Difracción & Interferencia

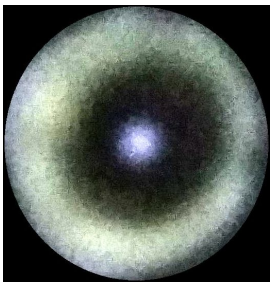
Número de Fresnel (y una breve "intro" de Difracción)

Se plantea la siguiente cuestión: ¿en que medida es posible "afinar" un haz de luz haciéndolo pasar por un orificio circular de diámetro (radio) **arbitrariamente** chico? Respuesta corta: no se puede reducir el diámetro del orificio arbitrariamente para "afinar" un haz de luz, debido al fenómeno de la **difracción**, inherente (intrínseco) a cualquier fenómeno de naturaleza ondulatoria como la luz.

Si imaginamos un haz de luz monocromático "cilíndrico" que incide normalmente sobre un diafragma que contiene un orificio, y si el orificio es lo "suficientemente chico", el haz de luz emergente del orifico se parecerá más bien un cono trunco. Si α es el angulo del vértice del cono trunco, y R el radio del orificio, existe una relación de proporcionalidad inversa entre α y R dada por:

$$\alpha \propto \frac{\lambda}{R}$$

siendo λ la longitud de onda. De la relación anterior se deduce que cuanto menor es R (el orificio se achica), tanto más se "abre" el haz emergente (mayor α). La imposibilidad de no poder "afinar" un haz de luz todo lo que se quiera (arbitrariamente), como ya se mencionó es debido a la difracción que se origina por la "mutilación" del frente de onda que incide sobre el orificio. Más aún, al hacer pasar un haz de luz (por ejemplo de linterna) por un orificio hecho con un alfiler (un "pin hole") sobre una hoja de papel de aluminio, la imagen del orificio proyectada sobre la pared (pantalla), produciría un **patrón de difracción**[1] como el que se muestra a continuación, formado por una mancha luminosa circular, rodiada por un anillo oscuro, seguido por otro anillo claro.



Pero, ¿qué es la difracción? Como respuesta "rápida, pintoresca y **provisoria**", es el fenómeno por el cuál la luz "dobla la esquinas (bordes)" de los cuerpos que se interponen en su propagación. Mas rigurosamente: **la difracción es la desviación de la propagación de la luz en discrepancia con lo predicho por la Óptica Geométrica**. Es decir, la luz cuando pasa por una abertura no se "corta" como establece la Óptica Geométrica.

De hecho, la difracción de luz se puede producir en el **vacío** más completo: ¡¡¡sin obstáculos!!!, sin materia, y por ende, sin cambios en la velocidad de propagación debido a las discontinuidades de índices de refracción, como si son necesarias para la existencia de la refracción y la reflexión, como ocurre cuando la luz pasa por ejemplo de aire a vidrio: dos medios materiales transparentes con distintos índices de refracción. Es decir, la difracción es la tercera, o mejor dicho, la primera, la más esencial y fundamental forma que tiene la luz de "autodesviarse" por su propia naturaleza ondulatoria. Por ahora, dejamos en pausa la difracción.

[1] Difracción de Airy, donde a la mancha central se le denomina disco de Airy.

El número de Fresnel es una referencia adimensional (sin unidades), que establece un límite de validez a la Óptica Geométrica (OG), donde los efectos de la difracción son **imperceptibles**: el número de Fresnel es como un "indicador" del "grado de difracción" producido por el borde de la abertura por la que emerge el haz de luz.

Asumiendo que la incidencia del haz de luz monocromática con longitud de onda λ, con relación al orificio de radio R es **normal** ($\theta_i = 0°$), en tal caso, el número de Fresnel (N_F) se da por:

$$N_F = \frac{R^2}{\lambda L}$$

siendo L la distancia entre el centro del orificio, y su proyección sobre una pantalla paralela al plano del orificio.

El criterio aceptado es el siguiente:

- $N_F \gg 1$ (típico: $N_F > 10$): **Dominio de la Óptica Geométrica (OG)**. Los rayos tal como se definen en la OG, viajan en línea recta y las sombras son nítidas. Los efectos de difracción no son perceptibles ("están", pero no se notan).
- $N_F \approx 1$: **Zona de transición** entre la Óptica Geométrica y la Óptica Ondulatorio. Los efectos de difracción comienzan a ser perceptibles.
- $N_F \ll 1$: **Dominio de la Óptica Ondulatoria (OO)**. La difracción es clara; el haz de luz se abre ampliamente y el concepto de "rayo" de la OG pierde sentido.

A modo de ejemplo de como se utiliza el criterio, sirvan los siguientes:

1. Consideremos luz de láser ($\lambda = 500\,\text{nm} = 5{,}0 \times 10^{-7}\,\text{m}$) incidiendo normalmente sobre un diafragma con un orificio de alfiler (pin hole) con radio $R = 0{,}1\,\text{mm} = 1{,}0 \times 10^{-4}\,\text{m}$. Si la pantalla de observación se ubica una distancia $L = 5\,\text{m}$ del centro de la abertura y paralela a su plano, el número de Fresnel vale:

   $$N_F = \frac{R^2}{\lambda L} = \frac{(1{,}0 \times 10^{-4}\,\text{m})^2}{5{,}0 \times 10^{-7}\,\text{m} \cdot 5\,\text{m}} = 0{,}04 \ll 1 \quad \text{cae dentro del dominio de la OO.}$$

   Aun si la incidencia es perfectamente normal, sobre la pantalla no se verá un punto pequeño (como predeciría la OG), sino un patrón de Airy: un disco central brillante rodeado de anillos concéntricos mucho más grande que la propia abertura, es decir, difracción en todo su "esplendor".

2. Ahora como fuente de luz consideremos una linterna que también emite luz verde ($\lambda = 5{,}0 \times 10^{-7}\,\text{m}$). La luz que emerge de la linterna atraviesa la abertura circular de la propia linterna con radio $R = 2{,}5\,\text{cm} = 0{,}025\,\text{m}$, en incide sobre la misma pantalla del ejemplo anterior. En este caso el número de Fresnel se da por:

   $$N_F = \frac{R^2}{\lambda L} = \frac{(0{,}025\,\text{m})^2}{5{,}0 \times 10^{-7}\,\text{m} \cdot 5\,\text{m}} = 250 \gg 1 \quad \text{cae dentro del dominio de la OG.}$$

   En la pared se verá un círculo de luz perfectamente definido. No hay anillos de difracción ni bordes borrosos causados por la naturaleza ondulatoria. Se pueden dibujar rayos rectos tal como se entienden en la OG, desde la linterna hasta la pared sin error apreciable.

A continuación otros ejemplos que pueden servir de referencia.

Tipo de abertura	**Tamaño de abertura**	N_F	**Comportamiento de la luz**
Ventana abierta	del orden de los metros	10^6	Sombra nítida, no se percibe difracción (en dominio de OG).
Linterna / Lente	del orden de los centímetros	entre 10^2 y 10^3	Imagen nítida, no se percibe difracción (en domino de OG).
Agujero de aguja "gruesa"	del orden de milímetros	≈ 1	Bordes borrosos, "difracción débil" (en transición de OG a OO).
Corte de trincheta / pin hole	del orden de decimas de milímetros en adelante	$< 0{,}1$	Dispersión total, "difracción fuerte" (en dominio de OO).

Principio de Babinet

La difracción se puede observar tanto haciendo pasar luz por una abertura o interponiendo un objeto en su propagación. El **principio de Babinet** establece que la onda difractada por una abertura, se relaciona con la onda difractada por el complemento (tapón) de la abertura. Dicho de otra forma: si se conoce la onda difractada por una abertura, se conoce también la difractada por el "tapón" y recíprocamente. En clase se demostró con una ranura estrecha y con un pelo tenso (el "tapón" de la ranura).

Trenes de ondas, tiempo de coherencia, y longitud de coherencia

A continuación se representa esquemáticamente una onda monocromática, un color una frecuencia, por lo que su ancho de banda es $\Delta f = 0$.



Es una onda que se extiende de $-\infty$ a $+\infty$ y su duración es infinita: abarca pasado presente y futuro. Es una **onda matemática** que carece de realidad física. Su valor radica en que "sumando" una infinidad de ellas, una serie de Fourier, se puede obtener ondas reales: trenes de ondas. A continuación representado esquemáticamente.



Los trenes de ondas si tienen un ancho de banda distinto de cero ($\Delta f \neq 0$). Dentro de este ancho de bandas, están todas la frecuencias de todas las componentes monocromáticas, tiene inicio y fin, y duración. Cuando se habla de luz monocromática, se hace referencia a un tren de ondas con un **ancho de banda muy estrecho**, es decir, la menor y la mayor de las frecuencias, f_m y f_M respectivamente, que definen el ancho de banda Δf, están **muy próximas entre sí**, siendo f la frecuencia central del ancho de banda, y que es la frecuencia "representativa" del tren de ondas

"monocromático". Así, cuando se trata de un tren de ondas "monocromático", debe cumplirse la siguiente desigualad:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_M - f_m}{f} \ll 1$$

Cada componente monocromática que forma el tren de ondas tiene su correspondiente fase que varía en el tiempo. El **tiempo de coherencia** τ del tren de ondas, es el tiempo necesario para que la componete monocromática de mayor frecuencia f_M que forma dicho tren de ondas, tenga una diferencia de fase de aproximadamente 2π radianes, con la componente del tren de ondas de menor frecuencia f_m, lo que matemáticamente se expresa como:

$$\tau \cong \frac{2\pi}{\Delta\omega}$$

de donde se deduce que:

$$\tau \cong \frac{1}{\Delta f}$$

La **longitud de coherencia** ℓ del tren de ondas, que no debe confundirse con la longitud de onda, nos da una idea de lo largo o corto que dicho tren de ondas. En el vacío o en el aire, la longitud de coherencia se vincula con el tiempo de coherencia τ mediante la ecuación:

$$\ell = c \cdot \tau$$

A continuación algunos ejemplos de fuentes luminosas que pueden servir de referencia.

Fuente de luz	$\cong \tau$	$\cong \ell$
Lámpara de sodio (con filtro)	$\approx 10^{-9}$ s	≈ 30 cm
LED rojo	entre $\approx 10^{-13}$ s y $\approx 10^{-12}$ s	$\approx 0{,}1$ mm
Láser He-Ne estabilizado	10^{-6} s o más	≈cientos de m

donde el símbolo $\approx$ se entenderá como "del orden de".

Observar que para una onda monocromática, al ser su ancho de banda $\Delta f = 0$, implica, según las ecuaciones anteriores, que su tiempo y su longitud de coherencia son infinitos ("$\tau = \infty$ y $\ell = \infty$").

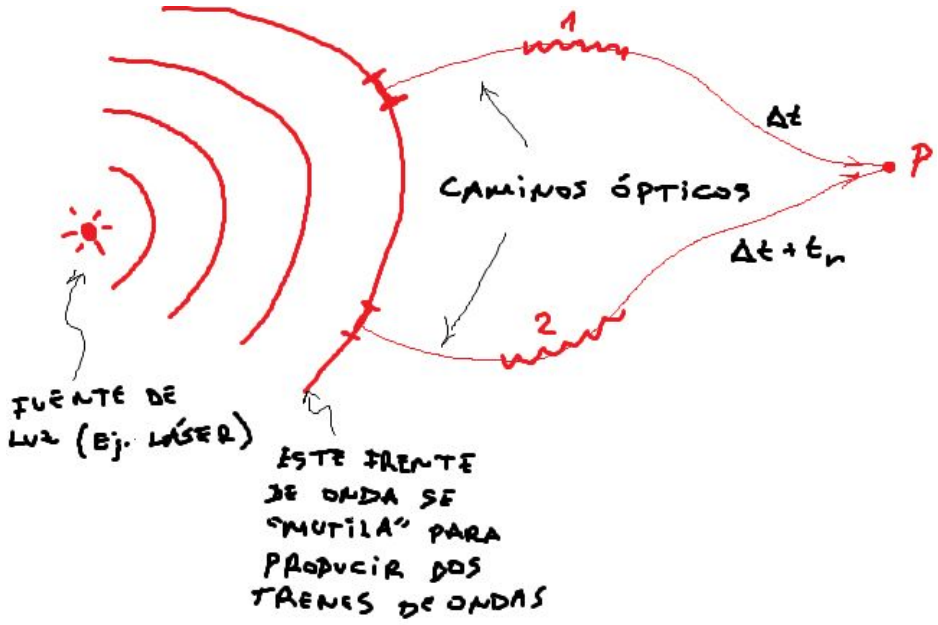
Un tren de ondas es una onda real con su correspondiente fase, que no debe confundirse con las fase simple de cualquiera de sus componentes monocromáticas del "tipo" $\omega t - kx + \varphi$ vista anteriormente. Sea ϕ_1 la fase correspondiente al tren de ondas 1, y ϕ_2 la correspondiente al tren de ondas 2. Por lo tanto, la diferencia $\Delta\phi$ entre las fases de cada tren de ondas se da por:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$$

En tal caso diremos que estos dos trenes de ondas son coherentes, si $\Delta\phi$ se mantiene constante en el tiempo, con total independencia de como varíen en el tiempo las fases individuales ϕ_1 y ϕ_2.

Interferencia entre ondas luminosas

Interferir dos o más ondas, es hacer que se superpongan cumplido ciertas condiciones rigurosas simultáneamente. La idea básica se ilustra y se explica con ayuda del siguiente dibujo esquematizado.



En el dibujo, de alguna manera, un frente de onda se "mutila" en dos sectores distintos, dando origen cada uno de estos "pedacitos mutilados" del frente, a dos **trenes de ondas**. Cada tren de onda para llegar a un punto P recorre cierto **camino óptico**, uno más largo que el otro. Suponiendo para fijar ideas que el camino óptico recorrido por el tren 1 es el más corto de los dos. Ahora, al existir una **diferencia entre los caminos ópticos**, el tren de ondas 1 llegará al punto P antes que el tren 2. Dicho esto, debe existir un tiempo de retraso t_r, es decir, si al tren 1 le toma un tiempo Δt en recorrer su camino óptico hasta llegar a P, al tren 2 recorrer su camino óptico hasta llegar a P, le tomará un tiempo mayor: $\Delta t + t_r$.

Hasta aquí la interferencia entre los trenes que llegan a P no esta asegurada, ya que como se mencionó al principio, se tienen que cumplir estrictas condiciones para que el fenómeno tenga lugar. Estas condiciones "**optimas**" para que el fenómeno sea estable en el tiempo, es decir, sin fluctuaciones que compliquen o hagan imposible su observación, son las siguientes:

1. Los trenes de ondas interferentes tienen el mismo estado de polarización (polarización lineal).
2. Sus frecuencias "centrales" son estrictamente iguales ($f_1 = f_2$, o $\omega_1 = \omega_2$).
3. Los trenes de ondas son emitidos por la misma fuente luminosa, para asegurar la coherencia entre ellas.
4. El tiempo de retardo (t_r) entre un tren de ondas y el otro, debe ser mucho menor al tiempo de coherencia, es decir:

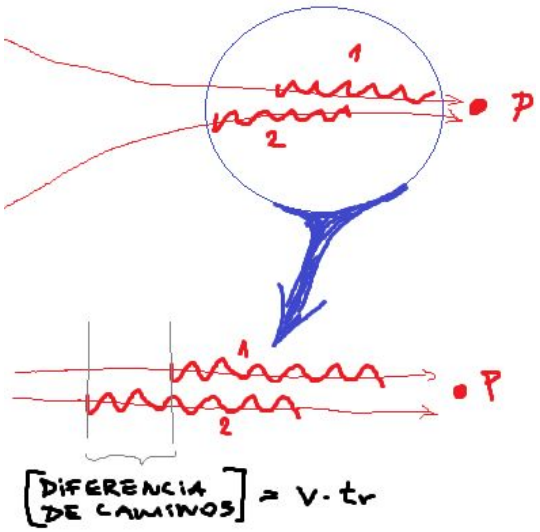
$$t_r \ll \tau$$

o equivalentemente:

$$c \cdot t_r \ll c \cdot \tau = \ell$$

siendo $c \cdot t_r$ igual a la **diferencia entre los caminos ópticos**.

En el siguiente dibujo esquematizado se representa a los dos trenes de ondas que llegan a P en condiciones de interferencia.

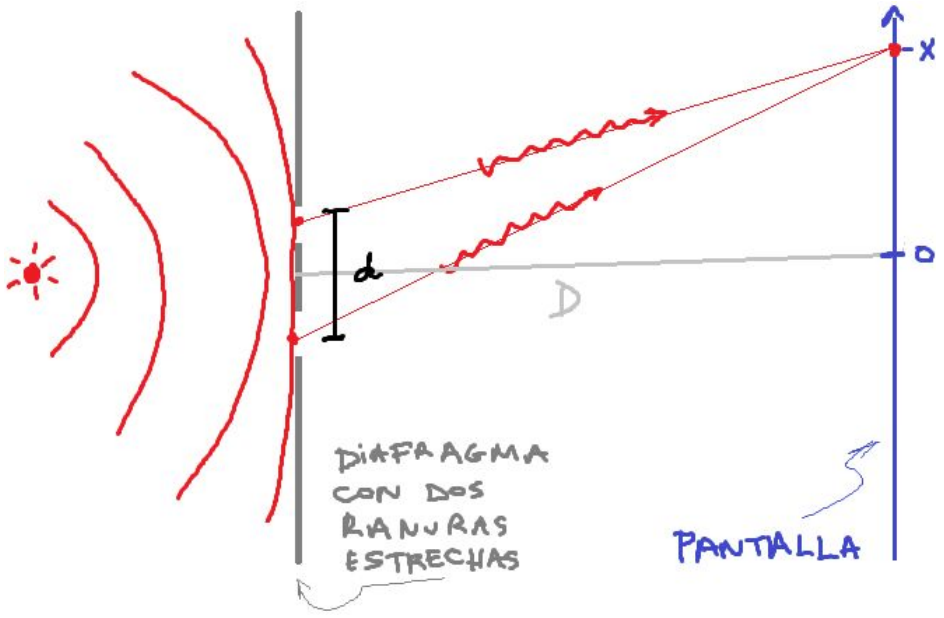


Observar que la longitud de coherencia (el largo de los trenes) es mayor a la diferencia de caminos ópticos.

Algo a tener en cuenta es que, cuanto menor el el ancho de banda Δf de los trenes de ondas (más "parecido" a una onda monocromática), tanto mayor será la longitud de coherencia (más "largos" serán los trenes), y por lo tanto, mayor será la probabilidad de producirse una interferencia estable (= observable) en el tiempo.

Interferencia de la doble rendija (experimento de Young)

A continuación se muestra esquemáticamente un interferómetro de tipo Young de doble rendija (aunque puede haber más de dos). Para "mutilar" el frente de onda procedente de una fuente de luz de alta coherencia[2], se lo hace incidir normalmente desde la izquierda sobre un diafragma que contiene dos rendijas iguales y próximas, enfrentadas entre sí, y muy **estrechas**.

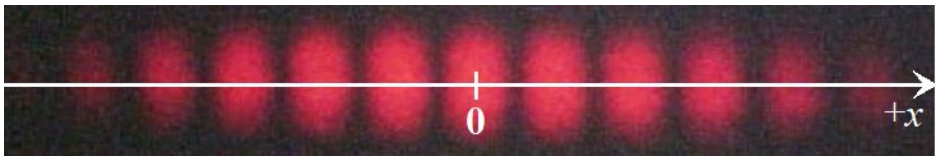


[2]Como un láser.

Por cada rendija emergen un tren de ondas, cuyo caminos ópticos son rectos y dirigidos desde el centro de la rendija hasta el punto de "encuentro" situado sobre una pantalla (como por ejemplo, la pizarra del salón). Todo el montaje se "ve desde arriba".

La distancia entre el diafragma y la pantalla es D, la distancia entre los centros de las rendijas es d, y x representa la distancia entre O y el punto de encuentro.

Sea λ la longitud de onda asociada a la componente monocromática "central". Asumiendo que hay interferencia entre los trenes de ondas, sobre la pantalla se observará la característica **figura de interferencia** para esta configuración.



La distribución de la intensidad de la luz se da por la ecuación:

$$I(x) = 2I_0\left[1 + \cos\left(\frac{2\pi \cdot d \cdot x}{\lambda \cdot D}\right)\right]$$

donde los máximos de intensidad de luz se producen en las posiciones x_M (sobre el eje x, la "regla" sobre la pantalla):

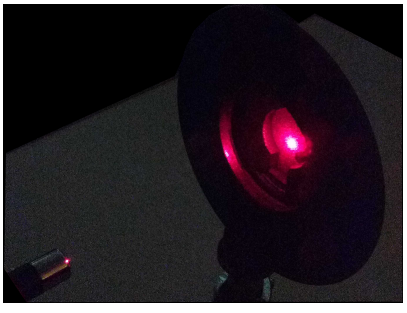
$$x_M = \frac{m \cdot \lambda \cdot D}{d} \quad \text{siendo:} \quad m = 0,\ \pm 1,\ \pm 2 \ldots$$

y los mínimos, x_m:

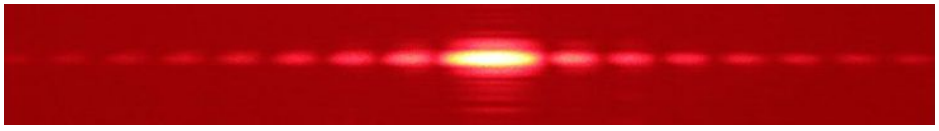
$$x_m = \frac{(2m+1) \cdot \lambda \cdot D}{2 \cdot d} \quad \text{siendo:} \quad m = \pm 1,\ \pm 2 \ldots$$

Lo que quedó en el tintero (haciendo los honores)

Producir difracción con un puntero láser que se puede comprar en un kiosko, haciendo pasar su haz por una ranura estrecha como se ve en la siguiente foto...



para obtener el siguiente patrón de difracción proyectado sobre una pantalla, parece hoy día ser algo fácil de realizar, pero antes de láser no lo era tanto.



Notar la similitud con la figura de interferencia obtenida para dos rendijas.

Ahora, otra cosa muy distinta es explicar el fenómeno de la difracción. El primer intento lo hizo Huygens en 1678 (contemporáneo con Newton), con el principio que hoy día lleva su nombre. Este principio puramente geométrico[3], fue concebido para explicar el fenómeno de difracción, y permite predecir como se formaran los posteriores frentes de ondas partiendo de uno. El principio establece que cada punto del frente de onda originario se comporta como un emisor de ondas, cuyos frentes de ondas son casquetes esféricos orientados localmente en la dirección y en el sentido de propagación de la onda. Una debilidad del principio, es que no explica porque los correspondientes casquetes esféricos que avanzarían en sentido contrario a la progresión de la onda no existen. La explicación de la no existencia de estos casquetes esféricos esta **vinculada al fenómeno de interferencia**, mejoría introducida bastante tiempo después por Fresnel en 1818. Esta hazaña se conoce como el Principio de Huygens-Fresnel. Kirchhoff en 1892 propone por primera vez la teoría **escalar** de la difracción sirviendo de marco teórico al Prncipio de Huygens-Fresnel. La teoría propuesta por Kirchhoff no era perfecta por lo que recibió mejorías y ampliaciones varias por Poincaré (1892), Sommerfeld (1894), y Robinowich (1929)... ¡¡¡y hubo que esperar hasta 1979 para disponer de la teoría **vectorial** de la difracción!!!, la que esta lejos de ser "moco de pavo".

Finalmente decir que de todo lo dicho, no existe una diferencia fundamental entre la difracción y la interferencia. Diremos que se produce interferencia cuando se tiene un número finito de fuentes discretas y coherentes entre sí; y hablamos de difracción cuando se tiene una distribución continua de fuentes coherentes entre sí.

[3]Huygens desconocía que la luz era una onda electromagnética entre muchas otras cosas relacionadas al fenómeno. La física en su tiempo estaba en pañales.