

## TRABAJO PRÁCTICO N° 11

### POLARIZACIÓN

#### Introducción

La **polarización** es una característica de todas las ondas transversales. Para el caso de una onda en una cuerda tensa que se encuentra a lo largo del eje  $x$ , y los desplazamientos de la cuerda que implica la onda únicamente tienen la dirección del eje  $y$ , expresamos que la onda está **linealmente polarizada** (en la dirección  $y$ ); asimismo, como la cuerda siempre ocupa planos definidos por el eje  $x$  (que corresponde a la dirección de propagación de la onda) y por el eje  $y$  (que corresponde a los desplazamientos de la cuerda), decimos que la onda está **polarizada en un plano** (en el plano  $x; y$ ).

Para ondas electromagnéticas linealmente polarizadas, se aplican iguales denominaciones adoptando como dirección de polarización la dirección del vector campo eléctrico  $\vec{E}$ .

En un haz de luz natural  $\vec{E}$  tiene cualquier orientación normal a la dirección de propagación; pero, cuando el haz está linealmente polarizado,  $\vec{E}$  tiene solo una orientación. Esta orientación y la dirección de propagación, define el correspondiente plano de polarización de un haz de luz polarizada.

Un filtro polarizador o simplemente **polarizador**, es un elemento que permite la transmisión de ondas linealmente polarizadas; es decir, ondas con cierta dirección de polarización. Esta dirección está definida en el polarizador por su "**eje de polarización**". Según su función en el dispositivo o sistema en que se use, a dicho filtro también se lo denomina **analizador**.

#### Ley de Malus:

Si hacemos incidir un haz de luz polarizada, de intensidad  $I_{\text{máx}}$ , sobre un analizador cuyo eje de polarización forma un ángulo  $\phi$  con el plano de polarización del haz, pasará a través del elemento, un haz de intensidad  $I_{\phi}$  dada por:

$$I_{\phi} = I_{\text{máx}} \cos^2 \phi \quad (11.1) \quad (\text{Ley de Malus})$$

#### Ley de Brewster:

Si un haz de luz natural incide en la superficie lisa de material no conductor, el haz reflejado se polariza parcialmente en un plano paralelo a la superficie reflectora; esta polarización es total para cierto ángulo de incidencia  $\theta_p$ , dado por:

$$\theta_p = \text{arc tg } n_{21} \quad (11.2) \quad (\text{Ley de Brewster})$$

Donde  $n_{21}$  es el índice de refracción del segundo medio respecto al primero.

### Experiencia 11.1

#### Ley de Malus. Microondas

##### Introducción. Microondas

El equipo que disponemos, mostrado en la Fig. 11.1, está formado básicamente por un transmisor y un receptor de microondas.

El transmisor provee una señal coherente, linealmente **polarizada**, con una frecuencia de 10,525 GHz y longitud de onda de 2,85 cm, que es emitida mediante un cuerno que determina su plano de polarización y permite direccionar la onda.

La potencia de salida del transmisor (10 mW) está encuadrada holgadamente dentro de los niveles de seguridad estándar. No obstante,

**NO DEBE MIRARSE DIRECTAMENTE AL CUERNO DE SALIDA CUANDO EL TRANSMISOR ESTÁ ENCENDIDO.**

El receptor de microondas, que posee un cuerno idéntico al del transmisor, detecta únicamente la radiación que llega polarizada en el plano que determina la posición de su cuerno (ambos cuernos, de transmisión y de recepción, deben estar paralelos para que la transferencia de la señal sea óptima).

El receptor tiene además un medidor que, para señales de baja amplitud (como es nuestro caso), da una lectura que es muy aproximadamente proporcional a la intensidad de la radiación incidente. Este medidor tiene cuatro rangos de medida que se pueden seleccionar a efectos de controlar su sensibilidad.

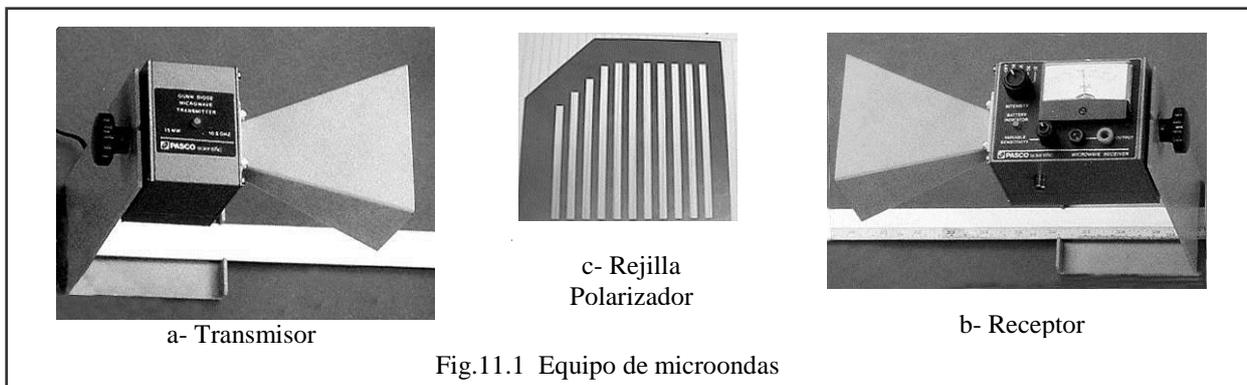
Objetivo

- Verificar la ley de Malus operando un sistema de radiación de microondas.

Equipamiento

Transmisor a- y receptor b- de microondas.

Dos goniómetros (instrumentos adosados al receptor y al polarizador).



Procedimiento

La onda que emite el transmisor está linealmente polarizada en la dirección que define su cuerno. El receptor solo detecta ondas polarizadas linealmente en la dirección que define su cuerno. La lectura  $M$  del medidor es directamente proporcional a la intensidad de la onda detectada.

Rotando axialmente el receptor, tomando lectura del medidor y de las respectivas posiciones angulares, se obtiene la información para comprobar la ley de Malus.

Disponer el equipo alineando el transmisor con el receptor.

Activar el transmisor.

Girar el receptor ubicando sus cuernos paralelos a los cuernos del transmisor.

Ajustar los controles del medidor de modo que su lectura  $M$  sea a fondo de escala.

Girar  $180^\circ$  el receptor en incrementos de  $\Delta\phi = 15^\circ$ , y construir tabla de valores de  $M - \phi$ .

Graficar  $M = f(\phi)$

¿Corrobora el gráfico lo expresado por la ley de Malus?

### Ejercicio complementario

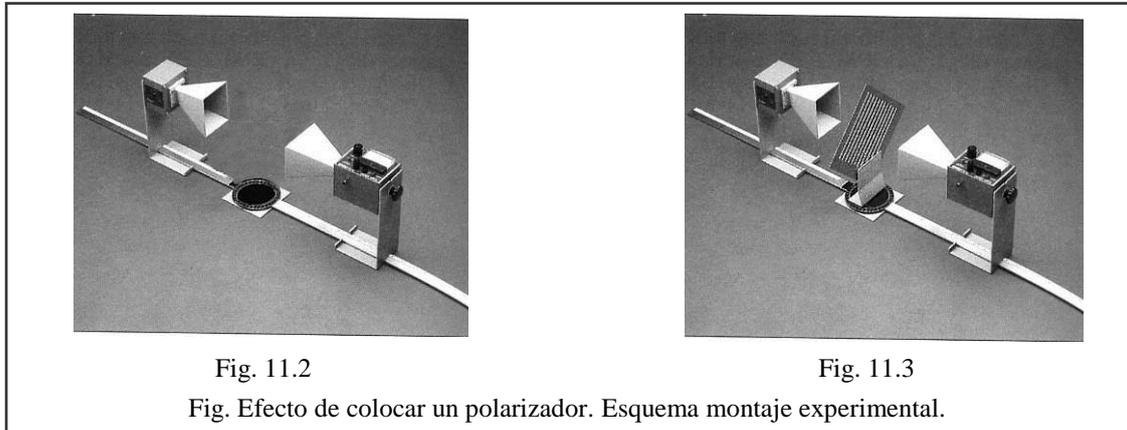
Objetivo

- Analizar el efecto de colocar un polarizador entre el transmisor y el receptor.

Procedimiento

Como polarizador utilizará la rejilla mostrada en la Fig. 11.1 c-.

Observar que el polarizador transmitirá ondas linealmente polarizadas en la dirección de su eje de polarización (dirección normal a las rejillas). Asimismo, que interesa el ángulo ( $\omega$ ) formado por el eje de polarización y la dirección de polarización del haz emitido por el transmisor.



#### Ensayo preliminar

Disponer el equipo como muestra la Fig. 11.2 y activar el transmisor. Observar que los cuernos (transmisor; receptor) están colocados mutuamente perpendiculares. ¿Cuál es la señalización del medidor?

Colocar el polarizador (rejilla) de manera que  $\omega = 45^\circ$ , como muestra la Fig. 11.3. ¿Cuál es la señalización del medidor?

#### Ensayo cuantitativo

Disponer el equipo ubicando paralelos los cuernos del transmisor, del receptor y el eje de polarización de la rejilla ( $\omega = 0^\circ$ ).

Activar el transmisor y ajustar los controles del medidor de modo que su lectura  $M$  sea a fondo de escala. Registrar esta lectura.

Modificar la posición del polarizador (rejilla) ubicándolo de manera que  $\omega = 45^\circ$  y posteriormente  $\omega = 90^\circ$ ; registrando las correspondientes lecturas del medidor.

Comparar entre si las tres lecturas registradas y explicar resultado con referencia al ángulo  $\omega$ .

### Experiencia 11.2

#### Ley de Malus. Luz natural.

Introducción. Luz natural.

Una lámpara común de filamento proporciona luz visible, no polarizada o natural; es decir su radiación comprende ondas linealmente polarizadas en todas las direcciones transversales posibles y de longitudes de onda de todo el espectro visible.

Para verificar la ley de Malus se requiere luz polarizada.

Para obtener luz polarizada a partir de luz natural, en la práctica, se utiliza un filtro "Polaroid".

#### Objetivo

- Verificar la ley de Malus operando un sistema óptico con luz natural.

Equipamiento

Banco óptico.

Artefacto con lámpara de filamento incandescente; suministra al sistema luz natural.

Polarizador: placa filtro "Polaroid" con indicación de su eje de polarización y limbo circular graduado, adosada al artefacto.

Analizador: placa filtro "Polaroid" con indicación de su eje de polarización y limbo circular graduado, con accesorios para montaje en banco óptico.

Fotómetro, incluido accesorios (fibra óptica y portaobjeto) para montaje en el banco.

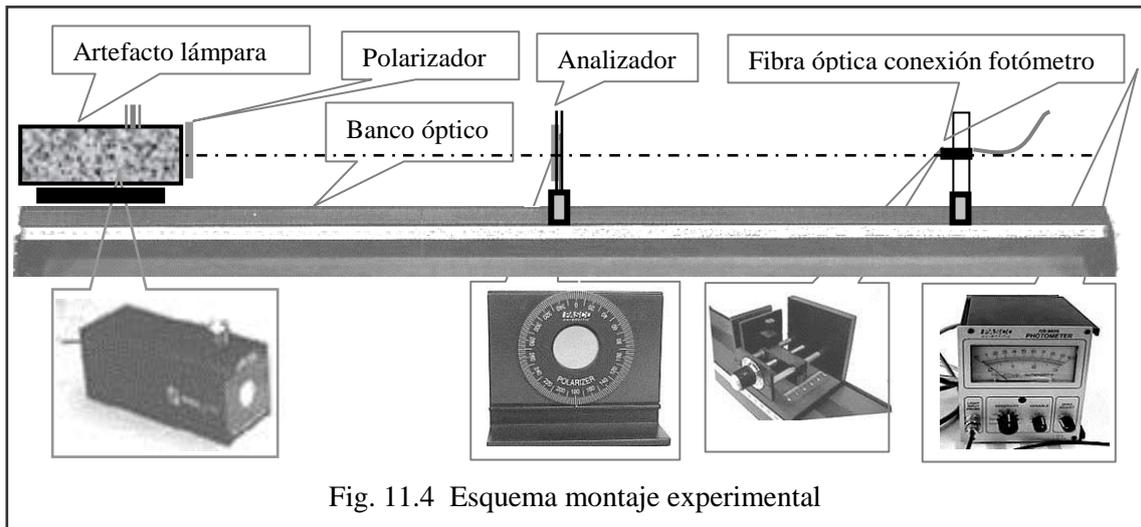


Fig. 11.4 Esquema montaje experimental

Procedimiento

Disponer los elementos como indica la Fig. 11.4. Controlar alineación de elementos, incluido extremo de la fibra óptica. Examinar el polarizador y el analizador ubicando en ellos sus respectivos ejes de polarización (o ejes de transmisión).

Rotar el analizador de modo que la posición angular de su eje de transmisión varíe, desde  $90^\circ$  hasta  $270^\circ$ , con respecto al eje del polarizador. Tomar intervalos de  $\Delta\phi = 10^\circ$ . Construir tabla de valores medidos con el fotómetro y correspondientes ángulos. Graficar.

¿Corresponde la gráfica a lo expresado por la ley de Malus?

¿Qué magnitud indica el fotómetro en su instrumento analógico?

¿Por qué podemos aseverar que, con las mediciones que proporciona este instrumento, podemos verificar la ley de Malus?

Experiencia 11.3

Ley de Brewster. Polarización por reflexión. Fuente láser.

Introducción: fuente láser

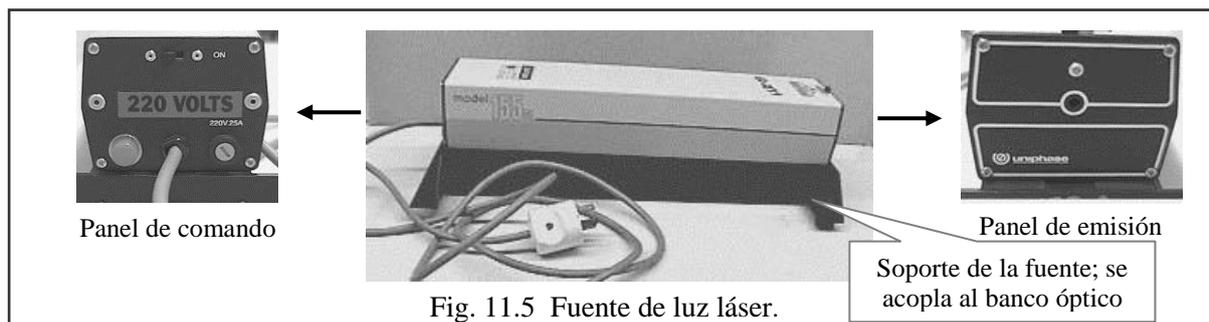


Fig. 11.5 Fuente de luz láser.

La fuente que disponemos es un láser de helio-neón (mostrado en la Fig. 11.5) que entrega un haz de ondas coherentes, de longitud de onda  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  (visible; rojo). En todos los trabajos que realizaremos utilizando esta fuente, la dispondremos en su soporte que se acopla al banco de óptica respectivo y la operación preliminar a todo ensayo será controlar la correcta alineación del haz (o sea de la fuente).

**NO MIRAR DIRECTAMENTE EL HAZ DE LUZ LÁSER**

Si bien la fuente que disponemos es de reducida potencia, puede producir daños en los ojos. En todos los ensayos y experiencias en que se utilizará esta fuente observaremos en una pantalla la figura de iluminación resultante de la incidencia del haz, interpretando así el resultado.

Objetivo

- Determinar el índice de refracción de una resina acrílica aplicando la ley de Brewster.

Equipamiento

Fuente de luz láser.

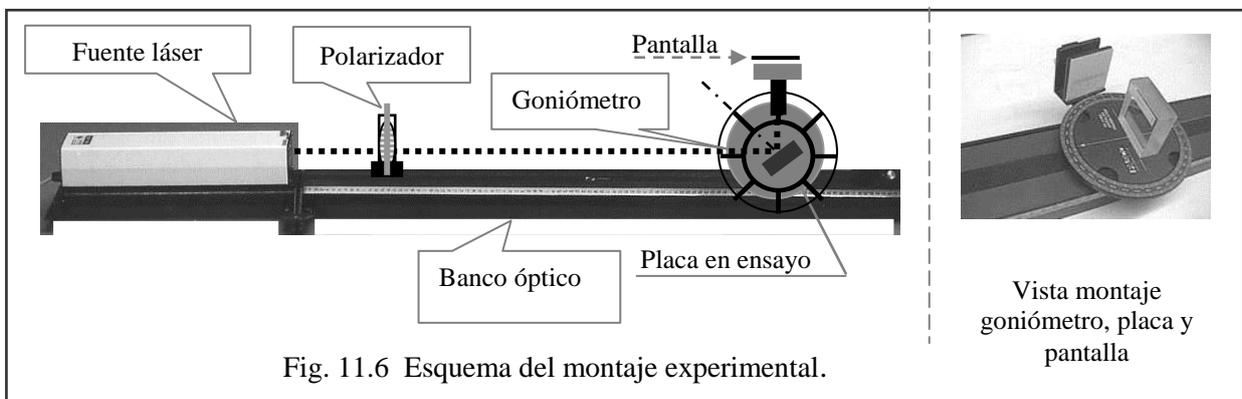
Banco óptico.

Goniómetro.

Polarizador (placa Polaroid) con accesorios para montaje en el banco e indicación de su eje de polarización.

Procedimiento

Preparar el equipo como indica la Fig. 11.6. Controlar alineación del láser.



Rotando el polarizador, verificar si la luz que entrega el láser está polarizada.

*¿Cuál sería el comportamiento a esperar en cada uno de los dos casos?*

Ubicar el polarizador para que polarice en el plano horizontal (eje  $0^\circ$ - $180^\circ$  horizontal).

Rotar la base del goniómetro hasta que la imagen reflejada sea mínima.

*¿Por qué es mínima?*

Mida el ángulo hallado  $\theta_p$ , y calcule  $n = \text{tg } \theta_p$ .

*¿Cuánto influye la indeterminación en la lectura del ángulo? ¿Por qué?*

*¿Qué hubiera sucedido si el polarizador se hubiera colocado para polarizar en el plano vertical? Verificar.*

## INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

### Introducción

La Fig. 11.7 muestra esquemáticamente el funcionamiento del interferómetro:

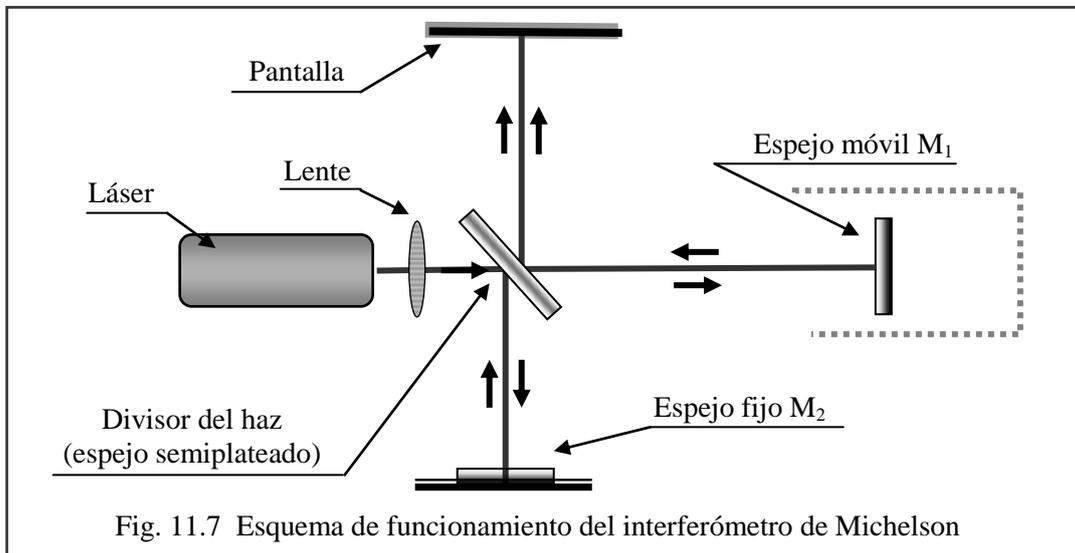


Fig. 11.7 Esquema de funcionamiento del interferómetro de Michelson

El haz de luz proveniente de un láser incide sobre un espejo semiplatado que refleja el 50 % de la luz incidente hacia un espejo fijo (ajustable)  $M_2$  y transmite el otro 50 % hacia un espejo móvil  $M_1$ . Ambos,  $M_1$  y  $M_2$ , reflejan la luz directamente hacia atrás, haciendo que retorne al espejo semiplatado.

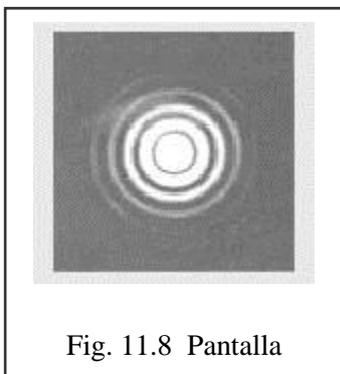


Fig. 11.8 Pantalla

El haz proveniente de  $M_1$  es reflejado hacia la pantalla, y el proveniente de  $M_2$  transmitido, también hacia la pantalla. Como ambos haces provienen de una única fuente (láser) mantienen una absoluta coherencia entre sí, y van a interferir al actuar simultáneamente sobre la pantalla. Si entre el láser y el espejo semiplatado colocamos una lente, el haz se dispersa, y de este modo lograremos que en la pantalla aparezca un patrón de interferencia formado por anillos circulares oscuros y brillantes, alternados, como indica la Fig. 11.8.

### Principio de funcionamiento

Moviendo el espejo  $M_1$  (ello es posible mediante un tornillo micrométrico), se modifica el camino que debe recorrer uno de los rayos. Puesto que ese camino es atravesado en dos oportunidades, al desplazar  $M_1$  una distancia  $\lambda/4$ , el camino óptico del rayo varió en  $\lambda/2$ . Esto hace que, donde antes teníamos un máximo de interferencia (anillo brillante), ahora tengamos un mínimo (anillo oscuro). Si movemos  $M_1$  una distancia adicional de  $\lambda/4$ , provocaremos un nuevo desplazamiento de las franjas y la apariencia de la imagen no se podrá distinguir de la original.

Moviendo lentamente el espejo  $M_1$  una distancia  $d_m$ , “pasarán”  $N$  franjas en el patrón de interferencia que estamos observando en la pantalla, y se cumplirá la relación:

$$2 d_m = N \lambda \quad (11.3)$$

Precauciones a tener en cuenta al operar el instrumento y hacer las mediciones; Llevar el tornillo micrométrico hasta 0, y después volverlo por lo menos hasta 1, e iniciar la medida a partir de esa posición, y **cuidando de girar siempre en el mismo sentido**. La no realización de ese giro previo, o el cambio de sentido en la rotación del tornillo se traducirá en un error importante, que invalidará la medición.

Contar un número grande de franjas (sugerencia: 50 por lo menos).

Ante una indeterminación, o falla en la cuenta, el error cometido es inversamente proporcional al número total de franjas contadas.

### Experiencia 11.4

#### Objetivo

- Comprobar la calibración del tornillo micrométrico del interferómetro

Equipamiento:

Interferómetro

Láser

Base para alineación del láser

Accesorios del interferómetro

Procedimiento:

La relación (11.3) vincula dos variables:  $\lambda$  y  $d_m$ , y nos permite calcular cualquiera de ellas a partir de la otra, contando N.

En nuestro caso, por disponer de una fuente láser cuya longitud de onda es perfectamente estable y conocida con mucha precisión ( $\lambda = 632,8$  nm), nos valdremos de la relación para determinar el desplazamiento  $d_m$ , verificando de ese modo la calibración del tornillo micrométrico.

### Experiencia 11.5

#### Objetivo

- Determinar el índice de refracción del aire.

Introducción

En el interferómetro de Michelson, el patrón de interferencia observado depende de la relación de fase entre los dos rayos interferentes. En la Exp. 11.4, se modificó esta relación desplazando uno de los espejos. En esta segunda experiencia, lograremos el mismo efecto modificando el camino óptico que recorre uno de los rayos, intercalando en su trayectoria una celda (tubo) y cambiando la presión del aire que ella contiene.

Para una onda de una frecuencia específica, la longitud de onda  $\lambda$  varía con la relación:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (11.4)$$

en donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda en el vacío, y n el índice de refracción del medio en el cual la onda se está propagando (aire en nuestro caso). Para el vacío, donde la presión es cero, n vale 1 y, para presiones razonablemente bajas, n varía linealmente con la presión.

Determinando experimentalmente la pendiente de esa relación lineal, es posible calcular el índice de refracción  $n$  a cualquier presión. Tal es el objetivo de esta experiencia.

Equipamiento

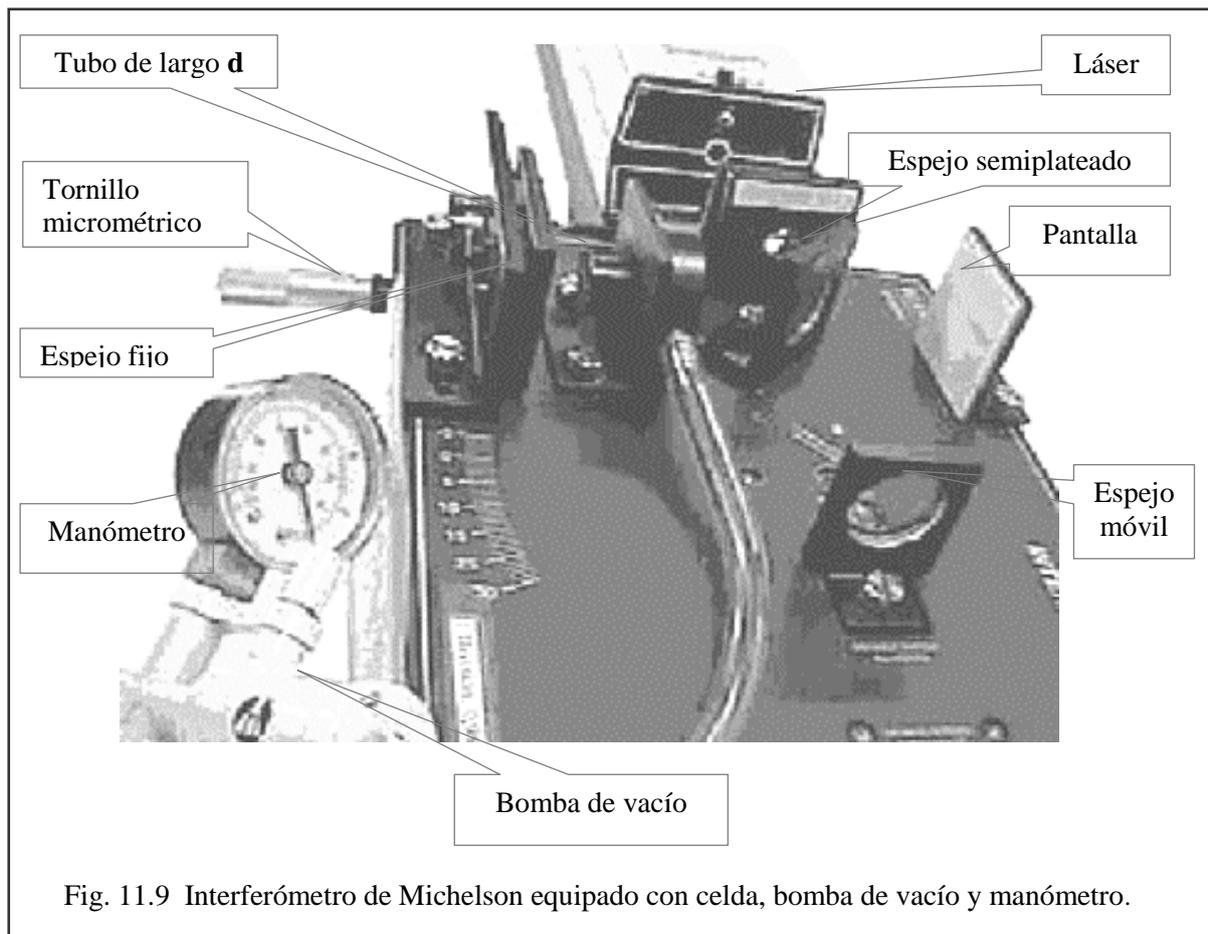
Interferómetro.

Láser.

Base de alineación del láser.

Accesorios del interferómetro.

Celda de vacío, con bomba y manómetro



### Procedimiento:

Al montaje básico del interferómetro se le agrega, en el camino del espejo fijo  $M_2$ , una celda para vacío (tubo de largo  $d$  conocido), equipada con bomba y manómetro, como muestra la Fig. 11.9.

Uno de los rayos que interfieren, atraviesa en su camino dos veces la celda de largo  $d$ . A la presión  $P_1$  “cabén” en ella  $N_1$  longitudes de onda:

$$N_1 = 2 \frac{d}{\lambda} = \frac{2d}{\frac{\lambda_0}{n_1}} = \frac{2d n_1}{\lambda_0}$$

A la presión  $P_2$ , después de hacer un vacío parcial en el tubo, esa cantidad habrá variado, y tendremos:

$$N_2 = \frac{2d n_2}{\lambda_0}$$

En donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del aire a las presiones  $P_1$  y  $P_2$  respectivamente, y  $\lambda_0$  es la longitud de onda utilizada en el vacío.

Al pasar de una situación a la otra, se podrán contar en la pantalla del interferómetro  $N$  franjas:

$$N = N_1 - N_2 = \frac{2d(n_1 - n_2)}{\lambda_0} \quad (11.5)$$

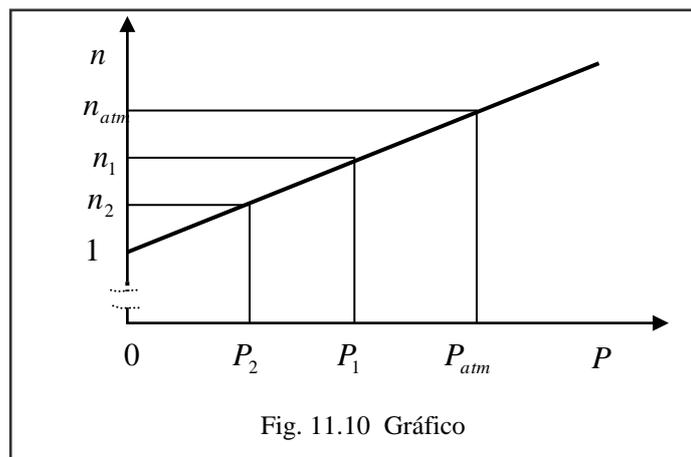
De donde

$$n_1 - n_2 = \frac{N \lambda_0}{2d} \quad (11.6)$$

Dividiendo miembro a miembro por  $(P_1 - P_2)$ :

$$\frac{n_1 - n_2}{P_1 - P_2} = \frac{N \lambda_0}{2d(P_1 - P_2)} \quad (11.7)$$

Si construimos un gráfico  $n = f(P)$ , esa sería la pendiente de la recta.



Y en definitiva:

$$n_{atm} = 1 + \frac{N \lambda_0 P_{atm}}{2d(P_1 - P_2)} \quad (11.8)$$

- La experiencia consiste en la determinación de los valores que intervienen en esta última relación; para esto:
- Partiendo del equipo montado como indica la figura, con una presión inicial  $P_1$ , ir accionando la bomba para hacer un vacío parcial en el tubo hasta llegar a un valor de presión final  $P_2$ .
- Los valores de  $\lambda_0$  (632,8 nm) y  $d$  (3,0 cm) son datos garantizados propios del equipo.
- Finalmente calcular el índice de refracción del aire a la presión  $P_{atm}$ .