

## **Práctica 1: Introducción experimental a la Óptica**

### **1.- Introducción**

### **2.- El láser**

### **3.- Óptica geométrica**

### **4.- Óptica ondulatoria**

#### **1.- Introducción**

Destaca en la historia de la Física la cuestión de qué es la luz. En principio se supuso que era algo que emitía el ojo, pero después se comprendió que procedía de los objetos que se veían. Pero, ¿cómo llega hasta el ojo y produce la sensación de visión? ¿Es una corriente de partículas? ¿Es un movimiento ondulatorio?

Llamamos luz al conjunto de ondas electromagnéticas cuya frecuencia está comprendida entre 400 y 700 nanómetros ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) a las cuales es sensible el ojo humano. Por tanto podemos aplicar para su estudio la teoría electromagnética. Esta teoría es correcta al describir la propagación de la luz pero falla al intentar explicar la interacción de la luz y la materia (por ejemplo, el efecto fotoeléctrico sólo puede explicarse mediante una teoría corpuscular).

Se concluye por tanto que la descripción de la luz presenta una naturaleza dual (al igual que la descripción de las partículas) y que se tratará como onda o partícula según el fenómeno a que se someta.

La propagación de la luz viene descrita por las ecuaciones de Maxwell de las ondas electromagnéticas. Sin embargo, la aproximación de rayos es válida para la propagación de cualquier movimiento ondulatorio si la longitud de onda es pequeña en comparación con las dimensiones de las aberturas u obstáculos que la onda encuentra en su camino. Esta suele ser la situación usual en la denominada Óptica Geométrica. En caso contrario, no podemos realizar la aproximación de rayos y tendremos que tratar a la luz como la onda electromagnética que es: estamos entonces en el ámbito de la Óptica Ondulatoria. Por último, si queremos estudiar fenómenos de interacción luz-partículas, como por ejemplo los efectos fotoeléctrico y Compton u otros fenómenos a nivel atómico en los que es manifiesto el carácter discreto de la energía, tendremos que hacer uso de una teoría corpuscular en el ámbito de la Física Cuántica.

## 2.- El láser

Como el láser será el principal material de trabajo usado en esta experiencia, veremos en primer lugar un breve fundamento. La palabra láser proviene de las siglas de su nombre en inglés: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Amplificación de luz mediante la emisión estimulada de radiación). La luz láser tiene tres características que la diferencian de la luz ordinaria:

- 1.- Es monocromática (una única frecuencia)
- 2.- Es muy coherente (diferencia de fase constante)
- 3.- Está bien colimada (haz de diámetro pequeño y poca divergencia)

Supongamos que tenemos un conjunto de átomos. Cada átomo tiende a mantener una configuración energética mínima: la del estado base o fundamental. Existen otras configuraciones posibles que superan esa energía mínima y se denominan estados excitados. Si comunicamos energía a los átomos, los electrones pueden absorberla y ascender a un estado excitado. Por la tendencia a un estado de mínima energía, esos mismos electrones emitirán espontáneamente la energía absorbida. Si la energía del estado base o inicial es  $E_i$  y la del estado excitado es  $E_f$ , la desexcitación consiste en la emisión de un fotón de energía  $E = h\nu = E_f - E_i$ . Pues bien, Einstein señaló en 1917 que un átomo excitado puede regresar a un estado de menor energía de dos formas: bien espontáneamente, o bien estimulado por la presencia de una radiación incidente de la frecuencia apropiada. En esto último consiste la **emisión estimulada**: un fotón de energía  $E = h\nu = E_f - E_i$  que incide sobre un átomo excitado con energía  $E_f$ , puede estimular al átomo a que emita otro fotón de la misma energía, fase, dirección y polarización que el fotón o la onda incidente. Ambos fotones pueden ahora interactuar con otros átomos excitados y repetir sucesivamente el proceso de emisión estimulada, con lo cual, la onda incidente aumenta enormemente su intensidad y grado de coherencia.

Sin embargo, ya que la mayoría de los átomos están ordinariamente en el estado base, la absorción es generalmente más probable que la emisión estimulada. Pero si de alguna forma consiguiésemos que un elevado porcentaje de átomos se encontrasen en el estado excitado, un fotón incidente de la frecuencia apropiada podría disparar una avalancha de fotones estimulados (todos en fase). La situación en la que el sistema tiene un gran número de átomos excitados se denomina **inversión de población**.

Los métodos usados para producir una inversión de población son:

- 1) Bombeo óptico (método utilizado en el láser de rubí)
- 2) Excitación por electrones (método utilizado en el láser de argón)
- 3) Transferencia de excitación por colisiones inelásticas (método utilizado en el láser de helio-neon)

El láser utilizado en esta práctica es de helio-neon. La potencia máxima de salida es de 1mW. La longitud de onda es de 632,8 nm, y el diámetro del haz de 0,7 mm. A continuación se describe esquemáticamente su funcionamiento.

La cavidad láser (ver fig.1) consiste en un tubo cilíndrico que contiene una mezcla de gases a baja presión (0,8 torr de He y 0,1 torr de Ne) y cuyos extremos son dos espejos; uno de ellos tiene un pequeño factor de transmitancia ( $\tau = 0,01$ ), que permitirá la salida del haz de luz láser.

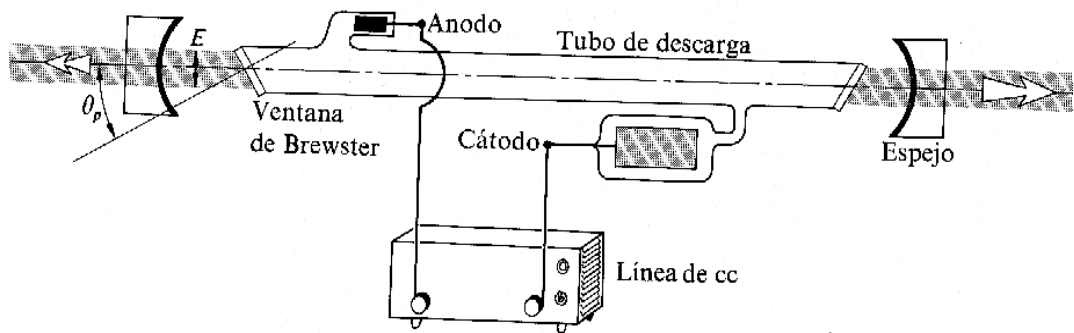


Figura 1

En la figura 2 se muestran los niveles relevantes de los átomos de He y Ne. Dentro del tubo, el gas se somete a un campo eléctrico intenso mediante unos electrodos conectados a una fuente de alimentación. Parte de los átomos son ionizados, y sus electrones son acelerados por el campo, y colisionan con otros átomos. En el caso del helio, y debido a su estructura de niveles, las colisiones excitan a los átomos hasta los niveles  $2^1S$  y  $2^3S$  que corresponden a estados metaestables desde los cuales no hay transiciones radiativas permitidas. Estos átomos excitados colisionan de un modo no elástico con los átomos de Ne en el estado base, y les transfieren energía, elevándolos a los estados  $3s_2$  y  $2s_2$ .

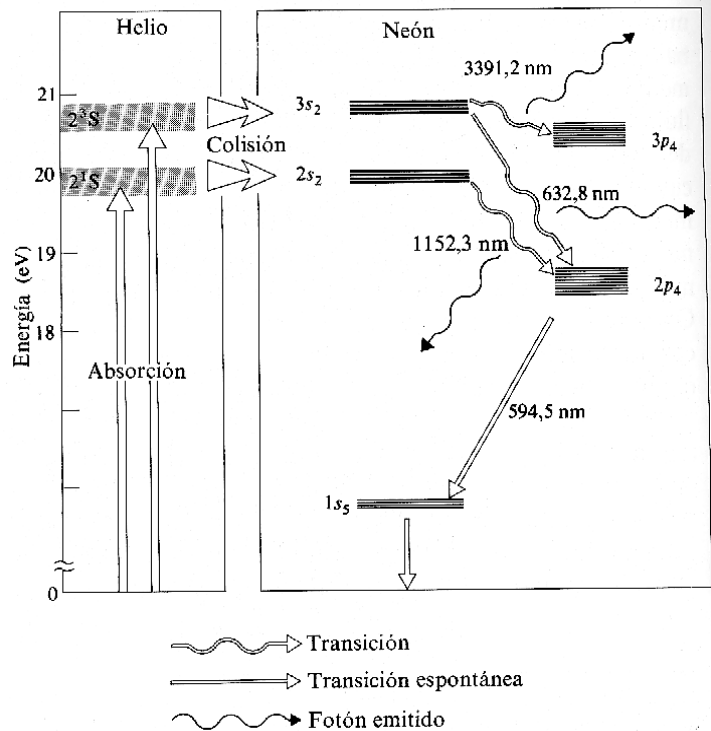


Figura 2

Estos son los niveles energéticos superiores del láser, y ahí existe una inversión de población respecto a los estados  $3p_4$  y  $2p_4$  más bajos, puesto que los estados  $p$  caen espontáneamente al estado  $1s$ . La luz láser en la región visible del espectro está formada por fotones de energía  $1.96 \text{ eV}$ , que corresponde a una longitud de onda de  $632,8 \text{ nm}$  (rojo) y que son emitidos de forma estimulada en la transición del nivel  $3s_2$  al  $2p_4$ .

### 3.- Óptica Geométrica

La Óptica Geométrica fue desarrollada antes de que la luz se describiese como una onda electromagnética, y proporciona de forma simple parte de la información que puede obtenerse de las ecuaciones de Maxwell, siempre que la longitud de onda de la luz sea mucho menor que las dimensiones de los objetos que se interpongan en su camino.

Existen dos formas de representar la propagación de una onda. Los **frentes de onda** son superficies de fase constante de la onda luminosa y pueden asemejarse a las crestas en una onda de agua. Un **rayo** es una línea que señala la dirección de propagación de la onda. La trayectoria de un haz de luz láser es un ejemplo de rayo.

La luz, cuando se propaga en el vacío lo hace de forma rectilínea y sin perturbaciones, pero cuando alcanza una partícula material, ésta se convierte en emisor de unas ondas secundarias que se propagan en distintas direcciones, dependiendo del tamaño y de las propiedades ópticas de la partícula. En esto consiste la dispersión de la luz, fenómeno que, por ejemplo, permite ver la trayectoria de un haz láser.

Cuando un rayo láser incide sobre la superficie de separación entre dos medios, pueden ocurrir distintos fenómenos:

- absorción (como cuando incide sobre un trozo de papel negro)
- reflexión múltiple en diversas direcciones (al incidir sobre una superficie rugosa, p. ej. papel blanco)
- reflexión (incidiendo en una superficie pulida, el rayo se refleja en una sola dirección)
- refracción (el haz es transmitido al otro medio)

Estos fenómenos son generales para todas las ondas.

Cuando la longitud de onda es mucho menor que las dimensiones del sistema físico a través del cual esta luz se propaga, se cumplen las siguientes

## leyes de la Óptica Geométrica:

1.- **Ley de la propagación rectilínea:** en un medio homogéneo, los rayos de luz se propagan en línea recta.

2.- **Ley de la reflexión.-** Una onda que incide sobre la superficie de separación entre dos medios, se refleja (parcialmente), es decir, se generan nuevas ondas que se alejan de dicha superficie. El rayo incidente y la normal a la superficie determinan el plano de incidencia. Ambas líneas forman el denominado ángulo de incidencia ( $i_1$ ). El rayo reflejado está también contenido en ese plano y forma con la normal el mismo ángulo que el rayo incidente ( $r_1$ ):

$$i_1 = r_1$$

3.- **Ley de la refracción.-** Cuando una onda incide sobre la superficie de separación entre dos medios, parte de la energía se refleja y parte entra en el segundo medio. El rayo transmitido (refractado), está contenido en el plano de incidencia, y forma un ángulo con la normal a la superficie,  $t_2$ , dado por la **ley de Snell**:

$$n_1 \text{ sen } i_1 = n_2 \text{ sen } t_2$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los **índices de refracción** de los medios 1 y 2, que se obtienen a partir del cociente entre la velocidad de la onda en el vacío y en el medio de que se trate:

$$n_i = \frac{c}{v_i}$$

Cuando el rayo pasa a un medio con menor índice de refracción se aleja de la normal, ya que el ángulo de refracción es tal que  $\text{sen } t_2 = n_1 / n_2 \text{ sen } i_1$ , y como  $n_1 / n_2 > 1$ ,  $\text{sen } t_2 > \text{sen } i_1$ . El valor máximo que puede tomar el seno es 1, por lo que hay un ángulo de incidencia límite tal que para ángulos mayores no está definido el ángulo de refracción, es decir, que la refracción no se produce.

Ese ángulo de incidencia límite se denomina **ángulo crítico**  $\theta_c$ :

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Para ángulos mayores que este ángulo crítico no existe rayo refractado, toda la energía de la onda se refleja. Este fenómeno se denomina **reflexión total interna**. Una aplicación interesante de la reflexión total es la transmisión de un haz de luz a lo largo de una fibra de vidrio transparente, delgada y larga. La luz incide sobre las paredes de la fibra con un ángulo superior al crítico, y toda la energía se transmite por la fibra reflejándose y

las paredes de ésta, sin escapar por refracción. Para obtener imágenes puede utilizarse un haz de este tipo de fibras, como se hace por ejemplo en Medicina para sondear órganos internos sin necesidad de cirugía. También se utiliza la fibra de vidrio para transmitir información en sistemas de telecomunicaciones.

### **Experiencias:**

#### **A) Observación de rayo láser**

**NOTA:** la trayectoria del rayo nunca debe ser observada mirando directamente a la fuente láser en la dirección en que se propaga el rayo.

En primer lugar, conectamos la fuente láser de He-Ne, pero sólo se observa el rayo en ciertos lugares. Para observarlo lo hacemos atravesar una cubeta que contiene humo o bien agua con unas gotitas de leche.

- 1.- ¿Dónde se observa el láser?
- 2.- ¿Qué tiene que suceder para que la trayectoria del rayo resulte visible?
- 3.- ¿Cómo es dicha trayectoria?

#### **B) Observación de la reflexión y refracción**

Comprobaremos que cuando el rayo llega a una superficie de separación entre dos medios, parte es reflejado y parte transmitido. Observaremos estos fenómenos en la interfase aire-agua. Para ello llenamos la cubeta hasta la mitad con agua, a la que añadiremos una gotas de leche. El resto del volumen de la cubeta contiene aire, que mezclaremos con humo (hay que tapar la cubeta en este caso).

Primero haremos pasar el rayo del aire al agua, variando su inclinación.

- 4.- ¿ Por qué se ve el rayo en la cubeta y fuera no?
- 5.- Describir el comportamiento del rayo incidente al llegar a la interfase aire-agua. Hacer un dibujo en el que aparezca también la normal.
- 6.- Describir el comportamiento del rayo incidente al llegar al fondo de la vasija.
- 7.- ¿ Qué sucede si el rayo incidente es normal a la superficie?

A continuación haremos pasar el rayo del agua al aire, también variando sucesivamente su inclinación.

- 8.- Describir el comportamiento del rayo incidente al llegar a la interfase agua-aire. Hacer un dibujo.
- 9.- ¿Qué sucede al variar la inclinación? Explicar con ayuda de dibujos.
- 10.- Modificando el ángulo de incidencia podemos lograr que el rayo reflejado en la superficie aire-agua se refleje también en el fondo de la cubeta. ¿Cómo se denomina este fenómeno? ¿Podrías citar algunas aplicaciones?

#### 4.- Óptica ondulatoria

Dos importantes fenómenos que distinguen las ondas de las partículas son la interferencia y la difracción. La interferencia es la combinación por superposición de dos o más ondas que se encuentran en un punto del espacio. La difracción es la desviación que sufren las ondas alrededor de obstáculos y aberturas producida cuando parte del frente de onda se ve interrumpido. El esquema de la onda resultante puede calcularse considerando cada punto del frente original como una fuente puntual de acuerdo con el principio de Huygens, y calculando el diagrama de interferencia que resulta de todas estas fuentes. El estudio de la difracción está dividido en dos partes:

- difracción de Fresnel: las ondas que inciden sobre el obstáculo o abertura y sobre la pantalla de observación no son necesariamente ondas planas.
- difracción de Fraunhofer: tanto la fuente como la pantalla están situadas a una distancia infinita del obstáculo, de modo que las ondas que inciden sobre el obstáculo o la pantalla son ondas planas.

El tratamiento matemático de estos fenómenos ondulatorios excede el objetivo de esta práctica introductoria, por lo que se mencionarán simplemente los fenómenos a observar y sus principales características cuantitativas.

#### Experiencias:

Observación del fenómeno de difracción:

##### a) en una rendija

Observaremos la difracción de Fraunhofer, para lo que dispondremos los elementos de forma que se cumpla la aproximación de ondas planas. Al ser alcanzada la rendija por la luz se convierte en un centro emisor de ondas secundarias que interfieren sobre la pantalla. El diagrama de difracción consiste en un máximo brillante central flanqueado por varios máximos secundarios, de forma que la intensidad de estos máximos disminuye con la distancia al centro del diagrama.

11.- Si tomamos una rendija de anchura variable, ¿se observa para cualquier anchura la difracción? Explicar.

12.- Relacionar la posición del primer mínimo nulo con la anchura de la rendija.

NOTA:  $a \sin\theta = m\lambda$

##### b) en un orificio circular

Observaremos la difracción de Fraunhofer para varios orificios de distintos diámetros.

13.- Describir con ayuda de dibujos si es necesario las observaciones.

14.- ¿Qué le sucede al diámetro del máximo principal ( $2R$ ) en las figuras observadas conforme decrece el diámetro del orificio ( $2a$ )?

15.- ¿Es posible determinar, a partir de medidas sobre el diagrama de difracción, el diámetro del orificio sabiendo la longitud de onda de la luz? NOTA:  $R = 1.22 \lambda L/a$

### c) en una red de difracción

Una red de difracción es un conjunto de rendijas iguales, paralelas e igualmente espaciadas. Al ser iluminadas, se produce un fenómeno global que combina la difracción de una rendija con la interferencia producida por la  $N$  rendijas. Una red se caracteriza por el número  $N$  de líneas (rendijas) por milímetro, o, equivalentemente, por la constante de red  $d$ , que es la distancia entre dos puntos homólogos de dos rendijas vecinas ( $d = 1/N$ ).

16.- ¿Qué se observa al conectar la fuente? ¿Hay simetría? ¿Varía la intensidad luminosa? Explicar.

La red dispersa la luz en mayor o menor grado dependiendo de la longitud de onda. Podemos comprobarlo mirando a través de la rejilla a una bombilla (**¡NUNCA AL LÁSER!**).

17.- La red, al desviar cada radiación en función de su longitud de onda, descompondrá la luz blanca en colores. Describir y explicar las observaciones.

### Observación de interferencias producidas por una doble rendija

Revisaremos ahora el experimento de Young, que fue la primera comprobación experimental de la teoría ondulatoria de la luz. Se observará el resultado de la interferencia producida por las dos rendijas. La posición del centro de los máximos de luz, medidos desde el centro de la pantalla, viene dada por:

$$y_{\text{máx}} = \frac{m L \lambda}{d}$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz,  $D$  la distancia de la rendija a la pantalla, y  $d$  la distancia entre puntos homólogos de las dos rendijas. El índice  $n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$

Aparecen también zonas sin luz, llamados mínimos, que son fronteras entre máximos consecutivos y cuya posición viene dada por:

$$y_{\text{mín}} = \frac{(2m+1) L \lambda}{2 d}$$

18.- Según esta teoría y las sucesivas observaciones, ¿qué sucede al disminuir la distancia entre las rendijas?