



Estos pretenden ser unos apuntes de resumen solamente de teoría, ver ejercicios en www.fiquipedia.es.

Se trata el bloque de 2º Bachillerato LOMCE “Ondas” que se implanta en el curso 2016-2017, cubriendo contenidos, y a veces citando criterios de evaluación y estándares de aprendizaje evaluables.

Parte de los contenidos del bloque “Ondas” se tratan en apuntes aparte de movimiento ondulatorio; aquí se tratan algunos fenómenos ondulatorios que es habitual tratar con luz, y mi planteamiento es verlos tras ver electromagnetismo, usando la idea de onda electromagnética, y antes de ver óptica geométrica; uniendo esos apuntes se ve completo el bloque de ondas tal y como lo plantea LOMCE.

La separación entre óptica física y óptica geométrica es un criterio personal:

Óptica física: realiza el estudio de los fenómenos luminosos tratando la naturaleza de la luz, onda/partícula

- Enlaza con bloque movimiento ondulatorio y conceptos mencionados en él: Principio Huygens, difracción, polarización, interferencias (depende diferencia fase, constructiva, destructiva), principio de superposición
- Enlaza con bloque electromagnetismo: la luz es una onda electromagnética donde oscilan E y B perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación, lo que explica fenómenos como la polarización.
- Se cumplen leyes reflexión y refracción de Snell, que manejan ángulos, no se manejan posiciones.
- En algunos fenómenos como reflexión y refracción se usa el concepto de rayo como en óptica geométrica, pero se diferencia en que también estudia fenómenos que requieren comprender la naturaleza de la luz, como la polarización, la difracción, la energía y la **interacción con la materia**: dispersión y absorción.
- Si se maneja el carácter ondulatorio de la luz, ya que los objetos son de tamaño comparable a la longitud de onda, o se tratan cambios de medio contemplando al mismo tiempo el cambio en dirección de propagación del rayo y cambios en la onda (velocidad de propagación, longitud de onda)

1. Controversia histórica sobre la naturaleza de la luz

Primeras teorías eran corpusculares (Grecia, Alhazen). A finales sXVII había dos teorías: corpuscular (Newton), y ondulatoria (Huygens y Hooke), pero renombre de Newton, sombras nítidas y “necesidad” éter hacía que mayoría estuviese a favor corpuscular, aunque ondulatoria explicaba el cruce de haces sin perturbarse y la refracción como cambio de velocidad en el cambio de medio.

En siglo XIX se acepta mayoritariamente la teoría ondulatoria:

-Experimento doble rendija de Young, confirma difracción e interferencias, estima λ y f luz visible.

-Experimento punto luminoso de Arago/Poisson

-Fizeau/Foucault miden velocidad de la luz en medios densos, y confirman que va más despacio en el agua.

La velocidad de la luz había sido medida por primera vez por Rømer en 1676 con eclipses Io sobre Júpiter.

-Maxwell en 1865 unifica electricidad, magnetismo y óptica mostrando que la luz es una onda e indica algunas propiedades: reflexión metales, refracción, y velocidad en vacío es la de la luz.

En siglo XX surge de nuevo teoría corpuscular para explicar ciertos experimentos: radiación cuerpo negro, efecto fotoeléctrico, y efecto Compton, lo que lleva a la doble naturaleza de la luz.

1.1 Modelos corpuscular y ondulatorio

-**Corpuscular:** reflexión como choques elásticos de estas partículas, efecto fotoeléctrico debido a partículas con cierta cantidad de energía $E = hf$ siendo h la constante de Planck ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s).

-**Ondulatoria:** onda electromagnética con velocidad de propagación en el vacío c .

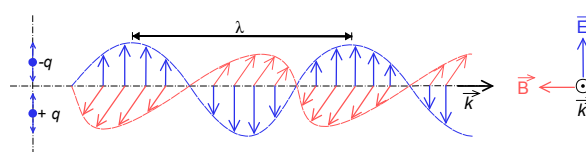
Se producen fenómenos ondulatorios como difracción que muestran que tiene una λ muy pequeña (ver apartado de espectro). Sin tener en cuenta el carácter ondulatorio, se puede estudiar su propagación rectilínea usando el concepto de rayo, que enlaza con la óptica geométrica.

-**Doble naturaleza:** no es ni una cosa ni otra/ es ambas cosas al tiempo; es algo que no tenemos palabras para describir lo que es, y que se comporta de una manera u otra según el experimento. Enlaza con física moderna, dualidad onda-corpúsculo y De Broglie para otras partículas.

2. Ondas electromagnéticas. Naturaleza y propiedades

En las ondas electromagnéticas se propagan campos E y B perpendiculares entre sí y a dirección de propagación.

No necesitan un medio material para propagarse, pueden propagarse en el vacío. Las magnitudes que la definen son las generales de una onda (A , f , λ , velocidad de propagación), y como propiedades se pueden citar la su energía y variación de esta con propagación y atenuación, y citar los distintos fenómenos ondulatorios, como interferencia, difracción, refracción (y reflexión total), reflexión, polarización y Doppler.



Onda electromagnética con vectores E, B y polarización lineal.
SuperManu, cc-by-sa

atenuación, y citar los distintos fenómenos ondulatorios, como interferencia, difracción, refracción (y reflexión total), reflexión, polarización y Doppler.



3. Variación de la velocidad de la luz con el medio. Índice de refracción

La velocidad propagación de la luz en el vacío es máxima (c), y tiene velocidades menores en otros medios. Se define índice de refracción absoluto de un medio material el cociente entre c y la velocidad en ese medio, de modo que siempre es mayor que 1.

Si un medio tiene mayor índice de refracción que otro se dice que es más refringente.

Normalmente se da índice de refracción de un medio, no índice de refracción de medio y frecuencia / longitud de onda, ya que no se tiene en cuenta el fenómeno de **dispersión** por el cual la velocidad varía con la frecuencia en ciertos medios.

$c = \lambda_0 f$; $\lambda = \frac{c}{nf}$; $n = \frac{\lambda_0}{\lambda}$; $n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2$ La frecuencia no depende del medio, sólo de la fuente, por lo que en el medio varía velocidad y longitud de onda. El índice de refracción absoluto depende de la longitud de onda, y la longitud de onda siempre es menor que en el vacío.

4. Fenómenos producidos con el cambio de medio

4.1 Reflexión y refracción. Leyes de Snell

Cuando la luz llega a la separación entre dos medios, parte vuelve con la misma velocidad (reflexión) y parte pasa al otro medio cambiando de dirección y velocidad (refracción).

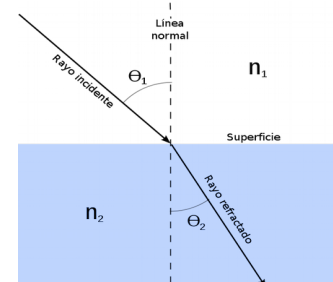
Importante: en leyes los ángulos siempre se toman respecto a la normal

Reflexión: Leyes de Snell de la reflexión:

- 1ª Rayo incidente, normal y rayo reflejado en el mismo plano.
- 2ª Ángulo de incidencia igual a ángulo de reflexión.

Refracción: Leyes de Snell de la refracción

- 1ª Rayo incidente, normal y rayo refractado en el mismo plano.
- 2ª $\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$; $\sin(\theta_1)n_1 = \sin(\theta_2)n_2$



Wikimedia, Josell7, cc-by-sa

El rayo incidente va desde el medio 1 al medio 2 donde sale refractado.

Interpretación práctica 2ª ley: si la luz pasa a un medio donde la velocidad es mayor, se aleja de la normal, y si pasa a un medio donde la velocidad es menor, se acerca a la normal.

4.2 Reflexión total

Cuando la luz pasa a un medio menos refringente, el ángulo de refracción se puede alejar tanto de la normal que el rayo no pasa al medio menos refringente.

Ángulo límite o crítico es el ángulo de incidencia al que le corresponde ángulo de refracción de 90°

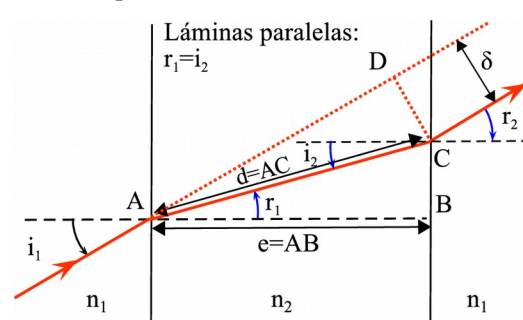
$$\frac{\sin \theta_c}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \theta_c = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Reflexión total (o interna total) es el fenómeno de refracción por el cual el rayo vuelve al medio de origen. Se llama reflexión por eso y porque el

ángulo de reflexión es igual al incidente, no cumple leyes de refracción (para ángulos mayores al límite la segunda ley de Snell de refracción no se cumple, da una inconsistencia)

Casos particulares de refracción: para algunos se pueden deducir ciertas expresiones de uso más directo que las leyes de la refracción, aunque se derivan de ellas y de la geometría de cada caso:

-Lámina de caras planas y paralelas: lámina transparente, normalmente con el mismo medio a ambos lados, se produce refracción en ambas caras de la lámina.



Las expresiones directas para distancia $d=AC$ recorrida dentro de la lámina de espesor $e=AB$ y para desviación δ (distancia de separación entre rayos) es

$$AC = \frac{e}{\cos r_1}; \delta = \frac{e}{\cos r_1} \sin(i_1 - r_1)$$

Deducción de las expresiones:

La primera se obtiene por trigonometría en el triángulo ABC.

La segunda se obtiene por trigonometría en un triángulo ACD



-Prisma óptico: medio transparente limitado por superficies planas no paralelas.
 Los diagramas tienen trazado de rayos, pero se manejan ángulos y los trato en óptica física, no geométrica.

La expresión directa para la desviación δ (ángulo de desviación entre rayo incidente y rayo emergente) es $\delta = i_1 + r_2 - \phi$

Siendo ϕ = ángulo del prisma, r_2 = ángulo de emergencia

Deducción de la expresión desviación:

En E: $\delta = 180 - b$ ya que son ángulos complementarios.

En A: $i_1 = x + r_1$ ya que son ángulos complementarios.

En B: $r_2 = y + i_2$ ya que son ángulos complementarios.

En triángulo ABE: $x + y + b = 180 \rightarrow \delta = x + y$ [1]

En la normal en A: $90 = w + x + r_1$ [2] $\rightarrow 90 = w + i_1 \rightarrow w = 90 - i_1$ [3]

En la normal en B: $90 = i_2 + y + z$ [4] $\rightarrow 90 = z + r_2 \rightarrow z = 90 - r_2$ [5]

En triángulo ABC: $w + x + y + z + \phi = 180$ [6]

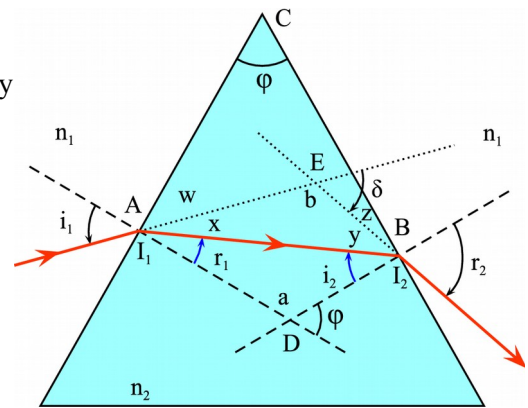
Sustituyendo [1],[3] y [5] en [6]: $90 - i_1 + \delta + 90 - r_2 + \phi = 180 \rightarrow \delta = i_1 + r_2 - \phi$

La desviación δ es mínima cuando $i_1 = r_2$

(En D podemos ver que el ángulo que forman las normales es el complementario de ϕ)

En triángulo ABD: $r_1 + i_2 + a = 180 \rightarrow 180 - a = r_1 + i_2$

Sustituyendo [2] y [4] en [6] $\rightarrow 90 - r_1 + 90 - i_2 + \phi = 180 \rightarrow \phi = r_1 + i_2$ que es el ángulo que forman las normales)



4.3 Absorción y dispersión

Absorción: pérdida de energía debida al medio.

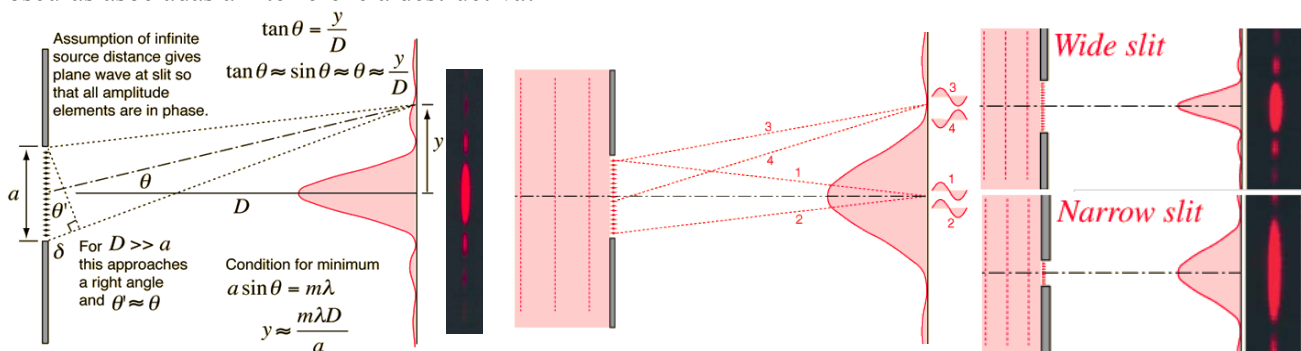
Dispersión: la velocidad de propagación de la onda varía con la frecuencia en ciertos medios. Explica la descomposición luz blanca en prisma, y a veces se denomina dispersión a la propia descomposición de un haz de luz no monocromático/separación de ondas según frecuencia al atravesar un medio.

5. Fenómenos ondulatorios en la luz

En bloque movimiento ondulatorio se ven fenómenos asociados al principio de superposición: interferencias, ondas estacionarias, batidos/pulsaciones, pero algunos no se tratan, solamente se citan, y se tratan/amplian en este bloque, adicionales a los asociados a cambio de medio (reflexión, refracción, absorción y dispersión). Hay algún fenómeno como la polarización que enlaza con alguno ya visto como la reflexión.

5.1 Difracción

Se trata de un caso concreto de interferencias entre las ondas producidas al encontrar un obstáculo de tamaño comparable a λ (bordear obstáculos y aperturas de tamaño comparable a la longitud de onda). Es típico con rendijas, que puede ser una, dos o múltiples, y de hecho a veces se asocia directamente difracción y rendijas. En una pantalla tras la apertura se forma un "patrón de difracción", que depende del tamaño y forma de la apertura (rendija, cuadrada, circular), habiendo zonas brillantes asociadas a interferencia constructiva y zonas oscuras asociadas a interferencia destructiva.



Fraunhofer Diffraction Geometry. Fraunhofer Single Slit. Single Slit Diffraction for Different Slit Widths. Copyright HyperPhysics

Aunque resulte contraintuitivo, al aumentar el tamaño de una rendija el patrón es más estrecho y a la inversa.
 >El experimento doble rendija Thomas Young enlaza con física moderna (difracción electrones y neutrones).
¿Pero no es la difracción un caso de interferencias? ¿Por qué se habla de dos cosas distintas? ¿cual es la diferencia entre ambas? La respuesta dependerá de quien conteste, a veces indicando interferencia asociada a un número pequeño de ondas, y la difracción asociada a obstáculos. Una respuesta de Richard Feynman (Lectures in Physics, Vol 1 1963, pg. 30-1, Addison Wesley Publishing Company Reading) "no-one has ever been able to define the difference between interference and diffraction satisfactorily. It is just a question of



usage, and there is no specific, important physical difference between them."

5.2 Polarización

La polarización es una propiedad de las ondas que pueden oscilar en más de una dirección, que define en qué dirección se produce la oscilación. Ocurre en ondas transversales ya que las ondas longitudinales, como el sonido, no pueden estar polarizadas porque la oscilan en la dirección de propagación. En el caso de la luz oscila tanto E como B siendo perpendiculares entre sí y con la dirección de propagación, y por convenio se considera la polarización de E. Puede no existir polarización si la oscilación se produce en múltiples direcciones; caso de luz no polarizada.

Tipos: en caso de haber polarización, se definen en función de la forma que describe E sobre un plano:

-*Lineal*: ambas componentes en fase, existe plano de polarización formado por dirección de propagación y oscilación E.

-*Circular*: ambas componentes misma amplitud y desfase 90°.

-*Elíptica*: ambas componentes distinta amplitud y desfase variable.

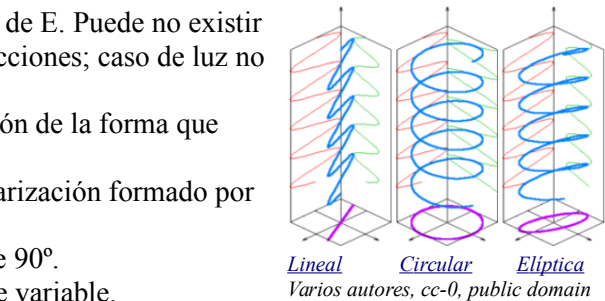
La luz en general es no polarizada: algunos **métodos para obtener luz polarizada** a partir de luz no polarizada:

-*Filtro polarizador*: dispositivo o material que deja pasar un tipo de polarización. Puede ser lineal o circular.

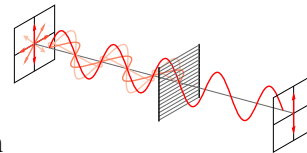
-*Reflexión*: con cierto ángulo de incidencia (ángulo de Brewster) el rayo reflejado no tiene componente en el plano de incidencia (reflejado y refractado forman 90°)

-*Birrefringencia o doble refracción*: propiedad de ciertos materiales (espato de Islandia) de desdoblarse un rayo incidente en dos rayos polarizados linealmente perpendiculares entre sí.

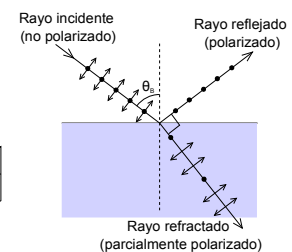
Algunas aplicaciones son las gafas polarizadas (bloquean reflejos), transmisión radio (se puede enviar varias señales utilizando la misma frecuencia pero distinta polarización)



Lineal Circular Elíptica
Varios autores, cc-0, public domain



Efired, cc-by-sa



HUBL, cc-by-sa

5.3 Doppler con ondas electromagnéticas

Lo visto en general en bloque de ondas se simplifica para el caso de que la velocidad de propagación de la onda sea mucho mayor que la relativa entre fuente y observador, que es lo que ocurre en las ondas electromagnéticas que se propagan con velocidad c. En la expresión la velocidad v sería la velocidad relativa entre fuente y observador (se toma referencia en observador que está "inmóvil"): sería positiva si hay acercamiento (aumenta la frecuencia observada) o negativa si hay alejamiento. Si tomamos referencia en foco que está "inmóvil" y es el observador el que se desplaza, la expresión varía: la aparente contradicción se explica con la relatividad, estas expresiones son aproximaciones y aunque sean distintas, "coinciden" para $v \ll c$.

Sin velocidades relativistas hay variación de f, variación de λ , de la que se suele hablar como "desplazamiento" (hacia el rojo o hacia el azul, aunque no sea en el rango visible).

$$f' = \frac{c \pm v}{c} f$$

$$f' = \frac{c}{c \mp v} f$$

6. El color

Al hablar de color para la luz se hace referencia normalmente la frecuencia asociada, asumiendo que es monocromática. Si la luz no es monocromática, hay varias frecuencias al mismo tiempo y se pueden producir fenómenos como la dispersión. El color enlaza con el espectro electromagnético, y se puede hablar de "color" en la parte del espectro no visible.

Es importante identificar el color de los cuerpos como la interacción de la luz con los mismos; lo que vemos es la radiación que los cuerpos emiten o la radiación que reflejan cuando son iluminados.

7. El espectro electromagnético. Espectro visible y no visible

La **naturaleza electromagnética de la luz**, como onda o partícula, le asocia como propiedad la frecuencia.

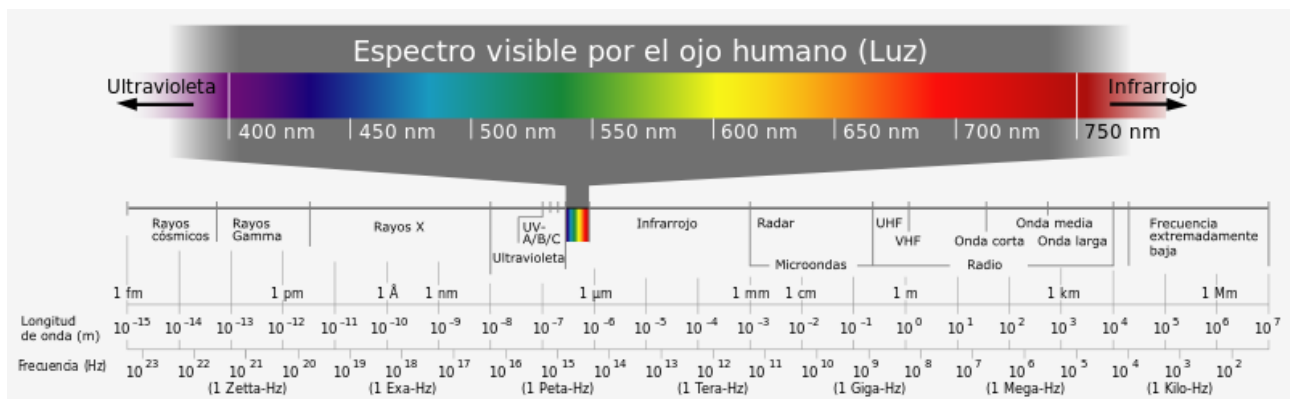
Un concepto importante es el **espectro**, una escala en la que se representan las diferentes ondas en función de la frecuencia o de longitud de onda, dada la relación entre ambas con la velocidad de propagación.

>El espectro es un concepto que va más allá de la luz; se puede introducir conceptualmente con ondas sonoras, analogía rango luz visible con rango frecuencias audibles, y relacionar con el análisis de Fourier.

El espectro electromagnético es un concepto que se suele introducir al hablar de los modelos atómicos, y a veces se asocia a la dispersión de la luz al atravesar un prisma.

Se divide en una serie de zonas/secciones/"bandas" que muchas veces tienen nombres por razones históricas; bien por la fuente de la radiación o bien por el uso de la radiación.





Wikimedia, varios autores, cc-by-sa

Como hablamos de óptica, es importante conocer el rango de la **luz visible**: λ entre 400 y 740 nm

La radiación se produce por el movimiento de cargas aceleradas; una carga en reposo o movimiento uniforme no radia; el hecho de que una carga acelerada radie enlaza con la inestabilidad del átomo según el modelo de Rutherford y la necesidad del modelo de Bohr. En principio un circuito de continua no radia, y circuito eléctrico capaz de generar ondas electromagnéticas está asociado a alterna o pulsos.

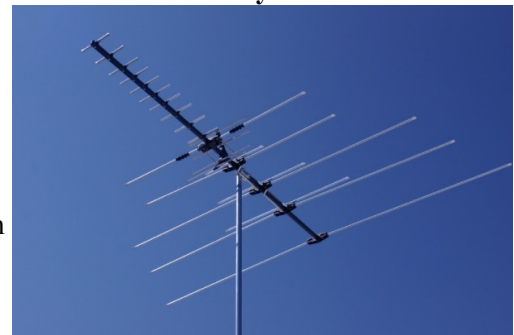
Idea cualitativa importante entre interacción luz-materia: λ del orden de magnitud del sistema que radia o recibe esa radiación. Un ejemplo visual es comparar tamaño antenas VHF y UHF:

VHF (Very High Frequency): $f=30$ a 300 MHz, $\lambda=10$ a 1 m

UHF (Ultra High Frequency): $f=300$ MHz a 3 GHz, $\lambda=1$ a $0,1$ m

Las antenas de dipolo suelen tener una longitud de $\lambda/2$

Las fuentes microscópicas/generación artificial requieren oscilaciones electromagnéticas del orden de λ : para ondas radio, movimiento e^- en circuitos eléctricos (circuito eléctrico capaz de generar ondas electromagnéticas lleva asociada una antena con un tamaño del orden de λ ; en recepción hay cierta simetría con la emisión, y las antenas receptoras también tienen un tamaño del orden de λ . Microondas; vibración y rotación moléculas por cuerpos calientes. Luz visible y ultravioleta saltos de electrones exteriores e interiores. Rayos X electrones interiores. Rayos gamma núcleo atómico.



Antenas UHF y VHF, wikimedia, public domain

¿Puedes identificar la de UHF y la de VHF?

>La energía fotón se ve en bloque de física moderna: idea de que energía fotón en visible es de orden eV

8. Efectos y aplicaciones tecnológicas de diferentes tipos de radiaciones

Lo habitual es tratar las radiaciones según su posición en el espectro

-Radiación infrarroja: efecto invernadero en biosfera, emitida por cuerpos a temperaturas habituales.

Aplicaciones en control remoto, pulsioxímetros, visión nocturna, transmisión por fibra óptica.

-Radiación ultravioleta: efecto en seres vivos, capa de ozono. Aplicaciones en reacciones químicas, fluorescencia (falsificación, ciencia forense), esterilización.

-Microondas: aplicación en hornos para calentamiento de alimentos con agua (2,45 GHz), telecomunicaciones (Wifi), radares e información meteorológica.

Algunos ejemplos de aplicaciones adicionales a los ejemplos asociables a cada banda/franja del espectro:

-Técnicas de exploración: Además de la astronomía óptica tradicional, radioastronomía, todo el espectro (infrarrojo: casi todo absorbido por la atmósfera, ultravioleta, rayos X, rayos gamma, astropartículas (rayos cósmicos, neutrinos). Por ejemplo, el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas Nobel en 1978.

-Análisis espectral: objetos externos al sistema solar, composiciones, desplazamiento y expansión universo. Enlaza con los espectros de emisión y absorción materiales, mecánica cuántica y modelo atómico.

8.1 Transmisión de la comunicación

Las telecomunicaciones se basan en transmisión de información a través de ondas electromagnéticas en diferentes soportes: "radio" en aire, luz en fibra óptica.

Además de los dispositivos de transmisión de información, se puede visualizar el almacenamiento de la información en dispositivos como interacciones electromagnéticas con la materia: almacenamiento magnético en discos duros, reflexión de láser en discos ópticos.

