

Inspira Crea Transforma

FENÓMENOS ONDULATORIOS

Presentado por:
Mariana Escobar Q.
Cristóbal Trujillo R.
Juan S. Cárdenas R.
David Plazas E.

Profesor: Msc. Alejandro Madrid S.

Física II
Departamento de Ciencias Físicas
Escuela de Ciencias
Universidad EAFIT
2018

CONTENIDO

- 1. OBJETIVOS
- 2. CONCEPTOS
- 3. JAULA DE FARADAY
- 4. REFLEXIÓN
- 5. REFRACCIÓN
 - 5.1 Concepto
 - 5.2 Índice de Refracción
 - 5.3 Ley de Snell
- 6. POLARIZACIÓN
 - 6.1 Ondas Linealmente Polarizadas
 - 6.2 Dirección de Polarización
 - 6.3 Filtros Polarizadores
 - 6.4 Ley de Malus
- 6.5 Polarización por Reflexión
- 7. INTERFEROMETRÍA
 - 7.1 Introducción
 - 7.2 Interferencia Constructiva y Destructiva
 - 7.3 Interferómetro de Michelson
 - 7.4 Aplicaciones
- 8. DIFRACCIÓN
 - 8.1 Concepto
 - 8.2 Patrón de Difracción
 - 8.3 Enfoques
 - 8.4 Experimento de una Rendija
 - 8.5 Experimento de Young
 - 8.6 Difracción de Rayos X

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OBJETIVOS

1. OBJETIVOS

- ▶ Introducir a los diferentes fenómenos e interacciones de las ondas electromagnéticas a través de teoría y experimentos.
- ▶ Dar una idea acerca de las aplicaciones actuales de los fenómenos e interacciones de las ondas electromagnéticas.

CONCEPTOS

2. CONCEPTOS

2.1

- ▶ **Onda electromagnética:** Son ondas que no necesitan un medio para propagarse. Están compuestas de un campo magnético y uno eléctrico, ortogonales entre sí.
- ▶ **Longitud de onda (λ):** Distancia recorrida en un periodo.
- ▶ **Frente de onda:** Planos en los que el campo magnético y eléctrico son constantes.
- ▶ **Luz visible:** Intervalo del espectro electromagnético de λ entre 400nm y 750 nm. Para el caso de reflexión y refracción se considera como un haz, pero también funciona para el modelo ondulatorio.
- ▶ **Ángulo de incidencia:** Ángulo con el que llega la onda al objeto de estudio. Se mide desde la normal a éste.
- ▶ **Imagen virtual:** Es la imagen formada cuando los rayos salientes divergen.

JAULA DE FARADAY

3. JAULA DE FARADAY

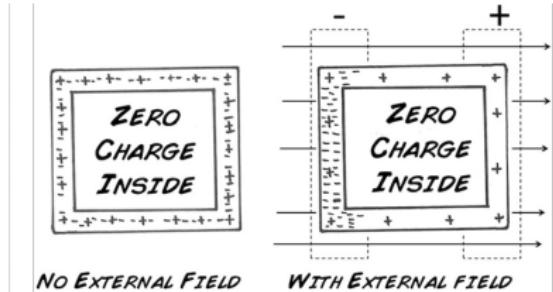


Figura 1. Faraday - Jaulas de Faraday.

REFLEXIÓN

4. REFLEXIÓN

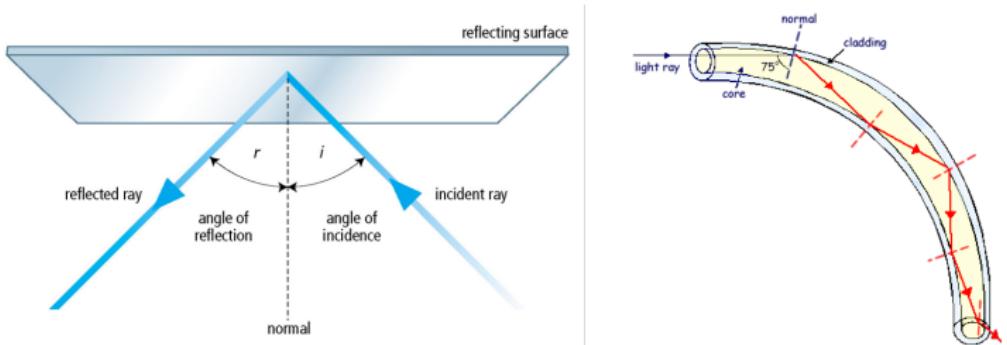


Figura 2. Reflexión.

REFRACCIÓN

5. REFRACCIÓN

5.1 Concepto

- ▶ Cuando una onda electromagnética pasa de un medio a otro, se desvía respecto al ángulo incidente.
- ▶ Puede ocurrir al mismo tiempo que la reflexión^I.

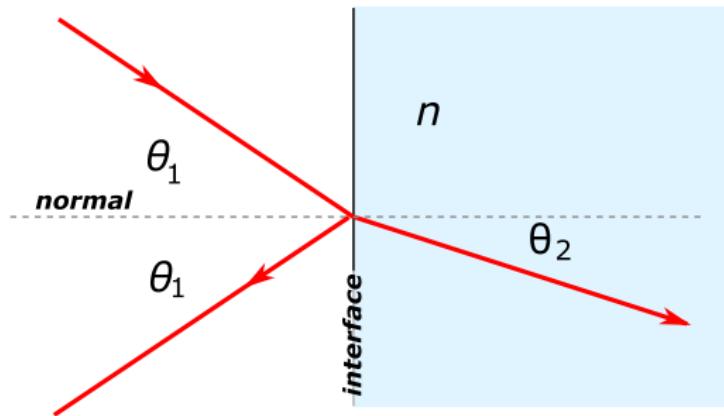


Figura 3. Reflexión y refracción^{II}.

5. REFRACCIÓN

5.2 Índice de Refracción

Razón entre la rapidez de la luz en el vacío c y la rapidez en un material v .

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

La luz siempre viaja *más lento* en un material que en el vacío¹.

Tabla 1. Índices de refracción para diferentes materiales.

Material	Índice de Refracción (n)
Vacío	1
Aire	1,0002926
Etanol	1,361
Agua	1,3330
Diamante	2,419
Ámbar	1,55
Hielo	1,31
Córnea humana	1,3375

5. REFRACCIÓN

5.3 Ley de Snell

1. Rayo incidente, reflejado, refractado y la normal están todos en un mismo plano. Plano ortogonal a la superficie que limita los medios.
2. Razón entre los sin de los ángulos incidente y refractado es igual al inverso de los índices de refracción:

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \longrightarrow n_b \sin \theta_b = n_a \sin \theta_a \quad (2)$$

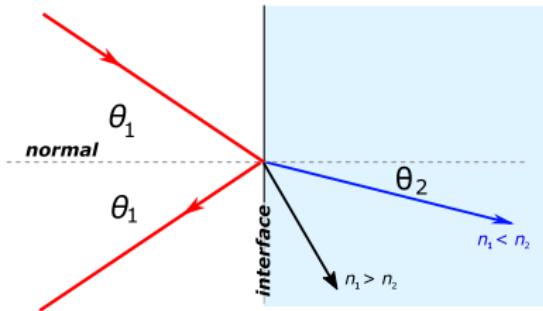


Figura 4. Relación entre índice de refracción y el ángulo.

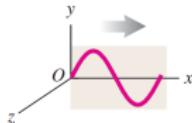
POLARIZACIÓN

6. POLARIZACIÓN

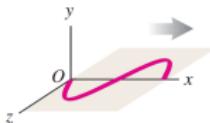
6.1 Ondas Linealmente Polarizadas

Cuando una onda tiene desplazamientos sólo en una dirección, se dice que está linealmente polarizada en esa dirección.

a) Onda transversal linealmente polarizada en la dirección y



b) Onda transversal linealmente polarizada en la dirección z



c) La ranura funciona como filtro polarizador dejando pasar solamente los componentes polarizados en la dirección y.

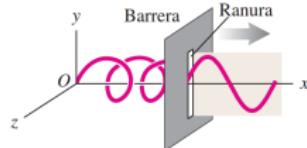


Figura 5. Ondas linealmente polarizadas¹.

6. POLARIZACIÓN

6.2 Dirección de Polarización

Siempre se define la dirección de polarización de una onda electromagnética como la dirección del vector de campo eléctrico **E**.

$$\vec{E}(x, t) = \hat{j} E_{max} \cos(kx - \omega t) \quad (3)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{k} B_{max} \cos(kx - \omega t) \quad (4)$$

6. POLARIZACIÓN

6.3 Filtros Polarizadores

El filtro Polaroid incorpora sustancias que presentan dicroísmo, la absorción selectiva en la que una de las componentes polarizadas se absorbe con mucha más intensidad que la otra. Transmite el 80 % o más de la intensidad de una onda que esté polarizada en forma paralela a cierto eje en el material, llamado eje de polarización, pero sólo el 1 % o menos de las ondas polarizadas perpendiculares a ese eje¹.



(a) Antenas telecomunicaciones^{II}.



(b) Bombilla^{III}.

6. POLARIZACIÓN

6.3 Filtros Polarizadores

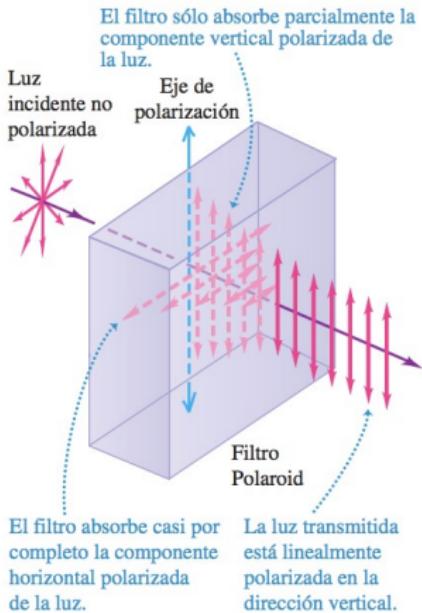


Figura 7. Filtro polarizador¹.

6. POLARIZACIÓN

6.4 Ley de Malus



La luz incidente es una mezcla aleatoria de todos los estados de polarización, las componentes paralela y perpendicular al eje de polarización son iguales en promedio, por lo que sólo se transmite la mitad de la intensidad incidente¹.

6. POLARIZACIÓN

6.4 Ley de Malus

ϕ es el ángulo entre los ejes de polarización del polarizador y el analizador.

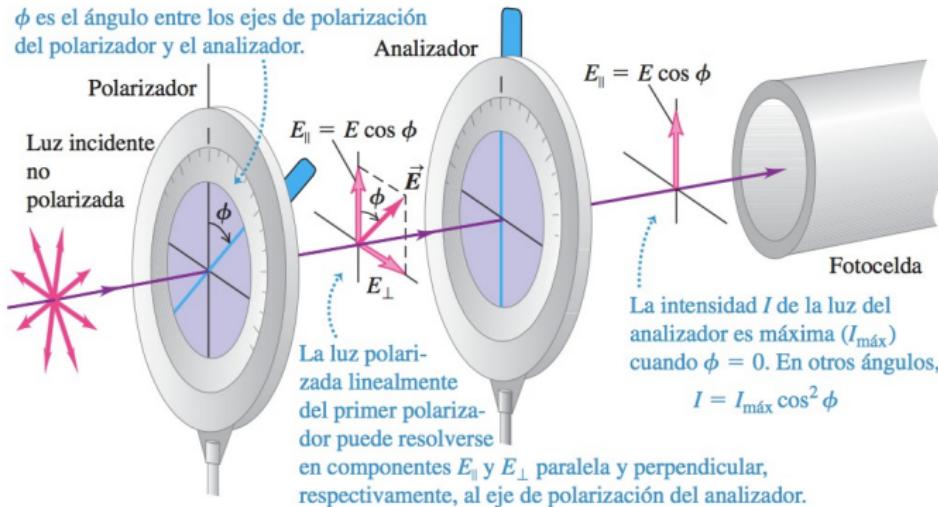


Figura 8. Intensidad de luz polarizada¹.

6. POLARIZACIÓN

6.4 Ley de Malus

Para determinar la intensidad de la luz que sale del analizador debemos saber que la intensidad de una onda electromagnética es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda.

$$\begin{aligned} I &= S_{med} = \frac{E_{max} B_{max}}{2\mu_0} = \frac{E_{max}^2}{2\mu_0 c} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_{max}^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{max}^2 \end{aligned} \tag{5}$$

La razón entre la amplitud transmitida y la incidente es $\cos \phi$, por lo que la razón entre la intensidad transmitida y la incidente es $\cos^2 \phi$. Así, la intensidad de la luz transmitida a través del analizador es¹:

$$I = I_{max} \cos^2 \phi \tag{6}$$

6. POLARIZACIÓN

6.5 Polarización por Reflexión

En 1812 el científico británico Sir David Brewster descubrió que cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de polarización θ_p , el rayo reflejado y el rayo refractado son perpendiculares entre sí.

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a} \quad (7)$$

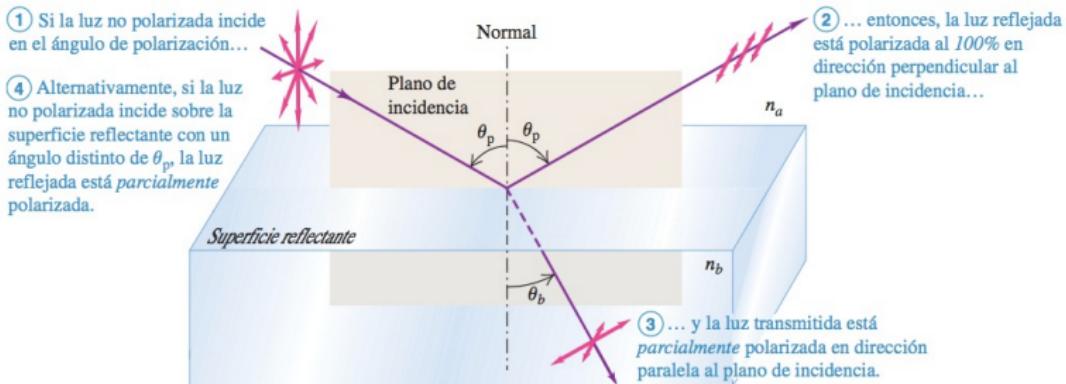


Figura 9. Ley de Brewster para el ángulo de polarización¹.

¹ Sears and Zemansky, *Física Universitaria*, 13th ed. Pearson, 2009, vol. 2.

INTERFEROMETRÍA

7. INTERFEROMETRÍA

7.1 Introducción

¿Qué ocurre cuando dos ondas del mismo tipo se encuentran?

<https://www.youtube.com/watch?v=1PuzdU2RvW8>

<https://www.youtube.com/watch?v=faAPLf7yPkI>

7. INTERFEROMETRÍA

7.2 Interferencia Constructiva y Destructiva

Para interferencia constructiva:

$$\Delta x = m\lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2\dots \quad (8)$$

Para interferencia destructiva:

$$\Delta x = \frac{m\lambda}{2}, m = 1, 3, 5\dots \quad (9)$$

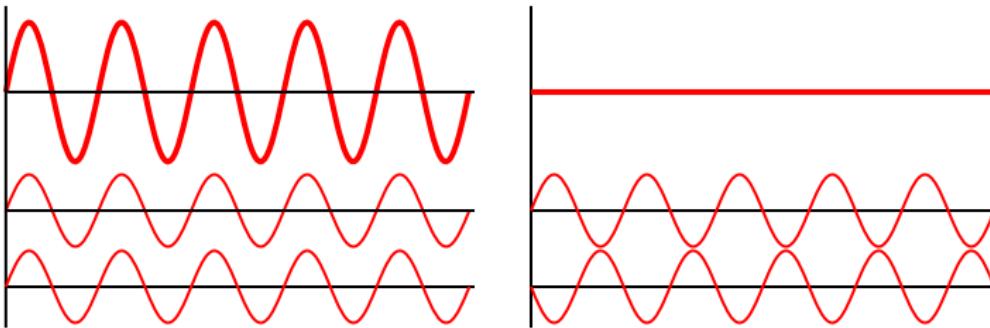


Figura 10. Interferencia entre ondas¹.

¹ Wikimedia. (2006) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Interference_of_two_waves.png

7. INTERFEROMETRÍA

7.3 Interferómetro de Michelson

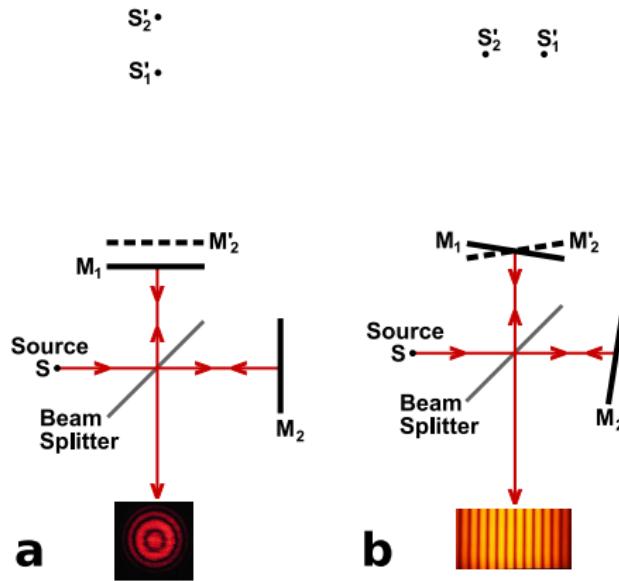


Figura 11. Interferómetro de Michelson¹.

7. INTERFEROMETRÍA

7.4 Aplicaciones

Medición de Ondas Gravitacionales

Este interferómetro, en conjunto con cavidades de Fabry-Perot, permitió a LIGO medir la existencia de ondas gravitacionales en el 2015¹.

Experimento de Michelson-Morley

En 1920, Michelson y Morley intentaron demostrar la existencia del éter por medio de esta configuración. Sin embargo, no se logró demostrar su existencia.

https://ligo.caltech.edu/system/video_items/files/21/Einsteins_messengers_hi_res_Nov_17_MPEG720p.mp4?1447873693

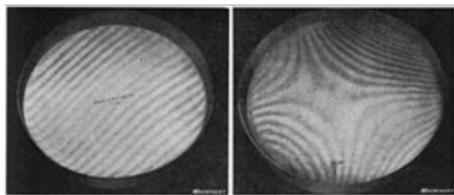
¹ LIGO. <https://www.ligo.caltech.edu/>

7. INTERFEROMETRÍA

7.4 Aplicaciones

Medir calidad de una superficie

La interferometría se puede utilizar para medir qué tan plana es una superficie, por medio de las franjas que éste presenta.



Interferómetro de Twyman-Green

Es una variación del interferómetro de Michelson para probar el funcionamiento de algún tipo de lente.

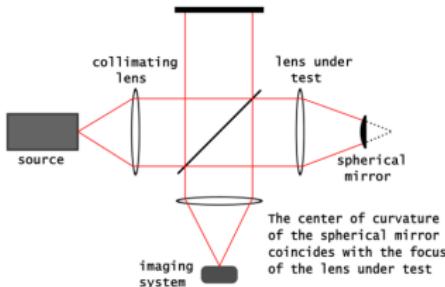


Figura 12. Algunas aplicaciones de la interferometría^{III}.

DIFRACCIÓN

8. DIFRACCIÓN

8.1 Concepto

Un objeto opaco que se interpone entre una fuente de luz y una superficie, una pared por ejemplo, la sombra que se observa no es totalmente nítida^I.

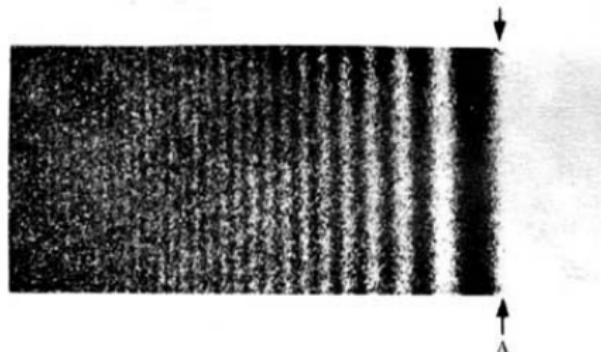


Figura 13. Acercamiento al borde de una sombra^{II}.

- ▶ Fallan las predicciones de la óptica geométrica.
- ▶ Franjas brillantes y oscuras alternadas.

8. DIFRACCIÓN

8.1 Concepto

También se puede definir como los patrones de interferencia que se forman cuando la luz incide en una barrera que cuenta con una abertura o un borde. Pero, en general, aplica para todo tipo de ondas^I.

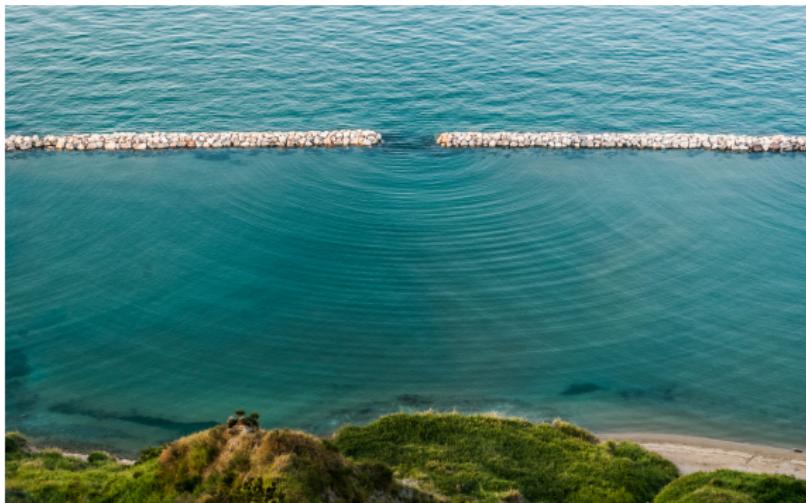


Figura 14. Difracción de una onda en el mar^{II}.

8. DIFRACCIÓN

8.1 Principio de Fresnel-Huygens

*"Todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden"*¹.

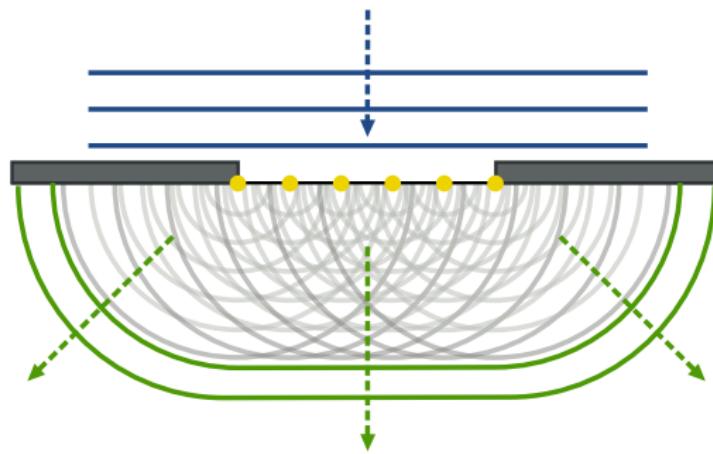


Figura 15. Principio de Huygens a través de una rendija.

8. DIFRACCIÓN

8.2 Patrón de Difracción

Imagen de la modulación de la intensidad de la onda debido a la difracción. El patrón de difracción se construye a partir de la superposición de todas las ondas que plantea Fresnel-Huygens¹.

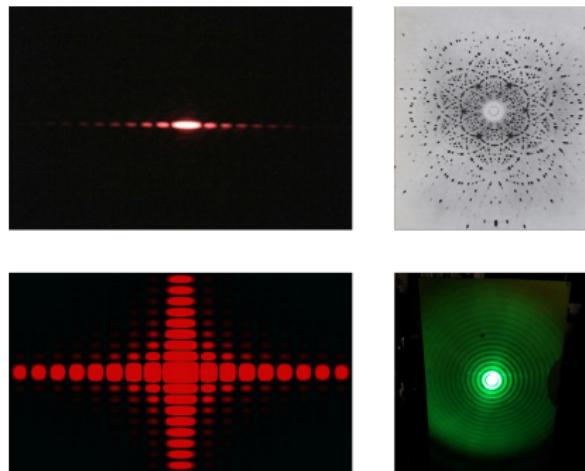


Figura 16. Diferentes patrones de difracción.

8. DIFRACCIÓN

8.3 Enfoques

Fresnel

Se considera la curvatura de las ondas salientes de la abertura de difracción. Normalmente ocurre cuando la abertura está muy cerca a la pantalla de observación.

Fraunhofer

Se considera difracción de Fraunhofer cuando las ondas salientes de la rendija con casi planas comparadas con la fuente^I.

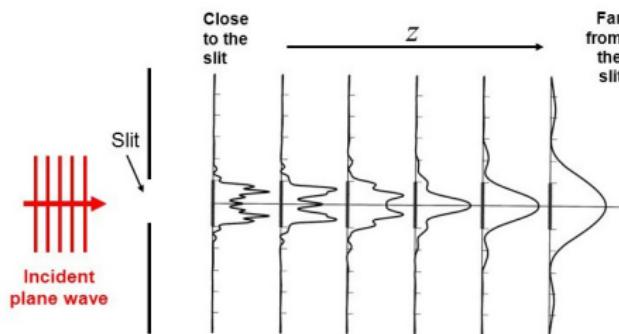


Figura 17. Intensidad de acuerdo al enfoque de estudio^{II}.

8. DIFRACCIÓN

8.3 ¿Qué tanto se difracta una onda?

La difracción depende de qué tan comparable sea un obstáculo con la longitud de onda.

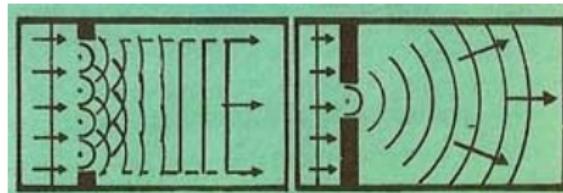


Figura 18. Comparación de una onda incidente respecto a rendijas.

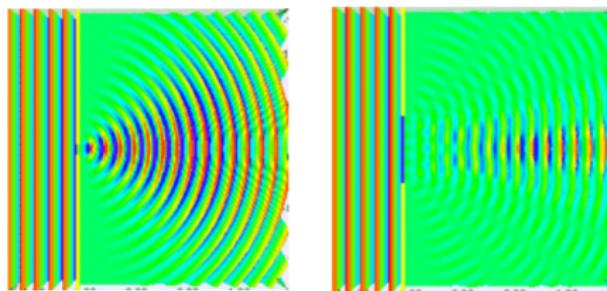


Figura 19. Propagación de acuerdo a las rendijas¹.

¹ Wikimedia. (2011) <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:5wavelength%3Dslitwidthspectrum.gif>

8. DIFRACCIÓN

8.4 Experimento de una Rendija

Hay una onda incidente en la abertura, la abertura se considera como una fuente continua de ondas esféricas¹.

$$I = I_0 \left\{ \frac{\sin [\pi a (\sin \theta) / \lambda]}{\pi a (\sin \theta) / \lambda} \right\}^2 \quad (10)$$

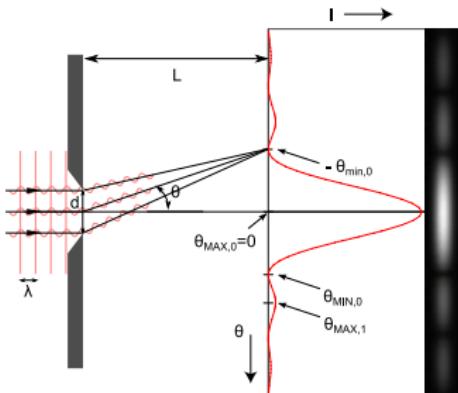


Figura 20. Difracción, intensidad y patrón de difracción para una rendija.

8. DIFRACCIÓN

8.5 Experimento de Young

¿Qué esperaríamos ver?

Si la luz se comportara como una partícula, se esperaría observar:

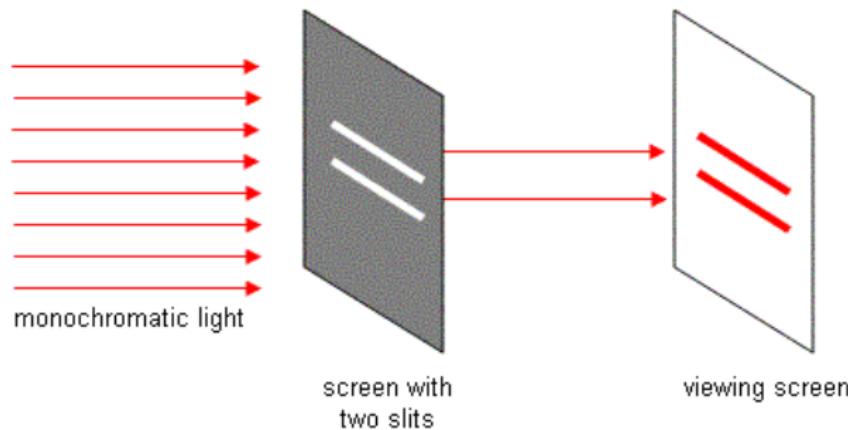
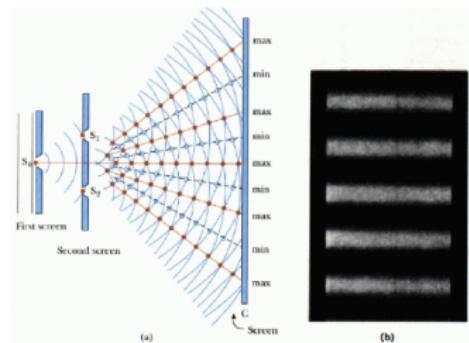


Figura 21. Resultado esperado del modelo como partícula¹.

¹ http://www.studyphysics.ca/newnotes/20/unit04_light/chp1719_light/images/young_particle.gif

8. DIFRACCIÓN

8.5 Experimento de Young

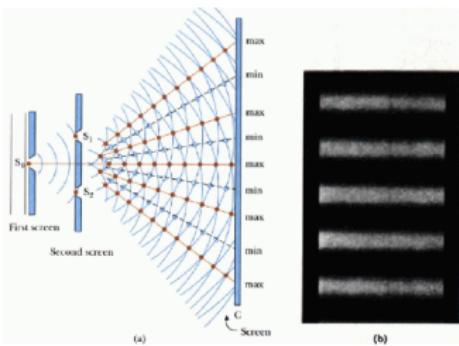


(a) Patrón de Interferencia¹.

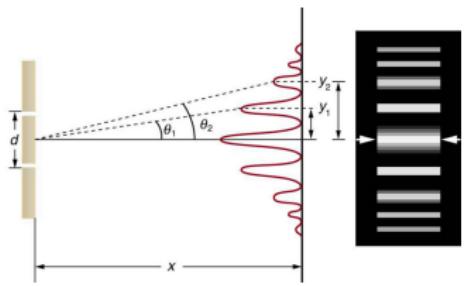
¹ http://psi.phys.wits.ac.za/teaching/Connell/phys284/2005/lecture-02/lecture_02/img21.png

8. DIFRACCIÓN

8.5 Experimento de Young



(a) Patrón de Interferencia^I.



(b) Patrón de Intensidad^{II}.

8. DIFRACCIÓN

8.6 Rayos X

Los rayos X fueron descubiertos por Wilhelm Röntgen en 1895; tienen longitudes del orden de 10^{-10} m . Pueden utilizarse para determinar defectos en componentes técnicos, como tuberías, turbinas, motores, paredes, vigas, y en general casi cualquier elemento estructural^I.

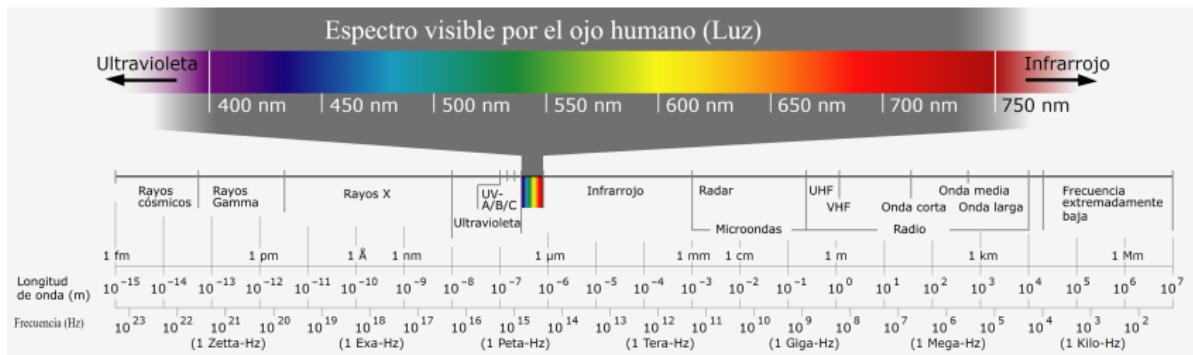


Figura 24. Espectro electromagnético^{II}.

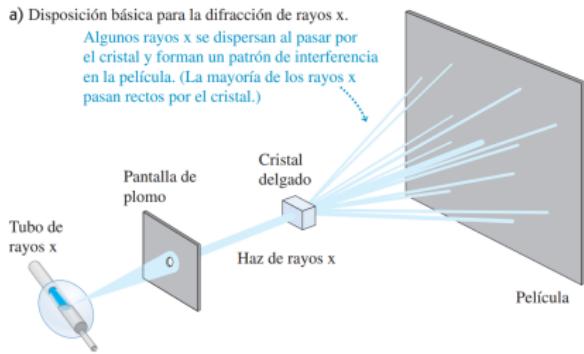
8. DIFRACCIÓN

8.6 Difracción de Rayos X

En 1912, Max von Laue propuso la idea de que un cristal podría servir como una rejilla de difracción tridimensional para los rayos X.

a) Disposición básica para la difracción de rayos x.

Algunos rayos x se dispersan al pasar por el cristal y forman un patrón de interferencia en la película. (La mayoría de los rayos x pasan rectos por el cristal.)



b) Patrón de difracción de Laue para una sección delgada de cristal de cuarzo



Figura 25. Experimento de Laue¹.

Resultó en la prueba experimental de que los rayos X son, en efecto, una onda electromagnética.

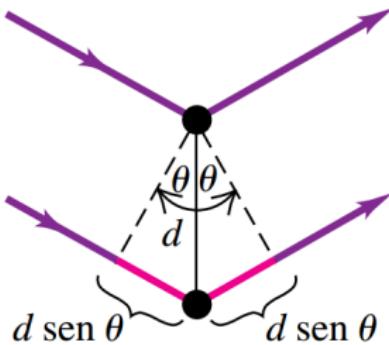
8. DIFRACCIÓN

8.6 Difracción de Rayos X

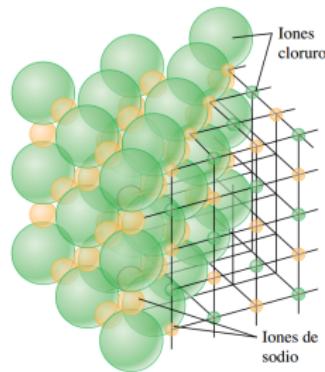
Condiciones:

- El ángulo incidente debe ser el mismo al de dispersión.
- La diferencia de trayectos debe ser $m\lambda$.

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad m \in \mathbb{N} \quad (11)$$



(a) "Reflexión" de Bragg.



(b) Configuración de átomos en NaCl ¹.

BIBLIOGRAFÍA I

- ▶ Sears and Zemansky, *Física Universitaria*, 13th ed. Pearson, 2009, vol. 2.
- ▶ Wikimedia. (2011) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reflection_and_refraction.svg.
- ▶ LaVozdeCataratas. (2015) www.lavozdecataratas.com/contenido/fotos/02102015_080735.jpg.
- ▶ N. Gallón. (2012) http://doraeugeniagonzalez.blogspot.com.co/p/el-bombillo_8271.html.
- ▶ Wikimedia. (2006) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Interference_of_two_waves.png.
- ▶ ——. (2012) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelson_interferometer_fringe_formation.svg.
- ▶ LIGO. <https://www.ligo.caltech.edu/>.
- ▶ Wikimedia. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e8/Optical_flat-interference_fringes.jpg/300px-Optical_flat-interference_fringes.jpg.
- ▶ Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Twyman%E2%80%93Green_interferometer.
- ▶ E. Braun, "Arquitectura de sólidos y líquidos," <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/26/imgs/fig3-21.jpg>.
- ▶ O. Perkins. (2017) <http://oliverperkins.com/2017/11/30/forecasting-wave-height/>.

BIBLIOGRAFÍA II

- ▶ E. Hecht, *Optics*. Pearson Education, 2016.
- ▶ P. Wilcox. (2016) <http://slideplayer.com/slide/5787788/#>.
- ▶ Wikimedia. (2011) <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:5wavelength%3Dslitwidthspectrum.gif>.
- ▶ http://www.studyphysics.ca/newnotes/20/unit04_light/chp1719_light/images/young_particle.gif.
- ▶ http://psi.phys.wits.ac.za/teaching/Connell/phys284/2005/lecture-02/lecture_02/img21.png.
- ▶ http://philschatz.com/physics-book/resources/Figure_28_03_06a.jpg.
- ▶ Sonria. <http://www.sonria.com/glossary/colores/>.

Gracias