. Las longitudes de onda están entre 0,3 metros y 10^{-3} metros; la energía de los fotones va desde 10^{-5} hasta 10^{-3} eV aproximadamente.

Aplicaciones: Estas ondas se usan en el radar y otros sistemas de comunicaciones (UHF), así como en análisis químico. También en radarterapia (depósito de calor en el organismo) y en usos domésticos.

Infrarrojo

Generación: Son producidas por cuerpos calientes y algunas transiciones atómicas y moleculares. Las longitudes de onda van de 10^{-3} metros hasta $0,8 \cdot 10^{-6}$ metros; la energía de los fotones va desde 10^{-3} hasta 1,6 eV aproximadamente. Se suele subdividir en tres regiones:

- El infrarrojo lejano, de 10^{-3} a $5 \cdot 10^{-5}$ metros.
- El infrarrojo medio, de $5 \cdot 10^{-5}$ a $2,5 \cdot 10^{-6}$ metros.
- El infrarrojo cercano o próximo, de $2,5 \cdot 10^{-6}$ a $0,8 \cdot 10^{-6}$ m.

Aplicaciones: En la industria de la fotografía, de la seguridad, etc. En Medicina, tanto en diagnóstico (termografía), como en terapia (calor local).

Visible

Generación: Es una estrecha banda de longitudes de onda a las que es sensible nuestra retina. Se produce por átomos y moléculas al desexcitarse. Las longitudes de onda se extienden entre $0,8 \cdot 10^{-6}$ hasta $0,4 \cdot 10^{-6}$ metros; la energía de los fotones entre 1,6 y 3,2 eV, aproximadamente.

Aplicaciones: La luz es tan importante que ha dado lugar al desarrollo de una rama de la Física llamada **Óptica**, que trata de los fenómenos luminosos, la visión y el diseño de instrumentos ópticos. Actualmente el campo de la Óptica se extiende a las zonas del infrarrojo y ultravioleta próximos, por la similitud en su comportamiento con el visible. Las diferentes longitudes de onda producen sensaciones que denominamos colores y que corresponden a los valores del siguiente cuadro:

<u>Color</u>	<u>λ (nm)</u>
Violeta	390-455
Azul	455-492
Verde	492-577
Amarillo	577-597
Naranja	597-622
Rojo	622-780

La sensibilidad del ojo es función de la longitud de onda siendo máxima para longitudes de onda de 555 nm, aproximadamente.

Esta relación entre color y longitud de onda (o frecuencia) da lugar a la denominación de onda monocromática a aquellas que presentan un valor único de longitud de onda o frecuencia.

La visión es la sensación producida por las señales enviadas al cerebro por dos receptores, conos y bastones, que se encuentran en la retina. Los primeros actúan en presencia de luz intensa y son sensibles al color. Los segundos son capaces de actuar con iluminaciones muy débiles y son insensibles al color. La visión debida a los conos se llama fotópica y la debida a los bastones escotópica.

Ultravioleta

Generación: Son producidas por átomos y moléculas fuertemente excitados (por descargas eléctricas, por ejemplo). Se extienden desde $0,4 \cdot 10^{-6}$ hasta $6 \cdot 10^{-10}$ metros, aproximadamente; la energía de los fotones va desde 3,2 eV hasta $2 \cdot 10^3$ eV aproximadamente. El Sol es una fuente importante de radiación ultravioleta que interactúa con átomos y moléculas de la alta atmósfera, produciendo gran cantidad de iones, por lo que se denomina ionosfera.

Aplicaciones: Como su energía es del orden de magnitud de la involucrada en muchas reacciones fotoquímicas, esto explica muchos efectos, como la esterilización por disociación de moléculas en algunos microorganismos y la fuerte oxidación en capas delgadas de materia expuesta a dicha radiación, dado su poco poder de penetración.

Rayos X

Generación: Los rayos X son producidos por las transiciones provocadas al producirse vacantes de electrones en las capas más internas de elementos medios y pesados: Son los Rayos X característicos. También se producen por frenado de electrones al incidir con gran energía sobre un blanco.

Abarca una gama de longitud de onda entre 10^{-9} y 10^{-13} metros; la energía de los fotones desde 10^3 a 10^7 eV, aproximadamente.

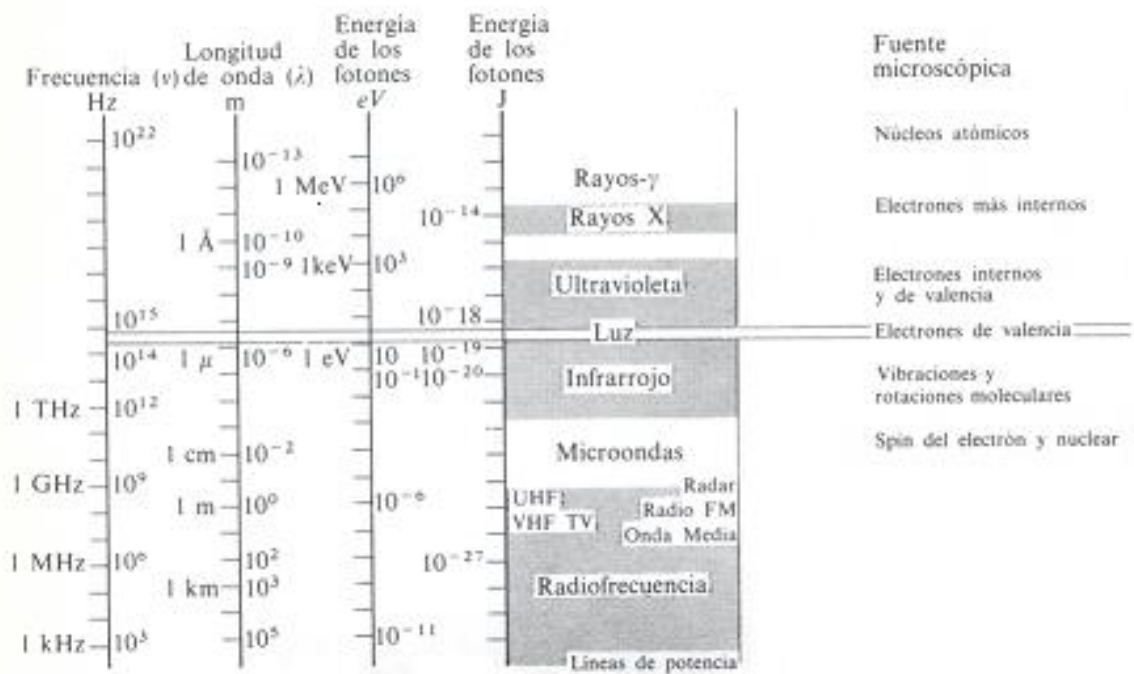
Aplicaciones: Los rayos X se utilizan en diagnóstico, tanto médico como industrial. También en radioterapia dado su carácter ionizante.

Rayos Gamma

Generación: Son de origen nuclear y se superponen con la parte superior del espectro de rayos X. Sus longitudes de onda van desde 10^{-10} a 10^{-13} metros; la energía de los fotones desde 10^4 a 10^7 eV, aproximadamente.

Aplicaciones: Los rayos gamma se utilizan tanto en diagnóstico médico (Medicina Nuclear) como en radioterapia, al igual que los rayos X.

Por último podemos decir que la capacidad de penetración de la radiación en la materia varía con la frecuencia. En general, disminuye desde la radiofrecuencia al ultravioleta para aumentar de manera espectacular con los rayos X y gamma.



LECCIÓN 4: ESTRUCTURA ATÓMICA

4.1.- NIVELES ENERGÉTICOS ATÓMICOS. ENERGÍA DE LIGADURA

Los **modelos atómicos** nacen históricamente basados en la capacidad de dar explicación de algunos fenómenos ya conocidos; en particular, uno de los más interesantes era el origen y la intensidad de las **líneas espectrales** que pueden emitir los átomos.

Supongamos un gas a baja presión (enrarecido). Los átomos o moléculas que lo constituyen se encuentran tan separados unos de otros, que las únicas interacciones entre ellos se deben a los choques que se producen por la agitación térmica. En estas circunstancias parece lógico que la radiación emitida sea característica de los átomos o moléculas del gas. Para que se produzca esta emisión es necesario **excitar** el gas, lo que se puede hacer mediante una descarga eléctrica a través del mismo, con lo que emite una radiación que contiene únicamente unas determinadas longitudes de onda o frecuencias. Si hacemos que la radiación pase por un elemento dispersor y que impresione una placa fotográfica o cualquier otro elemento detector, podremos observar lo que se conoce como **espectro de emisión**. Este espectro está constituido por unas **líneas**, ordenadas según la frecuencia, que son **características de cada especie atómica**. Las radiaciones de las lámparas de sodio (luz anaranjada) y de mercurio (luz azulada) son ejemplos prácticos de estas emisiones.

En 1913, Niels Bohr desarrolla un primer modelo para el átomo de hidrógeno, que logra explicar las líneas espectrales del mismo.

Bohr propone dos hipótesis:

- 1) Los electrones en la corteza describen órbitas estables alrededor del núcleo bajo la acción de la fuerza eléctrica entre el protón del núcleo y el electrón. En ellas la energía total $E = E_c + E_p < 0$.
- 2) Las órbitas posibles (estacionarias) son aquellas en las que el momento angular es un múltiplo entero (n) de

$$h / 2\pi = \eta$$

De estas ideas resulta que la energía de las órbitas permitidas vale:

$$E_n = \frac{-k}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

El nivel mas bajo de energía $E_1 = -k = -21,76 \cdot 10^{-19} \text{ J} = -13,6 \text{ eV}$ se conoce con el nombre de **estado fundamental** y a los demás como **estados excitados**.

En un átomo excitado, es decir, que no se encuentra en el estado más bajo de energía, un electrón de un nivel superior de energía tiende a caer a otro más bajo, esta pérdida de energía, en muchas ocasiones, se emite en forma de un fotón y las energías de éstos vendrán dadas por

$$h\nu = E_i - E_f = k \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Esta expresión permitió calcular las líneas del espectro del hidrógeno, que eran conocidas desde el siglo XIX y para las que se habían propuesto fórmulas empíricas análogas a la obtenida por Bohr. La llamada serie de Balmer ($n_f = 2$), que cae en el visible fue la primera en ser estudiada por dicho autor en 1885.

A pesar de este éxito, pronto la teoría de Bohr se mostró insuficiente. No podía explicar los espectros de átomos con más de un electrón, ni las diferentes intensidades de las líneas, ni sobre todo cómo los átomos interaccionan para dar moléculas o estructuras incluso macroscópicas (cristales) con las propiedades que se observan. Por lo dicho, pronto se vio la necesidad de una nueva descripción de los fenómenos atómicos que se desarrolló entre 1925 y 1926 por Schrödinger, Heisenberg y otros, y que conocemos como **mecánica cuántica**.

Aplicada al átomo de hidrógeno nos permite obtener los siguientes resultados:

- 1) La **energía** de los electrones si es positiva (electrón libre) puede tener cualquier valor, pero si es negativa (estados ligados) toma solamente los valores:

$$E_n = \frac{-k}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

n es el **número cuántico principal** o de la energía.

Esta energía se conoce como **energía de ligadura**, ya que sería la energía mínima necesaria para extraer el electrón del edificio atómico.

- 2) El **momento angular orbital**, está cuantificado por:

$$l = 0, 1, \dots (n-1)$$

Se acostumbra a designar los estados de momento angular con las letras s, p, d, ..., según los valores crecientes de l que recibe el nombre de **número cuántico orbital**. su orientación está cuantificada por m_l , conocido como **número cuántico magnético**, pudiendo variar desde l a $-l$ de una en una unidad.

- 3) El **momento angular intrínseco o de spin**, está cuantificado por el número cuántico s , con valor $1/2$, y su orientación está cuantificada por m_s con $m_s = \pm 1/2$, siendo s el **número cuántico de spin** y m_s el de **orientación del spin**.

Debido a la rotación del electrón, con momento angular l , se crea un campomagnético proporcional a l . El spin s supone la existencia de un momento magnético propio, es decir, el electrón se comporta como un pequeño imán y adquiere una energía proporcional al producto $l \cdot s$, pero como s sólo puede tener dos orientaciones posibles respecto a l , la interacción spin-órbita desdobra cada nivel de energía en dos, muy próximos, excepto en el caso $l = 0$.

Así podemos definir un nuevo número cuántico $j = |l \pm s|$, conocido como del **momento angular total**. Un nivel corresponde a l y s “paralelos” o spin hacia arriba ($j = l + 1/2$) y el otro a l y s “antiparalelos” o spin hacia abajo ($j = l - 1/2$).

Hasta ahora hemos establecido resultados aplicables a átomos con un electrón, es decir, el de hidrógeno y también ciertos iones con un solo electrón, los que se suelen llamar átomos hidrogenoides.

El estudio de átomos con más de un electrón se complica extraordinariamente ya que el movimiento de un electrón no sólo está influido por la carga del núcleo, sino también por la acción del resto de sus compañeros en la corteza. Digamos que el problema del átomo con varios electrones no puede resolverse exactamente, por lo que se hacen aproximaciones. La más sencilla es suponer que cada electrón se mueve bajo la acción del campo eléctrico atractivo producido por el núcleo y el promedio del campo repulsivo debido a los demás electrones. En este caso el estado de cada electrón se puede describir por medio de los números cuánticos $\{n, l, m_l \text{ y } m_s\}$.

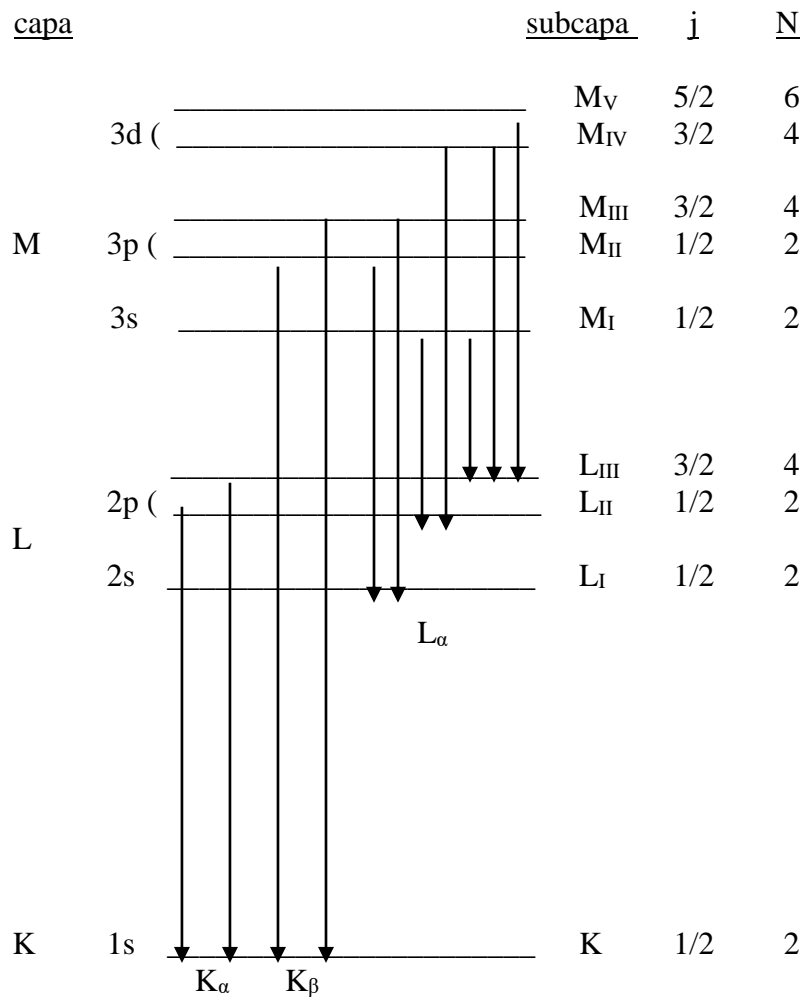
En 1925 **Pauli** estudiando las regularidades del sistema periódico y las de los espectros, llega a un principio, que en el modelo de partículas independientes, se conoce con el nombre de **principio de exclusión** y se puede expresar así: **dos electrones en un átomo no pueden tener el mismo conjunto de números cuánticos**.

En las capas internas y completas los niveles energéticos corresponden, en primera aproximación, a los electrones con el mismo n , así:

$$\begin{aligned} n &\rightarrow 1, 2, 3, 4, \dots \\ \text{capa} &\rightarrow K, L, M, N, \dots \end{aligned}$$

Estas capas agrupan **subcapas** que se caracterizan por l y j y cuyo **número de ocupación** N viene dado por $2j + 1$.

El número máximo de electrones en cada subcapa viene dado por su **número de ocupación**: $N = 2(2l+1)$, que son las combinaciones posibles de m_l y m_s , de acuerdo con el principio de exclusión.



4.2.- EXCITACIONES E IONIZACIONES

El átomo, como todos los sistemas físicos, tienden a la menor energía potencial posible, que se corresponde con su **estado fundamental**. El resto de estados posibles reciben el nombre de **estados excitados**. La excitación exige absorción de energía desde el estado fundamental o desde otro estado menos excitado.

La existencia de estas transiciones está corroborada por muchos experimentos. Cualquier aporte de energía suficiente al átomo, que le permita pasar a un estado de energía superior supone una **excitación** del mismo. Este aporte se puede hacer de muchas formas: mediante fotones, colisiones con partículas, colisiones con otros átomos o moléculas por agitación térmica, etc.

Si la energía transferida es mayor que la energía de ligadura se produce la emisión de un electrón del átomo, se trata de la **ionización** del mismo, quedando un átomo ionizado o ión y un electrón libre de la ligadura al mismo.

4.3.- DESEXCITACIÓN: TRANSICIONES ATÓMICAS

Ya hemos indicado que cuando un átomo está excitado normalmente se desexcita emitiendo energía. Si la desexcitación es radiativa, la energía de los fotones vale: $h\nu = E_i - E_f$, siendo E_i y E_f las energías de los estados inicial (más excitado) y final (menos excitado o fundamental).

Teniendo en cuenta que las energías de los estados ligados es negativa, en muchas ocasiones se utilizan los valores absolutos de las mismas, de modo que:

$$h\nu = |E_f| - |E_i|$$

Por otra parte, hay que hacer notar que **no** todas las transiciones son posibles. Dado que la mayor parte de las emisiones tienen carácter dipolar eléctrico, para el modelo de partículas independientes sólo están permitidas aquellas que cumplen las siguientes **reglas de selección**:

$$\Delta n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\Delta l = \pm 1$$

$$\Delta j = 0, \pm 1$$

4.4.- RAYOS X CARACTERÍSTICOS

Cuando se produce una vacante en una capa interna y completa, los electrones menos ligados (de capas superiores) tienden a ocupar la vacante dando lugar a la emisión de fotones conocidos como **rayos X característicos**.

Como la energía de ligadura de los electrones en cada capa o subcapa es función fundamentalmente del número de protones del núcleo, los fotones que se emitan serán *característicos* de cada elemento químico, lo que nos permitirá diferenciar el tipo de átomos que los emiten, aunque formen parte de moléculas distintas, dado que las capas internas y completas no participan en los enlaces.

La denominación de estos fotones se hace atendiendo a la capa en la que se produce el hueco y la de procedencia del electrón que lo ocupa. Así, si un hueco de la capa K se cubre con electrones de L_{II} ó L_{III} (desde L_I la transición está prohibida) se habla de rayos X del tipo $K\alpha$; Si los electrones proceden de M_{II} y M_{III} serán rayos X $K\beta$; y así sucesivamente.

LECCIÓN 5: EL LASER

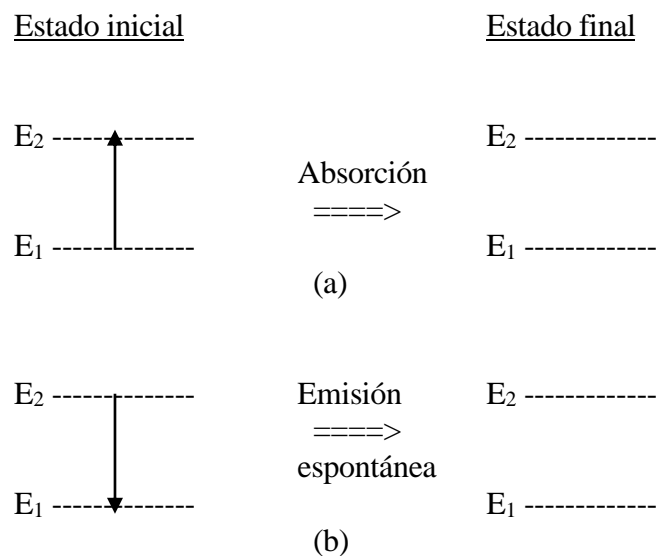
5.1.- EMISIÓN ESTIMULADA DE RADIACIÓN

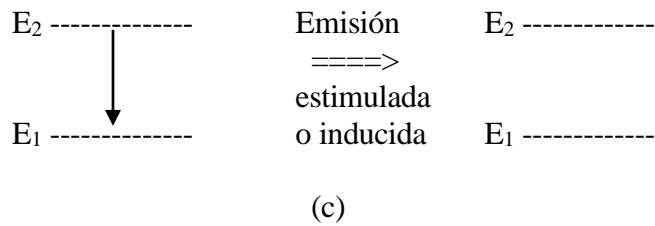
Las siglas **LASER** corresponden al acrónimo de **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Dos ideas básicas están involucradas en esta frase: La emisión estimulada (o inducida) y la amplificación.

Las fuentes de luz convencionales se caracterizan por emitir bien un espectro continuo, bien un espectro discreto. En cualquier caso emiten ondas luminosas de diferentes longitudes de onda o frecuencia. Estos espectros difieren enormemente del correspondiente a una fuente láser que presenta una banda de emisión muy estrecha, es decir, emite en un pequeño intervalo de longitudes de onda. Esta diferencia es consecuencia de los mecanismos que a nivel atómico caracterizan los procesos de emisión.

Sabemos que en un sistema atómico o molecular que presente dos niveles de energía, uno más bajo de energía E_1 y otro más alto de energía E_2 , cuando llega un fotón de energía (E_2-E_1) se puede excitar de E_1 a E_2 por absorción del fotón (Figura a). Se trata, pues, de una **absorción** resonante o **inducida**.

Por el contrario, cuando el sistema se encuentra en E_2 puede desexcitarse, pasando a E_1 , con **emisión** de un fotón de energía E_2-E_1 , de forma **espontánea** y aleatoria en el tiempo y en el espacio (b), o bien, por **emisión inducida** por otro fotón de la misma energía, resultando dos fotones idénticos (c), que además están en fase y con la misma polarización, sumando sus ondas de forma constructiva.





5.2.- BOMBEO E INVERSIÓN DE POBLACIÓN. NIVELES METASTABLES

Veamos las condiciones que se deben cumplir para que la emisión inducida predomine sobre los otros dos fenómenos, lo que nos llevará a las condiciones de diseño de los láseres.

Si suponemos un recinto cerrado en el que exista radiación en equilibrio térmico con las paredes, la radiación es absorbida y emitida por los átomos de las paredes en la misma proporción. Si suponemos que existen N_1 átomos en el estado E_1 y N_2 en el estado E_2 , la termodinámica estadística (Boltzmann) nos da para el cociente de poblaciones:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-h\nu/kT}; \text{ con } h\nu = E_2 - E_1$$

La probabilidad de absorción por unidad de tiempo será proporcional al número de átomos en E_1 (N_1) y a la densidad de energía de la radiación de frecuencia ν (ρ_ν). Por tanto, la probabilidad (R_{12}) valdrá:

$$R_{12} = B_{12} N_1 \rho_\nu$$

siendo B_{12} el coeficiente de absorción para la transición $E_1 \rightarrow E_2$

La probabilidad de emisión tendrá dos componentes, una de emisión espontánea, ligada al tiempo de vida medio del estado excitado y al número de átomos en E_2 (N_2), y otra de emisión inducida proporcional a N_2 y a ρ_ν , resultando:

$$R_{21} = A_{21} N_2 + B_{21} N_2 \rho_\nu$$

En el equilibrio, $R_{12} = R_{21}$, o sea

$$A_{21} N_2 + B_{21} N_2 \rho_\nu = B_{12} N_1 \rho_\nu$$

es decir:

$$\rho_\nu = \frac{A_{21} N_2}{B_{12} N_1 - B_{21} N_2} = \frac{A_{21} / B_{12}}{N_1/N_2 - B_{21}/B_{12}};$$

por tanto:

$$\rho_\nu = \frac{A_{21} / B_{12}}{e^{h\nu/kT} - B_{21} / B_{12}},$$

que si suponemos que las probabilidades de emisión espontánea y de absorción son iguales, $B_{12} = B_{21}$. En esta situación de equilibrio resulta:

$$\frac{A_{21}}{B_{21}\rho_\nu} = \frac{\text{Prob. de emisión espontánea}}{\text{Prob. de emisión inducida}} = e^{h\nu/kT} - 1,$$

Que sólo será pequeña (como interesa en el láser) si $h\nu \ll kT$, lo que ocurre en el rango de las microondas, pero no del visible.

Por otra parte, si consideramos el sistema fuera del equilibrio:

$$\frac{\text{Tasa de emisión}}{\text{Tasa de absorción}} = \frac{(A_{21} + B_{21}\rho_\nu) N_2}{B_{12} N_1 \rho_\nu} = \left(\frac{A_{21}}{B_{12}\rho_\nu} + 1 \right) \frac{N_2}{N_1}$$

Para conseguir una alta tasa de emisión habría que hacer $N_2 \gg N_1$, es decir **invertir la población**, lo que nos obliga a **bombear** constantemente átomos al nivel excitado, y, para favorecer la emisión estimulada sobre la espontánea buscar materiales con niveles energéticos de larga vida media, **nivel metastable** o **láser** (con A_{21} pequeño) y mantener una alta densidad de radiación ρ_ν en el medio.

Para obtener la inversión de población se usan diversos métodos de aporte energético al medio, tales como fotones (bombeo óptico), colisiones de electrones y de iones en gases, energía de reacciones químicas, inyección de portadores en semiconductores, etc.

El bombeo no se suele realizar directamente de E_1 a E_2 , sino a través de otros estados auxiliares. Por ejemplo en el láser de rubí (de tres niveles) se bombea desde el estado fundamental E_1 (con fotones de 2,2 eV) hasta un estado E_3 , del que decae a E_2 (nivel láser), con una transición no radiativa, para producir, por último, la transición láser de E_2 a E_1 , con emisión de fotones de 1,8 eV.

5.3.- EL LASER

Para favorecer la alta densidad de radiación de frecuencia ν , se usan **cavidades resonantes**, como el dispositivo interferométrico de Fabry-Perot, constituido por dos espejos esféricos o planos, cuya función es que las ondas de la emisión láser se reflejen continuamente en ellos, de forma que se formen ondas estacionarias de frecuencia ν , de forma estable, que saldrán finalmente a través de uno de los espejos de carácter semitransparente.

Esta configuración garantiza la direccionalidad y amplificación de la radiación. Al mismo tiempo, la cavidad resonante selecciona las longitudes de onda o frecuencias de los fotones que van a constituir el haz láser, así como las posibles distribuciones de energía en el propio haz.

En el caso de los láseres, como los átomos radian en fase (coherencia), la amplitud de la onda resultante es la suma de amplitudes:

$$A_T = N \times A_1$$

y como las intensidades son proporcionales a los cuadrados de las amplitudes, resulta,

$$I_T = N^2 \times I_1$$

dando lugar a haces coherentes, de alta intensidad y muy direccionales.

Por el contrario, en las fuentes incoherentes,

$$I_T = N \times I_1$$

lo que ocurre en la mayoría de las fuentes de luz.

5.4.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS LÁSERES

Los parámetros que caracterizan al haz emitido por una fuente láser son:

- **Modo de operación** del láser: los láseres pueden operar en modo **pulsado** o **continuo**, dependiendo de que la potencia emitida por el láser dependa o no del tiempo.
- **Longitud de onda.**
- **Diámetro** del haz..
- **Irradiancia** (W/m^2).
- **Potencia** media y de pico.
- **Divergencia:** aumento del diámetro del haz con la distancia.

LECCIÓN 6: EL LASER EN MEDICINA

6.1.- TIPOS DE LÁSERES

Se pueden clasificar de diferentes maneras atendiendo a las diversas características de los mismos. Una clasificación típica se realiza en función del estado físico del material, así tendríamos:

A) SÓLIDOS:

1) **Láser de rubí** (Al_2O_3 , con impurezas de Cr), que funciona como un láser de tres niveles, por excitación óptica de los átomos de Cr, que presentan un nivel metastable o de larga duración para la emisión espontánea.

2) Dentro de este grupo encontramos los de **Neodimio**, entre los cuales el más utilizado es el de **Nd-YAG**, que consiste en un cristal **Granate de Ytrio y Aluminio** ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, con impurezas de Nd), que funciona como un láser de cuatro niveles. Como el de rubí, utiliza bombeo óptico y puede emitir en forma pulsada o continua, según la forma de operación de la fuente de luz excitadora.

3) **Los láseres de semiconductor** están constituidos por una unión P-N polarizada directa, y el bombeo se realiza por una fuerte inyección de portadores.

B) DE GAS:

1) **Láser de He-Ne**, el medio activo es una mezcla de ambos en proporción variable. Los electrones de una descarga eléctrica colisionan con los átomos de He que son excitados. Estos por colisión inelástica transfieren su energía a los de Ne, que presentan tres transiciones láser, dos en el IR y una en el visible (luz roja de 632,8 nm).

2) **De CO_2** , el medio activo es CO_2 que se excita por colisiones electrónicas o por transferencia resonante de energía desde la molécula de N_2 , en mezclas $\text{CO}_2\text{-N}_2$, excitadas eléctricamente. Los niveles en juego son los de rotación-vibración de la molécula de CO_2 .

3) **De argón**, conocido como de tipo iónico, ya que el medio activo es el gas a baja presión, que por descargas eléctricas se ioniza.

4) **De excímeros**, láseres del ultravioleta cuyo medio activo son dímeros excitados. Utilizan una combinación de un gas noble con otro, también noble o halógeno, creando una molécula que solo existe en estado excitado (Ar_2^* , XeCl, XeF, ArF), ya que al desexcitarse se disocia de nuevo en dos átomos no enlazados.

C) LÍQUIDOS:

De colorante. Es un láser que usa un colorante orgánico como medio activo, disuelto en un disolvente orgánico, normalmente un alcohol. Su característica más interesante es la emisión en banda ancha, que puede ser sintonizado en una banda estrecha. La excitación se realiza por medio óptico, usualmente otro láser.

6.2.- EFECTOS BIOLÓGICOS. APLICACIONES EN MEDICINA

Los fotones generados por las fuentes láser no tienen energía suficiente para ionizar los átomos del medio material, con el cual interactúan. En este sentido la radiación láser está clasificada dentro de lo que se denomina “radiaciones no ionizantes”. Cuando un haz láser interactúa con un medio material, los fenómenos que pueden tener lugar son:

- Reflexión en la superficie del medio.
- Absorción de la radiación láser.
- Esparcimiento o dispersión (scattering) de luz.

Estos fenómenos dependen de la longitud de onda a la que emite el láser y de las características superficiales y espectrales del medio material.

Desde un punto de vista físico, los efectos biológicos que pueden aparecer como consecuencia de la absorción de la luz láser son:

- Efecto térmico.
- Efecto fotoquímico.
- Efecto termoacústico.

Todos ellos dependen, en mayor o menor grado, de los valores de los parámetros característicos del haz.

El láser fue utilizado por primera vez en Medicina en 1966 en California, donde se realizaron operaciones de ojo con un láser de CO₂. A partir de esta fecha, el uso del láser en Medicina ha ido extendiéndose a diversos campos, con resultados de gran interés.

Las aplicaciones específicas del láser en Medicina pueden ser agrupadas en tres grandes áreas: diagnóstico, cirugía y terapia.

El uso del **láser en diagnóstico** está todavía en fase de investigación y desarrollo. El efecto Doppler con luz láser se aplica para el estudio del flujo sanguíneo en la retina, permitiendo detectar hipertensión, la existencia de vasos obstruidos, etc.

Sin lugar a dudas las **aplicaciones quirúrgicas del láser** son las más importantes y las que han tenido un desarrollo más vertiginoso. El láser quirúrgico se utiliza básicamente en dos formas distintas.

La primera, como fuente de calor para coagular tejidos. La segunda, vaporizando tejidos, lo que permite eliminar volumen de tejido o –si la zona vaporizada es muy estrecha- cortar el tejido por retracción.

Los tipos de láser utilizados varían en función de la aplicación. Para coagulación de tejidos se puede utilizar el láser de argón y el de colorante ya que las longitudes de onda en que emiten estos láseres son absorbidas bien por la sangre y por algunos pigmentos. Cuando lo que se pretende es vaporizar, es más interesante el uso del láser de CO₂, ya que su longitud de onda es absorbida específicamente por el agua que es un componente muy abundante de la mayoría de los tejidos. En la cirugía ocular se usa sobre todo el láser de excímeros.

Las ventajas que ofrece la utilización del láser en cirugía son debidas fundamentalmente a tres características del mismo:

- a) La luz láser puede ser focalizada en áreas muy pequeñas (spots) y manipulada por medio de espejos mientras es observada a través de microscopios. Esto tiene como consecuencia un alto grado de control que permite eliminar tejidos o realizar coagulaciones de forma muy precisa.
- b) El láser, debido a su capacidad de evaporar tejidos, tiende a cerrar los vasos. Esta propiedad hemostática reduce significativamente las pérdidas de sangre.
- c) La última característica importante que presenta el láser en cirugía es su naturaleza no traumática.

Las áreas quirúrgicas en las cuales se utiliza de forma frecuente el láser son: oftalmología (corrección de ametropías, operaciones de desprendimiento de retina, cataratas y glaucoma), cirugía plástica, microcirugía (eliminación de tumores o papilomas en cuerdas vocales...), neurocirugía, otorrinolaringología y ginecología. El acceso a zonas internas del organismo se realiza a través de fibras ópticas.

En la actualidad **el láser de CO₂** está siendo utilizado **en terapia**, para lo cual el haz es expandido mediante sistemas ópticos radiando áreas extensas. Esto se aplica en rehabilitación, en la curación de artrosis y regeneración de tejidos. Los láseres de colorantes también están siendo utilizados en terapia de cáncer, aprovechando la posibilidad que presentan estos láseres de emitir en diversas frecuencias dentro del visible, lo cuál permite seleccionar aquellas que son absorbidas por determinadas células del tejido canceroso.

Estas son algunas de las aplicaciones que en la actualidad se hacen de la radiación láser. Existen muchas más y las investigaciones que se están desarrollando permitirán ampliar el campo de aplicaciones.

6.3.- SEGURIDAD FRENTE AL LÁSER

El láser es más peligroso que otras fuentes de luz, por su alta densidad de potencia en un haz colimado, para el que no rige la disminución con el cuadrado de la distancia. Por otra parte el ojo como sistema convergente actúa concentrando dicha energía, en un factor del orden de 500. Como ejemplo digamos que un láser He-Ne de 5 mW, como los usados en los laboratorios, produce una irradiancia unas mil veces mayor que la del Sol.

La peligrosidad de la radiación láser depende de su potencia, de la longitud de onda en la que emite, de los tiempos de exposición con los que opera y de otras características relativas al propio haz láser (diámetro, en caso de ser pulsado: duración del pulso, potencia del pulso, etc.). Los posibles mecanismos por los cuales la radiación láser puede producir daños son esencialmente de tipo térmico, termo-acústico y fotoquímico.

El proceso **térmico** origina una desnaturalización de las proteínas presentes en los tejidos como consecuencia del aumento de temperatura que se produce cuando la radiación es absorbida. Este tipo de daños lo producen la mayor parte de los láseres (longitudes de onda comprendidas entre el ultravioleta, 0,315 μm , hasta el IR lejano) y que operan con tiempos de exposición superiores a 10 microsegundos.

Los procesos o reacciones **fotoquímicas** están asociados con láseres que emiten en el ultravioleta o con longitudes de onda del espectro visible comprendidas entre 0,4 y 0,55 μm siempre que los tiempos de exposición sean altos.

Los mecanismos de tipo **termo-acústico** aparecen básicamente cuando los láseres emiten en forma pulsada y las potencias de los pulsos son muy altas. En este último caso, se produce un calentamiento muy rápido de la zona irradiada provocando la aparición de ondas acústicas que originan la ruptura de células.

Los órganos críticos son la piel y el ojo. El primero de ellos debido a su gran superficie que hace que este tejido sea muy accesible a la radiación. El segundo debido a que absorbe la radiación emitida por la mayor parte de los láseres. Así, el ojo focaliza la radiación perteneciente al visible y el infrarrojo próximo sobre la retina en un área de dimensiones muy pequeñas. La intensidad en esa zona es altísima pudiendo producir efectos térmicos y/o fotoquímicos que dan lugar a quemaduras y a una pérdida de visión temporal o crónica. La córnea y el cristalino absorben la radiación láser perteneciente al ultravioleta y al infrarrojo lejano que puede resultar en la aparición de cataratas y también de quemaduras.

En función de los posibles daños que pueden aparecer como consecuencia de la exposición a la radiación láser, se establece una magnitud denominada *Exposición Máxima Permitida*, que indica el nivel de la radiación láser para el cuál, en circunstancias normales, el ojo y la piel pueden irradiarse sin producir efectos nocivos.

Por ello se ha establecido una clasificación de los láseres en cuatro clases, a saber:

Clase 1: Láseres seguros, que operan en sistemas cerrados o que no emiten en niveles peligrosos.

Clase 2: Láseres que emiten en el visible con baja potencia (<1 mW), y que son seguros para la visión momentánea del haz (0,25 s, que es el tiempo que tarda el ojo en parpadear tras un deslumbramiento).

Clase 3: Láseres que no son seguros ni en el caso de visión momentánea. Deben usarse bajo controles y equipos de protección.

Clase 4: Láseres peligrosos, que pueden producir daño incluso por la radiación difusa.

Las medidas de seguridad que deben tomar los usuarios de equipos de láser en aplicaciones médicas son, en términos generales:

- a) El láser no debe ser encendido hasta que no esté correctamente dirigido a la zona donde se va a aplicar el tratamiento.

- b) Todo el personal debe utilizar gafas protectoras. Estas últimas deben estar correctamente etiquetadas indicando las longitudes de onda para las que son adecuadas. Los ojos de los pacientes deben estar protegidos siempre que la zona a irradiar esté próxima a estos órganos.
- c) Cuando se utilizan láseres de la Clase 4, debe evitarse la presencia en la sala de materiales inflamables.

En el cuadro adjunto se establece una comparación entre los distintos tipos de láseres más utilizados y la clasificación de los mismos en orden a su peligrosidad. Obsérvese que los láseres que emiten en el infrarrojo no poseen clase 2, como es lógico. Los datos que aparecen en la tabla representan valores y condiciones de operación típicas.

LASER	Longitud de onda (μm)	Potencia/Energía típicas	Forma de emisión	clase	Transporte del haz	Diámetro del haz focalizado
He-Ne	0,63	< 3 mW	Continua	1,2,3	Fibra óptica o espejos	<1 mm
Arseniuro De Galio	0,85 0,90	5 mW	Pulsada y Continua	3	Haz directo o fibra óptica	> 1 mm
Ión Ar	0,48 0,51	3 – 10 W	Continua y Pulsada	4	Fibra óptica	0,1 – 1 mm
Ión Kr	0,53 0,57 0,65 0,68	1 W	Continua y Pulsada	4	Fibra óptica	0,1 – 0,5 mm
Nd-YAG	1,06	70 W	Continua y Pulsada	4	Fibra óptica	0,1 – 2 mm
CO ₂	10,6	3 – 40 W	Continua y Pulsada	4	Espejos	0,1 – 2 μm
Colorante	0,59 0,63	60 – 200 mJ	Pulsada	4	Espejos Lentes	250 μm