



GUÍA 4 DE FÍSICA: LA LUZ I

PROF. RODRIGO NAVAS F.

CONTENIDOS:

- Elementos de las ondas electromagnéticas (longitud de onda, frecuencia, período, amplitud).
- Relación entre longitud de onda, frecuencia y rapidez de propagación de una onda electromagnética.
- Espectro electromagnético.
- Fenómenos ondulatorios en ondas electromagnéticas (absorción, reflexión y refracción). Propagación de la luz en línea recta.
- Efecto Doppler, interferencia y difracción en ondas electromagnéticas, en términos cualitativos.
- Formación de colores y dispersión.
- Comportamiento de la luz en espejos (planos, cóncavos y convexos) y lentes (convergentes y divergentes) considerando la formación de imágenes.
- Funcionamiento y utilidad de dispositivos o artefactos tecnológicos: radar, prismáticos, comunicación inalámbrica, teléfono móvil, televisor, radio, rayo láser, telescopio reflector y refractor, radiotelescopios, fibra óptica, entre otros.

I. INTRODUCCIÓN

La naturaleza y propiedades de la luz han sido objeto de gran interés y especulación desde los tiempos antiguos. Los griegos creían, que la luz estaba formada por pequeñas partículas (corpúsculos) que eran emitidas por las fuentes de luz, estimulando la percepción de la visión después de chocar con el ojo del observador. Otros, entre ellos **Platón** y **Sócrates** pensaban que la luz se componía de diminutas cintas o filamentos que emitía el ojo y que entraban en contacto con el objeto, a este respecto **Euclides** sentenció “de qué otra manera se podría explicar el hecho de que no vemos una aguja en el suelo hasta que ponemos los ojos en ella”, aunque (ya en aquella época) **Empédocles**, enseñaba que la luz se propagaba en forma de ondas. Más tarde **Newton** en su trabajo **Optiks** de 1704, utilizó la teoría corpuscular para explicar la reflexión y refracción de la luz. Sin embargo, un contemporáneo a Newton, el holandés **Christian Huygens** (1629-1695), fue capaz de explicar por medio de la teoría ondulatoria de la luz los fenómenos de reflexión y refracción. Por algunas razones, sumado al peso de la gran reputación de Newton, la teoría ondulatoria no recibió aceptación inmediata, a pesar de que en aproximadamente 1660 fue descubierta la difracción de la luz por **Francesco Grimaldi**, los argumentos entonces esgrimidos eran:

1° Por aquellos tiempos solo eran conocidas las ondas que se propagan por algún medio (agua, sonido), empero la luz podía viajar por el vacío.

2° Si la luz era una onda esta debía rodear los obstáculos, y entonces seríamos capaces de ver a la vuelta de la esquina. Esto no es fácil de observar debido a las pequeñas longitudes de onda de la luz.

Sin embargo, en 1803 **Thomas Young** entregó la primera demostración convincente de la naturaleza ondulatoria de la luz, al mostrar que en condiciones apropiadas la luz exhibía interferencia, hecho que no era posible ser explicado con la teoría corpuscular, ya que no era concebible aceptar que dos partículas se unieran o cancelaran entre sí. En 1850 **Jean Foucault** dio más evidencia de la inoperatividad de la teoría corpuscular al demostrar que la rapidez de la luz era menor en los líquidos que en el aire.

Según la teoría corpuscular de la luz, la rapidez de esta sería mayor en los vidrios o en líquidos que en el aire. En 1873 **James Maxwell** demostró que la luz era una forma de onda electromagnética de alta frecuencia, prediciendo una velocidad de propagación de 3×10^8 m/s. En 1887 **Heinrich Hertz** confirmó experimentalmente la teoría de Maxwell al producir y detectar ondas electromagnéticas, mostrando que estas se reflejan, refractan y comportan como las demás ondas.

Más tarde surgieron fenómenos ópticos que no pudieron ser explicados con la teoría clásica de la electricidad y magnetismo, uno de estos fue el efecto fotoeléctrico descubierto por Hertz y explicado por **Einstein**, trabajo por el cual recibió el premio Nobel de física. El efecto fotoeléctrico es una emisión de electrones por una superficie metálica expuesta a la luz. Experimentalmente se mostró que la energía cinética de los electrones es independiente de la intensidad de la luz, lo que contradice la teoría ondulatoria, pues esta señala que una luz muy intensa debía suministrar mayor energía a los electrones.

En 1905 Einstein, utilizando la teoría de cuantización de la energía, desarrollada por **Max Planck** en 1900 y que supone que la energía se presenta en paquetes discretos llamados fotones, y cuya energía está dada por $E = n h \nu$, donde n es un número natural, ν es la mínima frecuencia emitida y h es la constante de acción de Planck y cuyo valor $6,63 \times 10^{-34}$ Js. Así el efecto fotoeléctrico es producto de la acción de la energía de un solo fotón sobre el electrón, como si este lo chocara.

Por lo expuesto es claro que la luz tiene un comportamiento dual, es decir, si queremos explicar la propagación y difracción e interferencia de la luz recurrimos a la teoría ondulatoria electromagnética, pero si queremos describir la interacción de la luz en el efecto fotoeléctrico, nos ayudamos con la teoría corpuscular. Por tanto, decir que la luz es una onda o partícula es un error. La luz es la luz. Algunas veces se comporta como onda y otras como partícula. En esta unidad nos ocuparemos del comportamiento ondulatorio de la luz. Sin embargo, utilizaremos lo que se denomina aproximación de rayo de la luz, representándola como un rayo que especifica la dirección de propagación de la onda.

II. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Toda onda lumínica es una onda electromagnética, y es parte de un conjunto amplio de ondas EM, las que pueden ser clasificadas en función de su frecuencia o longitud de onda, de este modo surge lo que denominamos **ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO**

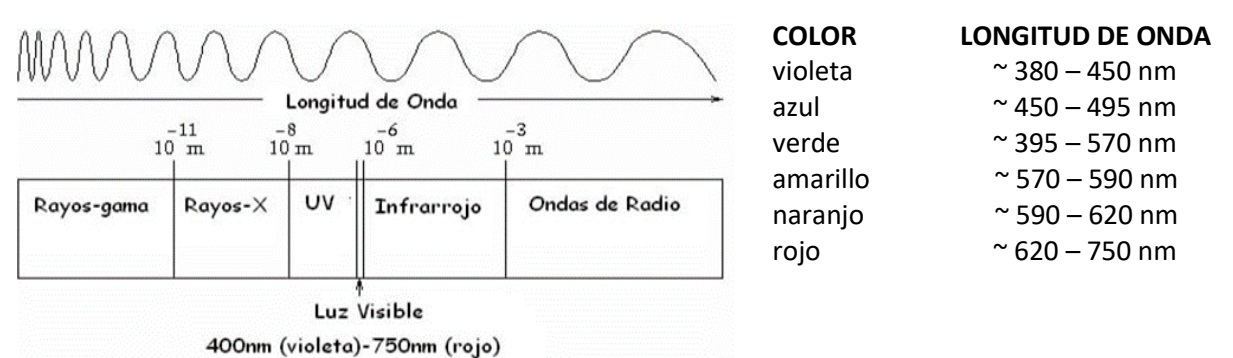


Figura 1: Clasificación de las O.E. según su λ

En la figura 1 se puede ver que existen otras ondas EM como los rayos X y los IR. Estos tipos de ondas se diferencian entre sí por su energía, y por tanto en su frecuencia, además como su velocidad de propagación (3×10^8 m/s en el vacío, la cual se designa por c) es la misma, también se diferencian en su longitud de onda, de modo que en una onda EM mientras mayor sea su energía, mayor será su frecuencia y menor su longitud de onda. A partir de este espectro se define la luz como ondas EM de una determinada frecuencia o longitud de onda. El violeta y el rojo tienen asociado una onda con una frecuencia de $7,5 \times 10^{14}$ Hz y $4,3 \times 10^{14}$ Hz respectivamente.

Un fenómeno interesante que puede ser descrito a partir de lo anterior, son los efectos producidos por las mezclas de colores. Ya sabemos que cuando mezclamos todos los colores se produce luz blanca, pero este mismo efecto lo obtenemos mezclando sólo rojo, verde y azul de la misma intensidad. Cuando sólo se superponen luz roja y azul se genera el color magenta. La luz roja combinada con el verde produce el amarillo y la combinación de verde y azul se ve azul verdoso o turquesa. De este modo se puede producir cualquier color, basta con ajustar la intensidad de estos colores, y es esta precisamente la forma en que funciona el TV para generar los colores de las imágenes. Al iluminarse la pantalla se producen puntos de menos de un milímetro de diámetro de color verde, azul o rojo, que vistos desde lejos generan la mezcla necesaria para producir todos los colores.

Podemos entender esto si consideramos la mezcla de colores como una mezcla de frecuencias, de este modo el rojo corresponde al extremo de las frecuencias bajas del espectro, el azul al extremo de altas frecuencias y el verde a las frecuencias intermedias. El resto de los colores se obtiene por la interpretación que hacemos por la mezcla de luces de distinta frecuencia, hecho que está íntimamente relacionado con la estructura de nuestro ojo y no que este hecho se produzca en realidad, recordemos que la interferencia entre ondas solo produce la suma de sus amplitudes y no sus frecuencias.

III. VELOCIDAD DE LA LUZ

Galileo intentó medir la rapidez de la luz utilizando dos observadores apostados en dos torres separadas por una distancia de 5 millas. Cada observador estaba provisto de una linterna. Uno de los observadores debía operar primero su linterna, mientras que el segundo lo haría al observar la luz emitida por la primera linterna. En principio, es posible obtener la rapidez de un haz de luz, conociendo el tiempo de tránsito entre las dos linternas; sin embargo, el tiempo de reacción de los observadores es muy grande respecto del tiempo de tránsito de la luz, así que este método arrojó resultados pocos convincentes y fue desechado por Galileo. Existen otros métodos usados para determinar la rapidez de la luz. El primero en obtener una estimación exitosa fue **Ole Roemer** en 1675, basándose en datos astronómicos de las órbitas de Júpiter, lo (una de las lunas de Júpiter) y la Tierra, fijó un límite inferior de rapidez de $2,3 \times 10^8$ m/s, asignándole de este modo a la luz una rapidez finita. El primer método exitoso utilizando únicamente técnicas terrestres fue ideado por **Armand Fizeau** en 1849, estableciéndose un valor para c de $3,1 \times 10^8$ m/s. Más tarde con este método, y con la ayuda de medidas más precisas se obtuvo un valor de $2,9977 \times 10^8$ m/s.

* No fueron descritos los distintos métodos, pues escapan a los objetivos de la unidad.

IV. GENERACIÓN DE LA LUZ

La compleja naturaleza de la luz nos lleva a buscar a nivel atómico una respuesta para explicar el fenómeno de emisión, esto implica que la luz está intrínsecamente relacionada con la estructura atómica y molecular de los cuerpos. Para ilustrar estos aspectos, considérese al átomo de hidrógeno:

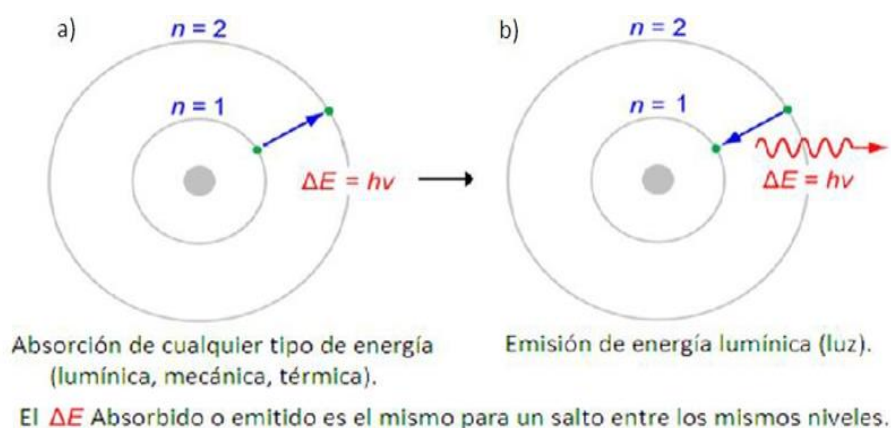


Figura 2: Salto cuántico en un átomo de hidrógeno según el modelo de Bohr.

En la figura a, puede observarse que el electrón se mueve a cierta distancia en un nivel de energía específico, por lo que obviamente tiene asociada una cierta cantidad de energía. Si de algún modo, el electrón absorbe una cantidad específica de energía este salta a una órbita más lejana o mayor nivel de energía. Se dice entonces que el electrón se encuentra en un estado excitado. Sin embargo, la tendencia natural del electrón es volver a su estado normal o basal. Cuando esto ocurre (figura b) es emitido un pulso electromagnético (fotón) que posee la misma cantidad de energía que aquella absorbida. Por tanto, esta emisión tiene una frecuencia y longitud de onda específica correspondiente a algún color. Es necesario insistir que, aunque un electrón puede en teoría tener infinitos estados de excitación, estos corresponden a cantidades específicas de energía y que corresponden a distancias específicas del electrón al núcleo, y que además cada electrón de cada átomo de cada molécula tiene específicos estados de excitación, y por tanto generará una determinada emisión EM.

Existen cuatro formas principales de emisión de luz: la incandescencia, que se produce por la emisión de cuerpos que utilizan el calor cuando se eleva su temperatura, por ejemplo, cuando un metal es calentado al rojo vivo; la fosforescencia, es una propiedad de ciertos cristales y algunas moléculas orgánicas para permanecer excitadas largos periodos de tiempo luego de ser iluminados, por lo que brillan en la noche.

Estos materiales son utilizados en los relojes. La fluorescencia se produce debido a que ciertas sustancias al ser iluminadas por luz de alta energía la reemiten como luz visible. Este fenómeno es ampliamente utilizado en las señales de carretera y en los tubos que iluminan muchas casas. Por último, la bioluminiscencia se produce debido a que ciertos animales contienen en sus organismos sustancias que operan como fosforescentes o fluorescentes.

V. PROPAGACIÓN DE LA LUZ

Una vez emitida la luz esta se propaga a través del espacio, como ya vimos, y puede sufrir determinados fenómenos cuando se encuentra con un medio distinto que por el cual viajaba. Estos varían dependiendo si el medio nuevo corresponde a un cuerpo opaco o transparente. Un cuerpo en el cual toda la luz que incide sobre él es absorbida o reflejada, es decir, no permite el paso de la luz, se dice que es opaco. La luz que en el incide y es absorbida hace que se caliente y la reflejada como veremos más adelante es responsable de su color. Por el contrario, en un cuerpo transparente la energía de la luz incidente se transmite en su mayoría a través de este cuerpo. Sin embargo, los cuerpos transparentes permiten el paso de radiaciones específicas, aspecto que será analizado más adelante.

1) Reflexión

Si un haz de luz, es decir, una agrupación de rayos con igual dirección incide sobre una superficie opaca rugosa, los rayos se reflejarán en todas direcciones - figura (a) -, a este tipo reflexión se le conoce como difusa. Si por el contrario el haz incide sobre una superficie lisa, los rayos del haz se reflejarán en la misma dirección, respetando la ley de reflexión – figura (b) – esta reflexión se conoce como reflexión especular. Es preciso aclarar que la reflexión difusa también respeta la Ley de la Reflexión, el hecho que los rayos se dispersen en distintas direcciones se debe a que como la superficie es irregular el ángulo de incidencia de cada rayo es distinto, de modo que también lo será su ángulo de reflexión.

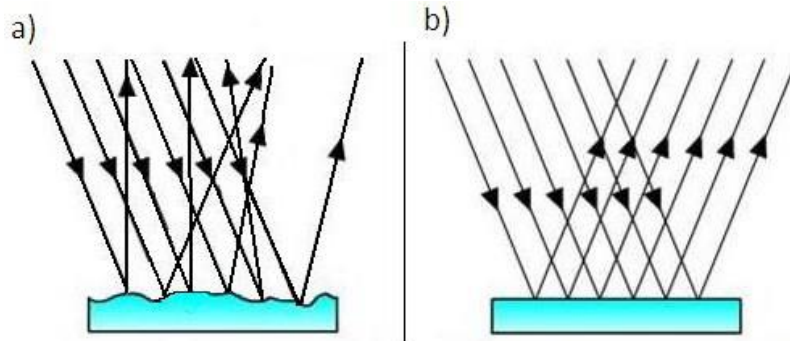


Figura 3: Reflexión de la Luz.

1.a Formación de Imágenes por Reflexión

Los espejos tienen especial importancia entre los cuerpos opacos, debido a que es posible distinguir nítidamente una la forma, color y textura de una figura reflejada en él. Como un primer paso analizaremos la formación de imágenes en espejos planos:



Figura 4: Formación de una imagen en un espejo plano.

En la figura a se representa un objeto que se ve directamente, esto ocurre debido a que de cada punto de él emergen rayos en todas direcciones, posibilitando que alguno(s) impacte(n) en nuestros ojos. En la figura b el objeto es visto como imagen en un espejo, para lo cual debe cumplirse lo anterior, es decir, rayos emanados desde cada punto del objeto deben llegar hasta nuestros ojos. Si prolongamos los rayos reflejados, que han salido de un punto del objeto, “hacia atrás del espejo”, estos se intersectarán de manera de formar la imagen de dicho punto, del mismo modo se formará la imagen de todos los puntos, y la sumatoria de cada imagen de punto formará evidentemente la imagen del objeto. La descripción geométrica genera una imagen, a igual distancia del espejo que el objeto y del mismo tamaño, dando de este modo la sensación de profundidad, forma, tamaño y textura del objeto.

La fórmula siguiente permite calcular el número de imágenes formadas.

$$N = \frac{360}{\alpha} - 1$$

Donde:

N = número de imágenes.

α = ángulo formado por los espejos.

Otros tipos de espejos son los esféricos, es decir, espejos curvos cuya forma corresponde a una sección de la superficie de una esfera. Existen dos tipos: El espejo cóncavo es aquel en el cual la luz reflejada converge “hacia dentro” de él al incidir el rayo en su superficie interna. El espejo convexo es aquel que diverge la luz hacia fuera del espejo, al incidir el rayo en la superficie externa del espejo.

1.b Determinación gráfica de la imagen

Para esto se debe antes que nada determinar los siguientes elementos: el vértice, que es el punto de intersección entre el espejo y eje principal, que es el eje que pasa por la base del objeto y el centro espejo. Además, se deben ubicar el centro (C) del espejo y su foco (F), que es el punto medio entre el vértice y el centro.

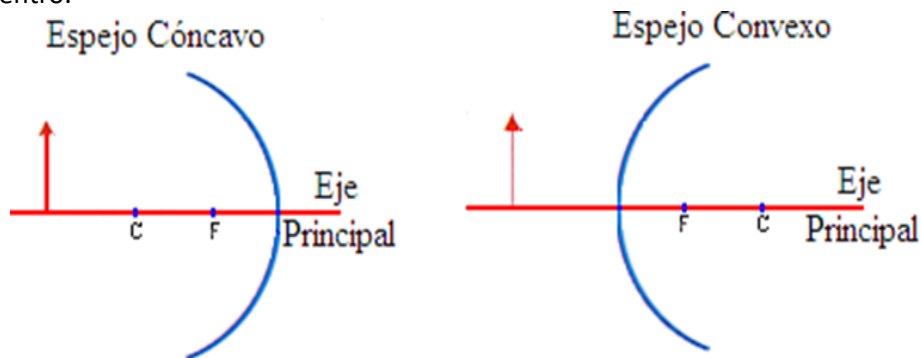


Figura 5: Tipos de espejos esféricos.

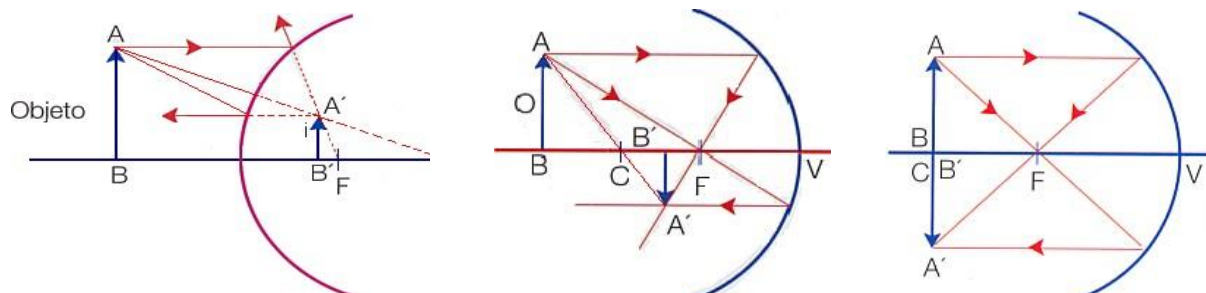
A pesar de que un objeto al frente de un espejo difundirá rayos en todas direcciones, nos basta utilizar tres rayos que emergen de un punto, para definir la imagen completa, a saber:

- **RAYO PARALELO:** Emerge del objeto paralelo al eje, y una vez reflejado, ya sea él o su proyección pasa por el foco.
- **RAYO FOCAL:** Emerge del objeto, pasando él o su proyección por el foco, y se refleja paralelo al eje.
- **RAYO CENTRAL:** Emerge del objeto, pasando él o su proyección por el centro, y se refleja en la dirección opuesta.
- En el punto donde se intersectan los tres rayos o sus prolongaciones es donde se forma la imagen del punto analizado.

A partir de la imagen formada se puede hacer una clasificación de ella según los siguientes criterios:

- 1) Tamaño: la imagen puede ser de **MAYOR**, **MENOR** o **IGUAL** tamaño que el objeto;
- 2) Orientación: puede ser **DERECHA** o **INVERTIDA** respecto de la orientación del objeto;
- 3) Tipo: si la imagen se forma por la intersección de los rayos, se dice que la imagen es **REAL**; y si se forma por la proyección de los rayos, se dice que la imagen es **VIRTUAL**.

De acuerdo con estas características la imagen, se pueden establecer los siguientes casos:



Cualquiera sea la posición del objeto, siempre tendrá una imagen virtual, derecha y de menor tamaño.

Imagen real, invertida y de menor tamaño.

Imagen real, invertida y de igual tamaño.

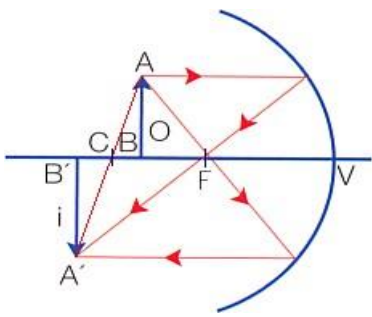
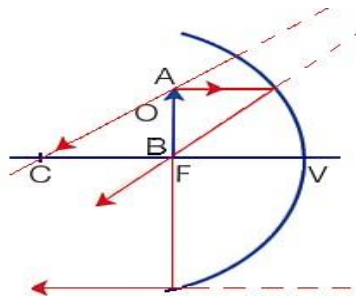


Imagen real, invertida y de mayor tamaño.



No se forma imagen

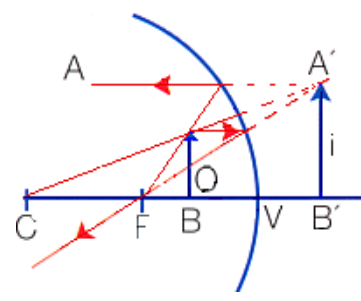


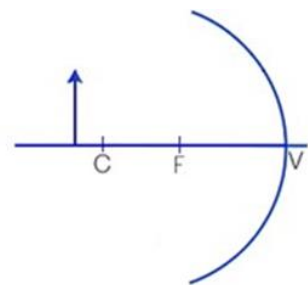
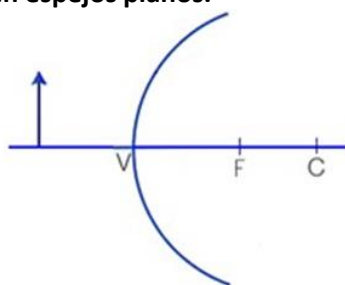
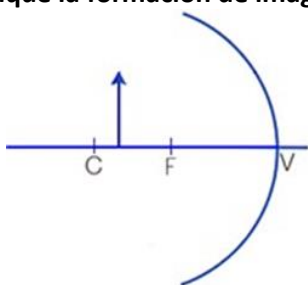
Imagen virtual, derecha y de mayor tamaño.

Figura 6: Tipos de imágenes en espejos esféricos.

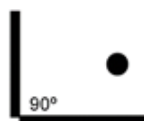
VI. PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Explique en qué consiste a nivel atómico la emisión de luz.
2. ¿De qué propiedad(es) ondulatoria(s) depende el color de una emisión? Explique.
3. ¿Por qué se dice que la luz posee comportamiento dual?
4. La distancia promedio entre el centro de la Tierra y el Sol es de 150 millones de km. Halle el tiempo en minutos que demora en recorrer esa distancia la luz.
5. Determine la energía asociada al color rojo.
6. Averigüe el tipo de luz emitida por una emisión de $1,5 \times 10^{13}$ Hz.
7. ¿Qué son los cuerpos opacos?
8. ¿Qué son los cuerpos especulares?
9. Defina:

a) Reflexión especular	c) Espejo cóncavo
b) Reflexión difusa	d) Espejo convexo
10. Explique la formación de imágenes en espejos planos.



11. La figura muestra un objeto frente a un par de espejos planos que forman un ángulo de 90° . Al respecto se afirma que las imágenes formadas por los espejos son



- A) dos reales.
- B) dos virtuales.
- C) tres virtuales.
- D) tres, dos reales y uno virtual.
- E) tres, una real y dos virtual.

12. Si un objeto de color verde es iluminado con luz de color rojo, se verá

- A) negro, porque refleja solo la luz verde y absorbe todo otro color.
- B) verde, porque ese es el color del objeto.
- C) morado, porque el objeto refleja una mezcla de rojo y verde.
- D) rojo, porque todos los cuerpos reflejan la luz que les llega.
- E) blanco, porque absorbe solo la luz verde y refleja todos los demás colores.

13. las ondas que llegan a la antena de un televisor funcionando y las que salen de su pantalla

- I) son de la misma naturaleza.
- II) difieren principalmente en cuanto a frecuencia y longitud de onda.
- III) tienen la misma rapidez.

Es(son) correcta(s)

- A) solo I.
- B) solo II.
- C) solo III.
- D) solo I y III.
- E) I, II y III.

14. Respecto de las ondas electromagnéticas, ¿cuál(es) de las siguientes afirmaciones es (son) correcta(s)?

- I) Las ondas electromagnéticas tienen su mayor rapidez en el aire.
- II) El horno microondas doméstico funciona emitiendo ondas electromagnéticas.
- III) Los rayos X son ondas electromagnéticas.

- A) Solo I.
- B) Solo III.
- C) Solo I y III.
- D) Solo II y III.
- E) I, II y III.

15. Para obtener una imagen real, de igual tamaño que un objeto, utilizando un espejo esférico cóncavo, el objeto debe estar

- A) en el foco.
- B) entre el foco y el vértice.
- C) en el centro de curvatura.
- D) entre el foco y el centro de curvatura.
- E) entre el centro de curvatura y el infinito.

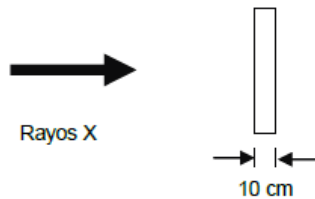
16. Respecto a las imágenes virtuales formadas por espejos, se afirma que

- I) se forman detrás del espejo.
- II) se localizan en la intersección de las prolongaciones de los rayos reflejados.
- III) se requiere de una pantalla para verlas.

Es (son) correcta(s)

- A) solo I.
- B) solo II.
- C) solo I y II.
- D) solo II y III.
- E) I, II y III.

17. La figura muestra un haz de rayos X, de frecuencia igual a 3×10^{16} Hz, que incide sobre una placa.



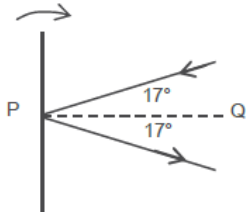
Al respecto, ¿cuántas longitudes de onda están contenidas en los 10 cm de espesor de la placa? (Considere que la velocidad de la luz en la placa es de $1,5 \times 10^8$ m/s)

- A) $0,2 \times 10^7$
- B) $0,5 \times 10^7$
- C) $1,0 \times 10^7$
- D) $2,0 \times 10^7$
- E) $5,0 \times 10^7$

18. Es correcto afirmar que la ley de reflexión de la luz establece que el ángulo de incidencia de un rayo sobre un espejo plano es

- A) mayor que el ángulo entre el rayo y la superficie.
- B) proporcional a la intensidad del rayo incidente.
- C) proporcional a la intensidad del rayo reflejado.
- D) menor que el ángulo de reflexión del rayo.
- E) igual al ángulo de reflexión del rayo.

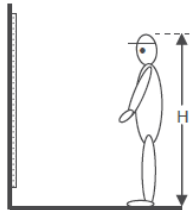
19. Un rayo luminoso se refleja en un espejo plano vertical, como se indica en la figura.



Si el espejo se inclina hacia adelante en 3° , ¿qué ángulo formará el rayo reflejado con la recta horizontal PQ?

- A) 14°
- B) 17°
- C) 20°
- D) 23°
- E) 34°

20. Una persona, cuya estatura es H , desea instalar en el muro de su habitación un espejo plano, de modo tal que, estando de pie, se pueda ver de cuerpo entero, es decir, de pies a cabeza. ¿Cuál debe ser, aproximadamente, la longitud mínima del espejo para lograr este propósito?



- A) $H/4$
- B) $H/2$
- C) $3H/4$
- D) H

21. La rapidez de propagación de la luz en el agua es igual al 75% de su rapidez de propagación en el aire. Un rayo anaranjado que viaja en el aire tiene una frecuencia de 6×10^7 Hz. Cuando este rayo se propaga en el agua

- I) su frecuencia es igual a la que tiene en el aire.
- II) su longitud de onda es $3/4$ de su longitud de onda en el aire.
- III) su período es $3/4$ de su período en el aire.

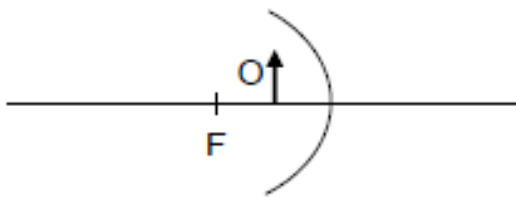
Es (son) correcta(s)

- A) solo I.
- B) solo II.
- C) solo III.
- D) solo I y II.
- E) solo II y III.

22. Algunas aves tienen la capacidad de ver en la región ultravioleta del espectro electromagnético. Solo con esta información, se puede afirmar correctamente que

- A) dichas aves pueden ver en un intervalo de longitudes de onda más amplio que los humanos.
- B) los humanos pueden ver en un intervalo de frecuencias más restringido que dichas aves.
- C) dichas aves pueden ver luz con frecuencias más altas que los humanos.
- D) dichas aves pueden ver luz de longitudes de onda mayores que los humanos.
- E) la máxima frecuencia que pueden ver los humanos es más alta que la máxima frecuencia que pueden ver dichas aves.

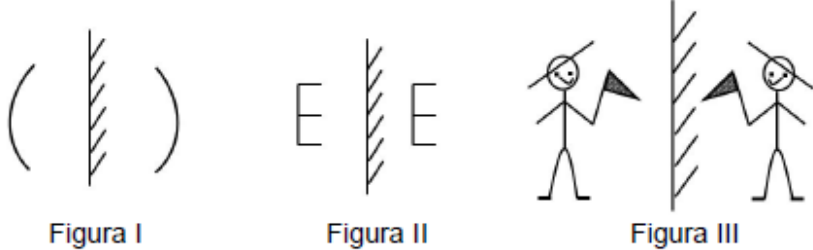
23. En la figura se representa un objeto O ubicado frente a un espejo cóncavo, donde F indica la ubicación del foco F del espejo, y la línea horizontal su eje óptico.



Al respecto, se afirma correctamente que la imagen del objeto O que forma el espejo es

- A) derecha respecto al objeto, real y de igual tamaño que el objeto.
- B) invertida respecto al objeto, real y de mayor tamaño que el objeto.
- C) derecha respecto al objeto, virtual y de igual tamaño que el objeto.
- D) derecha respecto al objeto, virtual y de mayor tamaño que el objeto.
- E) invertida respecto al objeto, virtual y de menor tamaño que el objeto.

24. Las figuras representan objetos y sus respectivas imágenes reflejadas en un espejo plano.



¿Cuál(es) de las figuras muestra(n) correctamente la imagen obtenida por reflexión?

- A) Solo III
- B) Solo I y II
- C) Solo I y III
- D) Solo II y III
- E) I, II y III

25. “En la óptica geométrica, un rayo de luz es una línea recta e imaginaria que representa la dirección de propagación de la luz, mientras que en la teoría corpuscular de la luz, representa la trayectoria de los fotones, aunque carece de significado físico en la mecánica cuántica.” Basándose en el texto, es correcto afirmar que el rayo de luz corresponde a

- A) un principio que se aplica en todas las áreas de la Física.
- B) una ley que muestra cómo la luz se propaga.
- C) una descripción de la naturaleza de la luz.
- D) una teoría que se aplica en la óptica.
- E) un modelo que tiene validez limitada.