



TRABAJO FIN DE MÁSTER

RECOPILOACIÓN Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA HACER DEMOSTRACIONES DE ÓPTICA

Estudiante: MANUEL PASCUAL GARCÍA

Especialidad: FÍSICA Y QUÍMICA

Tutor/a: RAMÓN CASTAÑER BOTELLA

Curso académico: 2023-24



Resumen

Este trabajo se enfoca en la recopilación de experimentos sencillos de óptica con el propósito de enriquecer la experiencia educativa. Se han seleccionado experimentos que abarcan desde conceptos básicos como la reflexión y refracción hasta fenómenos más avanzados como la interferencia y la difracción. Cada experimento está acompañado de una guía detallada, incluyendo objetivos educativos, procedimientos paso a paso y explicaciones teóricas, facilitando su implementación en entornos educativos, por lo que se prioriza el uso de recursos accesibles y materiales comunes, asegurando la viabilidad de los experimentos en diversos contextos. La integración de tecnología, cuando sea posible, también se explora para mejorar la comprensión de los principios ópticos. En última instancia, este trabajo busca mejorar la enseñanza de la óptica al proporcionar una herramienta práctica y accesible que pueda ser utilizada por educadores y estudiantes, fomentando un aprendizaje interactivo y significativo en el campo de la física óptica.

Palabras clave: óptica, experimentos, física, educación, reflexión, refracción, interferencia, difracción, recursos accesibles, materiales comunes, tecnología, aprendizaje interactivo.

Abstract

This work focuses on the compilation of simple optics experiments with the purpose of enriching the educational experience. Experiments ranging from basic concepts such as reflection and refraction to more advanced phenomena such as interference and diffraction have been selected. Each experiment is accompanied by a detailed guide, including educational objectives, step-by-step procedures and theoretical explanations, facilitating its implementation in educational environments, thus prioritizing the use of accessible resources and common materials, ensuring the feasibility of the experiments in diverse contexts. The integration of technology, when possible, is also explored to improve the understanding of optical principles. Ultimately, this work seeks to enhance the teaching of optics by providing a practical and accessible tool that can be used by educators and students, fostering interactive and meaningful learning in the field of optical physics.

Key words: optics, experiments, physics, education, reflection, refraction, interference, diffraction, accessible resources, common materials, technology, interactive learning.

Índice

1. Introducción	4
2. Experimentos	4
2.1. Reflexión de la luz	4
2.1.1. Espejo plano	4
2.1.2. Espejo curvo	6
2.2. Refracción de la luz	8
2.2.1. Flechas invertibles	8
2.2.2. Reflexión total interna	9
2.3. Difracción de la luz	11
2.3.1. Láser	11
2.3.2. Espectro de la luz con una caja y un CD	12
2.4. Lentes	14
2.4.1. Vaso de agua	14
2.4.2. Lupa acuosa	15
2.5. Polarizadores	17
2.5.1. Ley de Malus	17
2.6. Otros	20
2.6.1. Medición de la velocidad de la luz	20
2.6.2. Disco de Newton	22
2.6.3. Propagación rectilínea de la luz	24
3. Discusión y conclusiones	27

1. Introducción

La física es, por excelencia, una de las asignaturas que se presenta como algo extremadamente complejo, convirtiéndose en una de las que más cuesta que el alumnado encuentre un interés particular por ella. Generalmente, esto es debido a la cantidad de parte teórica que la envuelve, pero también hay una parte importantísima experimental y que de ninguna forma podemos dejar de lado, sabiendo incluso que existen leyes puramente experimentales como pueden ser la Ley de Charles, en los gases, o la Ley de Snell, en reflexión y difracción.

La física es la ciencia que busca comprender el funcionamiento del universo que nos rodea, desde las partículas más pequeñas hasta las galaxias más lejanas. Se trata, en esencia, de modelizar la realidad. Se crean modelos, se discuten, unos se aceptan y otros quedan atrás, convirtiéndose en las bases de teorías más complejas que se acercan cada vez más a la realidad, poniendo de manifiesto inevitablemente su función experimental.

Dentro del amplio espectro de la física, la óptica ocupa uno de los papeles más fundamentales. Sin embargo, la enseñanza tradicional de la óptica suele centrarse en la teoría, relegando a un segundo plano la experimentación, un pilar fundamental para el aprendizaje científico. Es por ello que este trabajo propone un enfoque particular, centrándose en el desarrollo de experimentos sencillos y atractivos que permitan a los estudiantes adentrarse en el mundo de la óptica de manera práctica. Estos experimentos abarcarán temas como la refracción, la reflexión, la difracción y la interferencia, utilizando materiales cotidianos y procedimientos fáciles de seguir para niveles desde la ESO hasta segundo de Bachillerato.

2. Experimentos

2.1. Reflexión de la luz

Quizás se trate de las experiencias más sencillas de realizar. La reflexión de la luz es una parte importante de la física y que está presente en nuestro día a día en prácticamente cualquier ambiente que nos encontremos, desde que nos levantamos por la mañana y nos miramos al espejo, pasando por mirar nuestro reflejo distorsionado en un coche que veamos por la calle. Veamos algunas de las experiencias que nos permiten comprender mejor este bonito efecto.

2.1.1. Espejo plano

En esta sección podemos mencionar experiencias varias. Por supuesto, la más sencilla sería la de mirarnos en un espejo, donde directamente podremos ver las propiedades básicas del mismo, proporcionando una imagen de igual tamaño pero virtual, puesto que aparentemente esta imagen se encuentra en el interior del espejo. Además, podremos ver también que nuestra mano derecha se convierte en la izquierda en el espejo. Para mayor aclaración, podemos observar esto en la Figura 1.

Desde aquí podríamos intentar pensar en una forma de conseguir que esto no ocurra. Veamos cómo. Si utilizamos dos espejos y los unimos por los lados con cinta adhesiva con



(a)

Figura 1: Las orientaciones del objeto y de su imagen son iguales, de forma que si el objeto real apunta a la derecha, su imagen también.

una angulación de 90° , lo que conseguimos es precisamente lo que estábamos buscando (Figura 2).



(a)

Figura 2: En este caso, las orientaciones se invierten, de forma que el objeto real apunta a la derecha y el virtual hacia la izquierda.

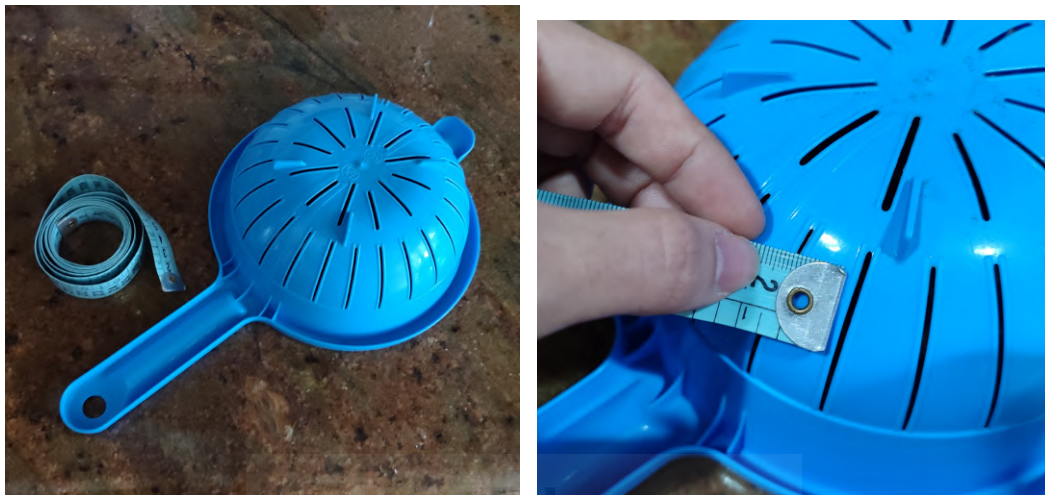
Además, como vemos, se han formado otros dos reflejos adicionales, teniendo en total 3 reflejos virtuales del objeto real. La cantidad de objetos que se forman entre los dos espejos varía en función de la angulación según la fórmula (la cual es posible obtener empíricamente):

$$N = \frac{360}{\alpha} - 1 \quad (2.1)$$

Siendo N el número de reflejos y α el ángulo entre los espejos. Es por esto que si $\alpha = 90$, como en nuestro caso, $N = 3$, que es precisamente lo que se observa.

2.1.2. Espejo curvo

En este caso se trata de una experiencia sencilla para medir el radio de curvatura de un espejo curvo. En nuestro caso mediremos el radio del siguiente objeto:



(a) Cinta métrica y objeto de estudio

(b) Medición del tamaño de la imagen

Figura 3: Como vemos, no necesariamente tiene que ser un espejo como tal. Puesto que en este objeto se refleja la luz del techo perfectamente, podemos realizar el experimento sin problemas.

Lo que haremos será situar el objeto en un lugar que esté iluminado por, a ser posible, barras fluorescentes o bombillas lo más larga posible para facilitar la medida. En nuestro caso lo haremos en un lugar iluminado por una bombilla de 9 cm (que será el objeto real en el sistema óptico, es decir, es el tamaño de y). La distancia hasta nuestro espejo (un simple bol) es de 194 cm (s) y, si medimos el tamaño del objeto virtual, obtenemos aproximadamente 0.3 cm (y'), que es positivo, puesto que la imagen formada por un espejo convexo es virtual, menor y derecha. Si fuera virtual, menor e invertida, tendríamos que $y' = -0,3 \text{ cm}$, pero no es el caso.

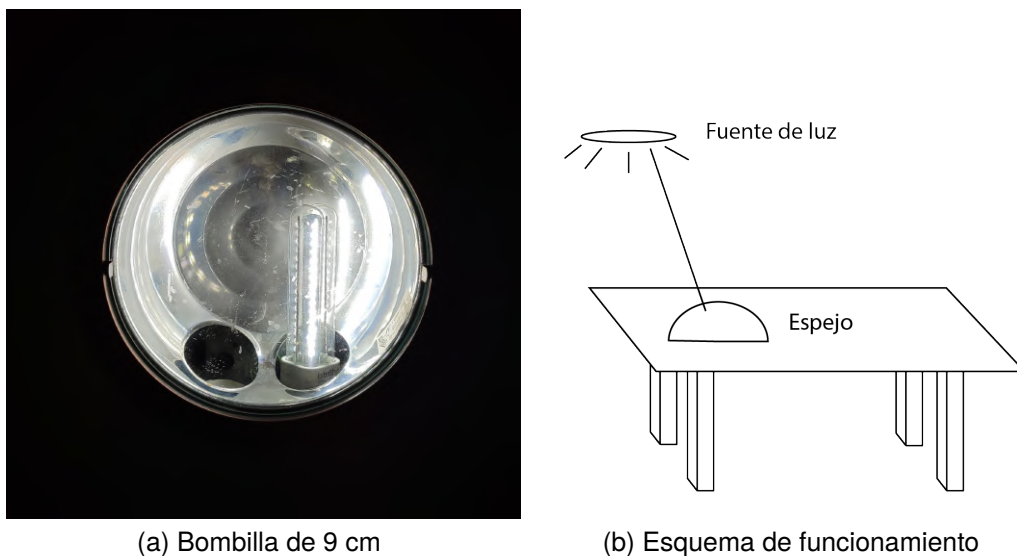


Figura 4

Con todos estos datos, operamos según las ecuaciones de los espejos esféricos. El aumento lateral será:

$$A = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \quad (2.2)$$

Por tanto,

$$\rightarrow \frac{0,3}{194} = -\frac{s'}{194} \rightarrow s' = -6,47 \text{ cm}$$

Por otro lado, según la ecuación fundamental del espejo esférico:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f} \quad (2.3)$$

Entonces, trabajando ahora en metros:

$$\rightarrow f = \left(\frac{1}{-0,0647} + \frac{1}{1,94} \right)^{-1} = -0,067 \text{ m} \rightarrow f = -6,7 \text{ cm}$$

Y como

$$f = \frac{R}{2} \quad (2.4)$$

Tendremos que $R \approx -13,4 \text{ cm}$ (negativo por ser convexo). El radio medido directamente es de $14,3 \text{ cm}$, por lo que la aproximación es bastante aceptable.

2.2. Refracción de la luz

La refracción de la luz, un fenómeno óptico de profundo interés científico. Este fenómeno, observado cuando la luz transita entre diferentes medios, constituye un aspecto fundamental en la comprensión de la propagación lumínica. Desde la desviación aparente de objetos sumergidos en líquidos hasta las ilusiones ópticas generadas por cambios en la densidad atmosférica, la refracción nos invita a explorar las complejidades de la interacción de la luz con la materia. Así pues, en este apartado se abordarán experimentos de óptica que proporcionan un entendimiento más profundo de la refracción, destacando su relevancia en el ámbito científico y su aplicabilidad en diversas situaciones cotidianas.

2.2.1. Flechas invertibles

Los efectos ópticos son, por excelencia, algunos de los experimentos más interesantes y llamativos que existe, pudiéndose utilizar algunos de ellos incluso para trucos de magia. En este caso, podríamos hablar de una simple flecha dibujada en un papel, pero que, al estar dibujada por un mago, es capaz de invertirse si la miramos a través de un vaso con agua.

En efecto, si realizamos la prueba podremos identificar que así ocurre, como vemos en la siguiente figura:

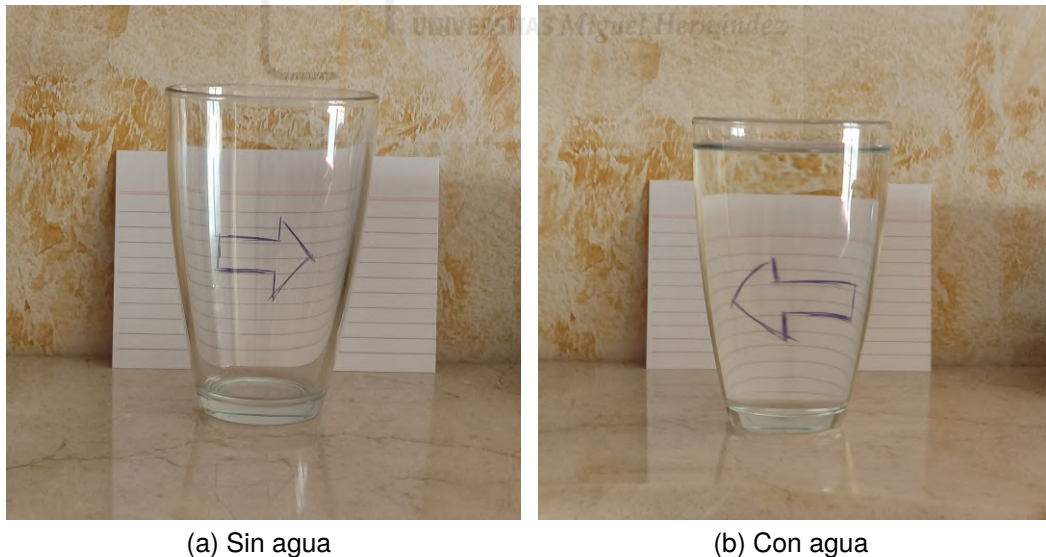


Figura 5

Sin embargo, la razón de esto no es precisamente la magia, sino la refracción de la luz a su paso por diferentes medios, como son el aire, cristal y agua. Si suponemos que el cristal es suficientemente fino como para que la refracción debida a él sea ínfima, lo que ocurre realmente es algo parecido a lo que vemos en la siguiente imagen:

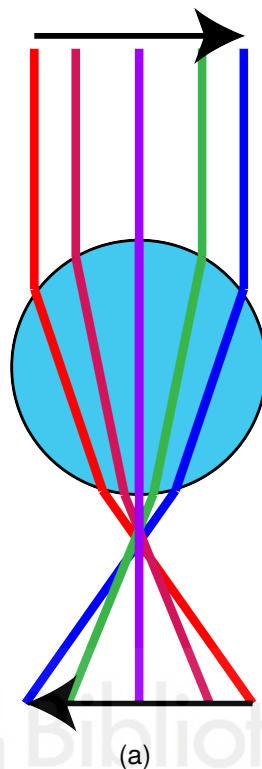


Figura 6: Podemos observar gráficamente cómo ocurre la inversión de los rayos. Los colores son meramente representativos.

Esto se explica en base a la Ley de Snell:

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r \quad (2.5)$$

Donde el subíndice i indica el haz incidente y r indica el refractado, y según la cual la trayectoria de la luz se ve modificada al pasar por medios de diferente índice de refracción, que en nuestro caso sería aire ($n = 1$) y agua ($n = 1,33$), creando la ilusión de que la flecha se ha dado la vuelta.

2.2.2. Reflexión total interna

La reflexión total interna, otro fenómeno muy interesante que ocurre cuando un rayo de luz pasa de un medio con un índice de refracción más alto a uno con un índice de refracción más bajo, y el ángulo de incidencia es mayor que el llamado “ángulo límite” a partir del cual ya no ocurre refracción, sino solamente reflexión. Esto es extremadamente útil en las comunicaciones modernas, pues permitió desarrollar la fibra óptica, la cual limita la pérdida de información transmitida a lo largo de todo el cable de fibra, como vemos en este esquema:

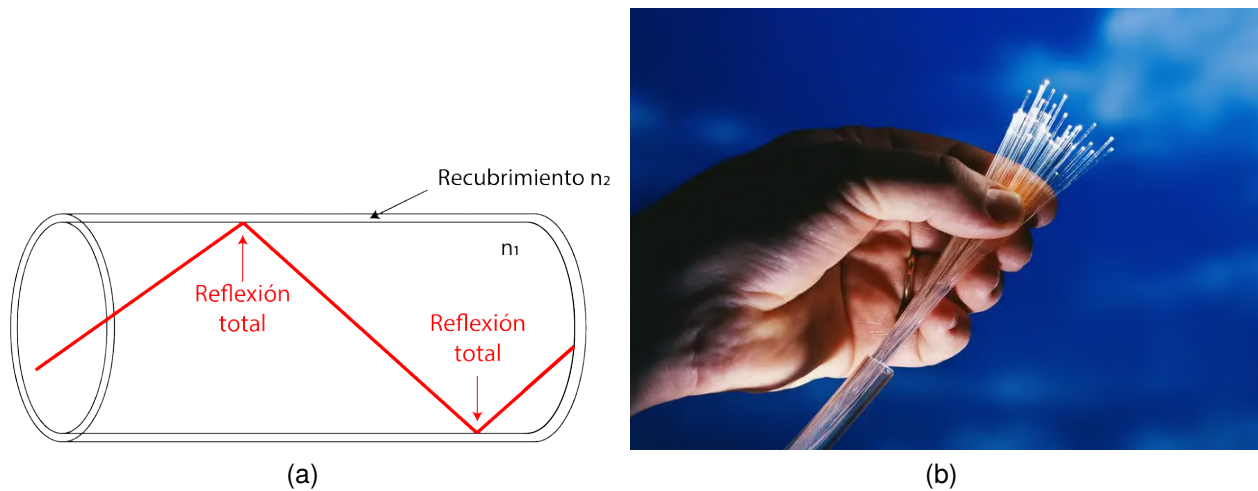


Figura 7: (a) Puesto que el haz incide con un ángulo mayor que el ángulo límite desde un medio más refringente (n_1), como el agua, a uno menos refringente (n_2), como el aire, ocurriendo el efecto de reflexión total. (b) En esta imagen («Fibra Óptica», 2015) podemos ver representado este efecto en la vida real, donde se aprecia cómo a lo largo del cable no podemos ver luz emitida debido a la reflexión total, mientras que al final del cable sí se ve que, en efecto, había luz siendo transmitida a través de él.

De nuevo, todo esto se explica en base a la Ley de Snell vista en el caso anterior, pero ahora llevándolo al caso del ángulo límite donde el ángulo refractado es de 90° :

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) \longrightarrow \theta_{limite} = \arcsin \left(\frac{n_r}{n_i} \right) \quad (2.6)$$

Vamos a intentar reproducir este efecto de forma sencilla empleando una botella a la cual se le perfora la parte inferior. Esta se llena con agua y se permite que el agua fluya a través del agujero. Luego, al iluminar con un láser desde el lado opuesto al agujero, se observa cómo el agua que sale de la botella actúa como un medio conductor de luz. En la siguiente imagen podemos verlo más claro:



(a) Experimento iluminado

(b) Experimento en la oscuridad

Figura 8

De la figura anterior fácilmente podemos ver cómo el punto donde cae el agua está iluminado por el láser que está apuntando en una dirección perpendicular, por lo que, en efecto, el láser sigue el flujo de agua como habíamos predicho.

2.3. Difracción de la luz

En nuestro viaje a través de la óptica, nos adentramos ahora en el dominio de la difracción de la luz. Este fenómeno, aunque a veces pasa desapercibido en nuestra vida diaria, revela su asombroso poder cuando la luz se desvía y se manifiesta en patrones intrigantes y coloridos. La difracción es el cambio en la dirección de las ondas al encontrar obstáculos, generando patrones de interferencia característicos que exploraremos a través de esta sección, mostrando algunos experimentos que nos ayudarán en su comprensión. Veamos algunas de estas experiencias.

2.3.1. Láser

Con la utilización de un láser podemos intentar conseguir el patrón de difracción al paso por una rendija. Para conseguir esto hemos de usar una rendija que sea lo suficientemente estrecha, ya que los fenómenos de este tipo ocurren cuando la anchura de la rejilla es cercana a la longitud de onda de la luz que la atraviesa. Generalmente, para conseguir el patrón deseado se utilizaría una rendija creada a base de acercar mucho los bordes de dos espejos (ya que proporcionan una superficie óptima para el experimento) hasta conseguir la rendija deseada. Sin embargo, resolver esto es más sencillo de lo que parece. En nuestro caso, necesitaremos sencillamente dos trozos de papel que podemos conseguir de una

libreta y los acercaremos por los bordes lo máximo que podamos hasta conseguir el patrón de interferencia, que sería el que tenemos aquí:

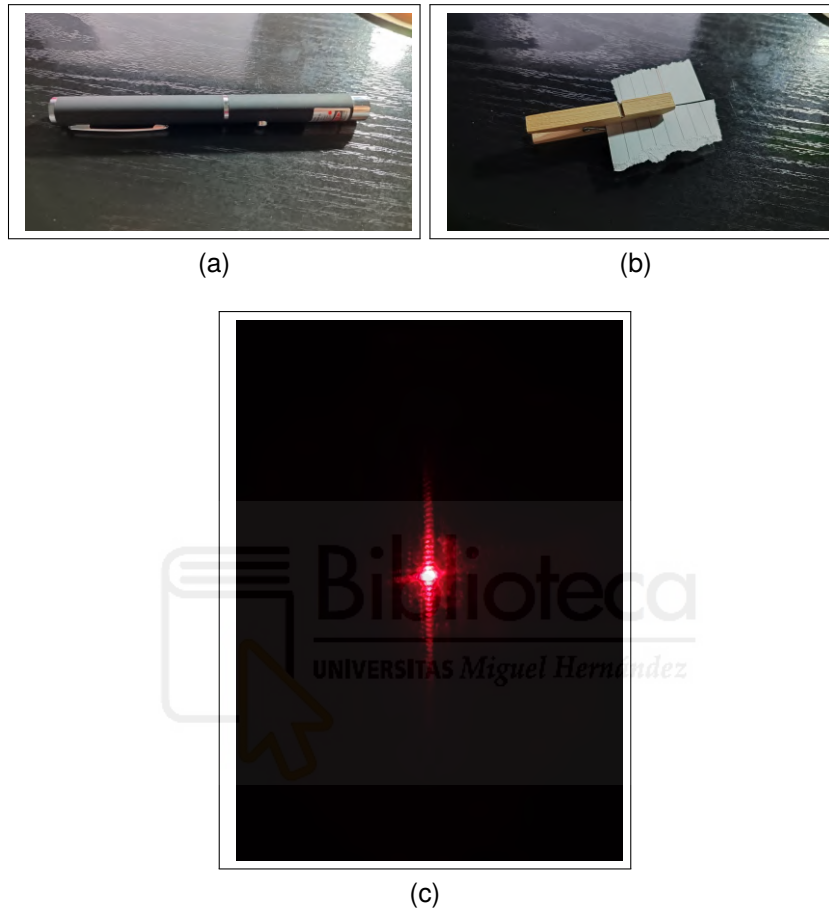


Figura 9: (a) Láser utilizado. (b) Diseño experimental que, como vemos, es muy simple. (c) Resultado de la experiencia.

Este patrón se da debido a la propiedad ondulatoria de la luz, de forma que, al pasar por la rendija, esta se convierte en el nuevo foco de ondas. Estas ondas interactúan con el lugar de visualización de la interacción de forma constructiva y destructiva, obteniendo el patrón observado.

2.3.2. Espectro de la luz con una caja y un CD

El espectro de la luz es muy extenso, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Sin embargo, la única parte del espectro que podemos percibir directamente en nuestros ojos es el espectro visible, una pequeña región del espectro electromagnético. La luz que percibimos diariamente a través de nuestro ojos siempre está formada por diferentes combinaciones de las diferentes longitudes de onda presentes en este espectro visible, aunque no seamos plenamente conscientes de ello. Por ejemplo, la luz natural del sol está formada

por una combinación aleatoria de todas las longitudes de onda del visible (y más allá de este también, pero nos centraremos solo en el visible), mientras que las lámparas de sodio solo poseen dos líneas del espectro visible (589 nm y $589,6\text{ nm}$) y que percibimos meramente como luz naranja sin percatarnos de lo anterior. Se han realizado experimentos en los que se medían estas dos líneas del espectro del Na con un simple teléfono, obteniendo resultados bastante aceptables (Williams et al., 2010).

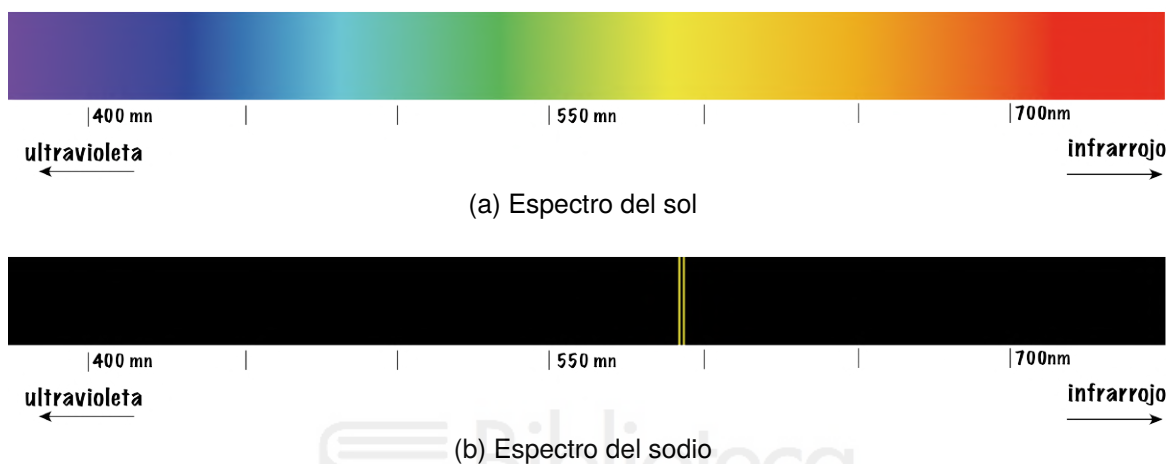


Figura 10: En el caso del sodio, esto ocurre por la forma en que se produce la luz. Se excitan los átomos de sodio a través de corriente eléctrica, de forma que los electrones alcanzan orbitales superiores. Tras ello, decaen de nuevo a sus orbitales originales, emitiendo fotones en el proceso con las longitudes de onda mencionadas: 589 nm y $589,6\text{ nm}$.

Para poder observar este efecto, podemos utilizar un elemento de difracción que todos tenemos en casa: un CD. Los CD tienen esta propiedad debido a la forma en que son diseñados, por lo que será lo que utilizaremos para la difracción. El diseño experimental será usar una caja en la que introduciremos un trozo de CD con una angulación que nos deje ver a través de un agujero que realizaremos en la tapa de la caja. Por otro lado, agujeraremos la caja por el frontal para que entre la luz y se refleje en el CD, de manera que la luz reflejada saldrá por la abertura anterior realizada en la tapa de la caja. Podremos ver, así, el espectro visible dependiendo del tipo de luz que estemos observando: natural, LED, etc.



(a) Modelo experimental

(b) Espectro del sol

Figura 11

2.4. Lentes

En este tramo de nuestro viaje por las maravillas de la óptica, nos adentraremos en el universo de las lentes. Estos dispositivos, fundamentales en la manipulación de la luz, desempeñan un papel crucial en la formación de imágenes y la corrección visual. En este ámbito, podemos mencionar a uno de los pioneros y adelantados a su tiempo por sus intereses en óptica e inventos relacionados con las lentes: Roger Bacon (1214-1294), si bien no fue el inventor propiamente dicho de los anteojos (Simón-Tor et al., 2004).

2.4.1. Vaso de agua

Anteriormente, ya hemos podido observar cómo es posible utilizar un vaso de agua para invertir una flecha dibujada en un papel debido a la refracción. Este fenómeno también es explicable a través de la óptica geométrica, puesto que al añadir agua a un vaso de tubo, este se convierte en una lente convergente. Debido a esto, podemos calcular experimentalmente cuál es la potencia de la lente y, así, obtener el índice de refracción del agua, que sabemos que es $n_a = 1,33$.

Lo que haremos será hacer uso de una vela y, en mi caso, un biberón (Figura 12) que tenía la forma adecuada para la experiencia (ya que idealmente hay que utilizar un vaso de tubo con paredes paralelas). Colocamos el recipiente lleno de agua delante de la vela y observamos la imagen que se produce al pasar la luz a través del recipiente con agua en la pared. Si desplazamos la vela hacia delante y hacia atrás, veremos cómo la imagen se enfoca y desenfoca. Dejaremos la vela en el punto en que la imagen queda enfocada y realizaremos las mediciones de las distancias del sistema óptico. Estas son: $s = -5 \text{ cm}$, $s' = 16 \text{ cm}$. Con la ecuación de lentes delgadas:

$$\frac{n}{s'} - \frac{n}{s} = (n' - n) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.7)$$

Puesto que fuera tenemos aire, $n = 1$. Por otro lado, al ser el vaso circular, $R_1 = -R_2$, que es de aproximadamente $R_1 = 3 \text{ cm}$. Según todo lo anterior:

$$\frac{1}{0,16} - \frac{1}{-0,05} = (n' - 1) \left(\frac{1}{0,03} - \frac{1}{-0,03} \right) \rightarrow n' = 1,39$$

Hemos encontrado, entonces, que $n_a \approx 1,39$, un valor bastante cercano al real de $n_a = 1,33$.



(a) Diseño experimental

Figura 12

2.4.2. Lupa acuosa

Los móviles actuales, en su mayoría, poseen una lente adicional macro que permite hacer fotos a menor escala con buena resolución. Podemos intentar incrementar los aumentos de esa lente utilizando una gota que con cuidado colocaremos sobre dicha lente (no necesariamente tiene que ser la lente macro) y veremos cómo la forma de la gota nos permite incrementar los aumentos de la lente. Al hacer esto, podemos conseguir lo que observamos en la siguiente figura:



(a) Zapato



(b) Herrete



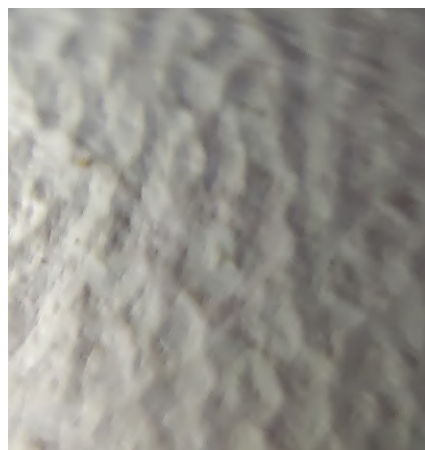
(c) Textura del cuero blanco del zapato



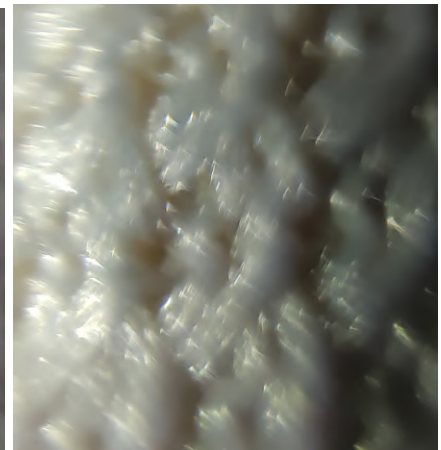
(d) Textura de la tela del zapato



(e) Herrete (Gota)



(f) Textura del cuero blanco del zapato (Gota)



(g) Textura de la tela del zapato (Gota)

Figura 13: Fotos de diferentes partes del zapato realizadas con la gota en la lente macro. (b-d) Se ha usado solo la lente macro. (e-g) Se ha usado la lente macro + la gota de agua.

Todas las fotografías se han tomado sin utilizar el Zoom digital de la cámara del móvil, pudiendo ver así el verdadero poder de aumento de una simple gota de agua. Si bien la resolución de las imágenes con la gota no exactamente buena, sí podemos observar que rápidamente podemos conseguir aumentar la potencia de una lente a través del uso de una gota de agua.

2.5. Polarizadores

En esta fase de nuestro recorrido por los fenómenos ópticos, nos introduciremos en el reino de los polarizadores. Estos componentes, a menudo pasados por alto en nuestra vida cotidiana, desempeñan un papel esencial en el control y la manipulación de la luz polarizada. Por ejemplo, el funcionamiento de las gafas de sol se basa precisamente en la polarización de la luz. La luz solar no tiene una polarización definida (puede considerarse que está constituida a partes iguales de polarización perpendicular y de polarización paralela a la dirección de propagación, pero de forma aleatoria). Cuando la luz se refleja en una superficie, adquiere cierto grado de polarización, debido a la diferencia en los coeficientes de reflexión para la polarización paralela o perpendicular al plano de incidencia. En particular, cuando la luz incide sobre una superficie formando el ángulo de Brewster (Doval & Fuente, 2023), la luz reflejada está completamente polarizada en la dirección perpendicular al plano de incidencia, por lo que aquí entran en juego las gafas de sol, de forma que si se crean polarizadas paralelas al plano de incidencia, las reflexiones observadas a través de ellas no serán tan deslumbrantes (cabe destacar que esto no ocurre, como bien se ha dicho, con todas las reflexiones, por lo que solo se podrá disminuir la cantidad de reflexiones observadas, pero no eliminarlas).

Como vemos, los polarizadores ofrecen una perspectiva única para comprender y aplicar los principios de la polarización de la luz. Veamos algunas experiencias relacionadas con estos curiosos elementos.

2.5.1. Ley de Malus

Fácilmente, podemos comprobar cómo al colocar dos polarizadores de forma perpendicular uno sobre el otro veremos que la luz no es capaz de atravesar ambos, ya que con el primero estamos polarizando la luz en una dirección particular, horizontal, por ejemplo, y luego estamos intentando que esa luz polarizada pase por otro que polariza la luz verticalmente, dando como resultado una cantidad nula de luz emergente (Figura 14). Sin embargo, si vamos girando uno de ellos veremos que poco a poco va pasando cada vez más luz, pero no es necesario que los dos polarizadores estén completamente alineados para que la luz pase. Esto puede resultar parcialmente contradictorio, pues cabría esperar que la única forma de que la luz pase fuera, como hemos mencionado: con los dos polarizadores perfectamente alineados. Esto es precisamente lo que explica la ley de Malus (Driscoll et al., 1978), llamada así en honor al físico francés Étienne-Louis Malus (1775 – 1812), que nos dice la intensidad de la luz que pasará a través de una serie de polarizadores dependiendo del ángulo que formen entre ellos.

$$I = I_o \cos^2 \alpha \quad (2.8)$$

Donde I_o es la intensidad del ambiente y α es el ángulo que guardan ambos polarizadores uno respecto al otro. Esta ecuación no es casualidad y se deduce de la explicación cuántica de cómo se comporta la luz, veámoslo. Asumimos un fotón con una polarización general (aleatoria) como

$$|\phi\rangle = \cos \alpha |0\rangle + \sin \alpha |1\rangle \quad (2.9)$$

Donde se ha usado la notación "*bra-ket*". Podemos considerar el paso por cada polarizador como un cambio de base según la matriz de cambio:

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Donde θ es la diferencia entre el ángulo final al que estamos cambiando y el inicial, es decir, $\theta = \theta_f - \theta_i$. Entonces, el estado final se obtiene por un conjunto de cambios de base sucesivos dependiendo del número de polarizadores. Vamos a suponer por simpleza, y sin pérdida de generalidad, que nuestro primer polarizador está alineado con la horizontal ($\theta = \theta_f - \theta_i = \alpha - 0 = \alpha$):

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \alpha & -\cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Donde se ha usado la propiedad trigonométrica de $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$. Así pues, la probabilidad de pasar será aquella asociada a la posibilidad de que pase alineado con la horizontal de la nueva base, es decir: $P_1 = 1$. Por tanto, para cualquiera sea α , la polarización inicial del fotón, la probabilidad de pasar el primer polarizador es siempre $P_1 = 1$.

Al pasar por el siguiente polarizador, y suponiendo que el ángulo entre el primer polarizador y el anterior es, de nuevo, θ :

$$\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

De nuevo, la probabilidad de pasar será aquella que esté alineada con la horizontal de la nueva base, es decir, $P_2 = \cos^2 \theta$. Así pues, la probabilidad final será el producto de todas, por lo que $P = P_1 \cdot P_2 = 1 \cdot \cos^2 \theta$. Llegados a este punto, introduciendo la intensidad de fondo I_o , se obtiene la ley de Malus: $I = I_o \cdot \cos^2 \theta$. Veamos cómo podemos probar esta ley a través de la experimentación.

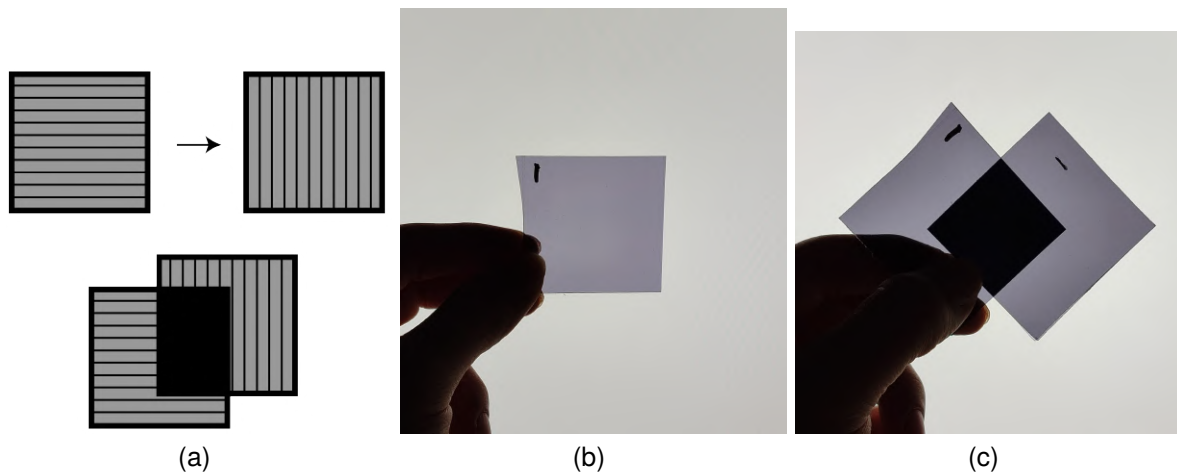


Figura 14: Cuando intersecamos dos polarizadores ideales, la intensidad de luz que pasa a través de ellos es 0.

La práctica se puede desarrollar con el sensor lumínico del móvil (en caso de tener, que suele ser así con los móviles actuales) y la aplicación de *Physics ToolBox* (Wenning & Vieyra, 2020), midiendo la intensidad recibida a través de los polarizadores. De esta forma podemos obtener la intensidad obtenida colocando un polarizador encima del móvil y vamos poco a poco girando el otro, apuntando el ángulo que forman entre sí los polarizadores a la vez que la intensidad registrada por el móvil. Así podemos obtener una gráfica como la siguiente:

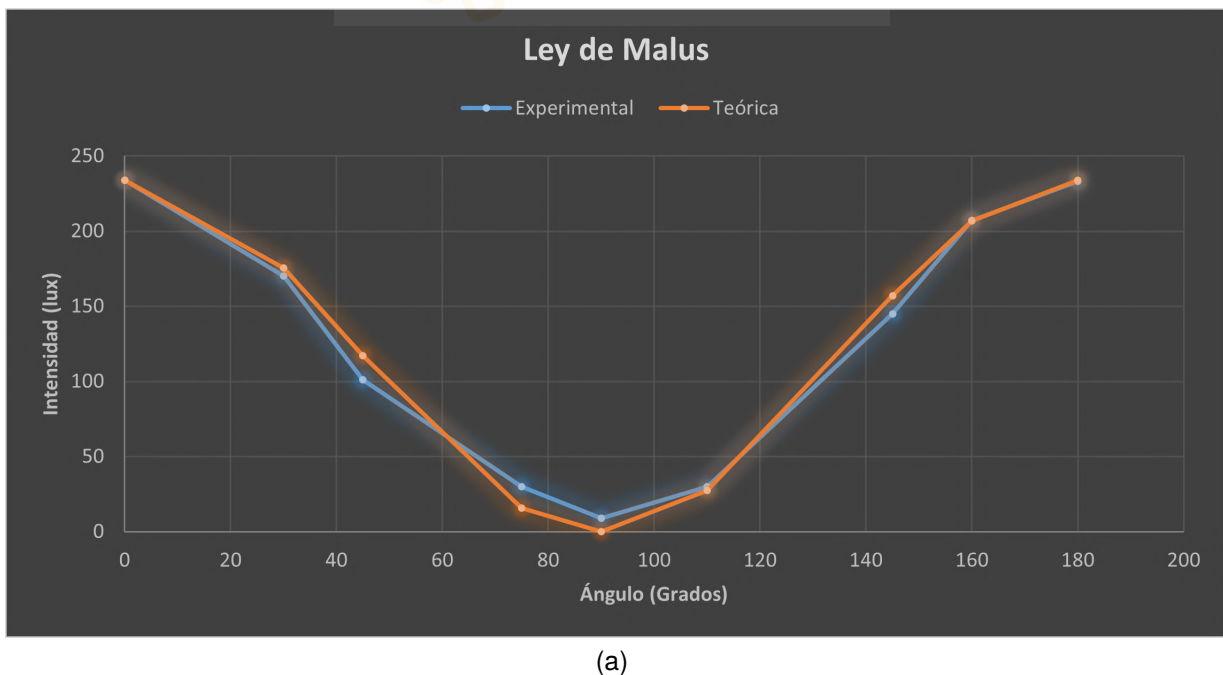


Figura 15: Graficación de los datos y comparación con caso teórico.

Podemos ver en la figura que los resultados obtenidos son bastante parecidos a lo que

cabría esperar teóricamente. Las medidas no son del todo precisas debido al formato de medición, pero vemos que con una sencilla experimentación como esta es posible probar una importante ley de la óptica, la Ley de Malus.

α (grados)	I_{exp} (lux)	I_{teo} (lux)
0	234	234
30	170	175,5
45	101	117
75	30	15,7
90	9	0
110	30	27,4
145	145	157
160	207	206,6
180	233	234

Tabla 1: Tabla de los datos obtenidos a través de la aplicación.

Adicionalmente, un resultado muy interesante de esta ley es que se puede aplicar en serie para infinidad de polarizadores y, sin importar cuál sea esta cantidad, si en ningún caso encontramos dos polarizadores seguidos puestos a 90° uno respecto del otro, *siempre* encontraremos algo de intensidad lumínica al final de toda esa serie. Si suponemos, por ejemplo, 5 polarizadores cuyos ángulos formados entre pares (1-2, 2-3, 3-4 y 4-5) son $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ y α_5 , al pasar por el primer par tendremos que la intensidad resultante será:

$$I_{r_1} = I_{o_1} \cos^2 \alpha_1$$

Tras esto, al pasar el siguiente par, ahora I_{o_2} es igual al I_{r_1} anterior, es decir, $I_{o_2} = I_{r_1}$, por lo que:

$$I_{r_2} = I_{o_2} \cos^2 \alpha_2 = I_{o_1} \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2$$

Siguiendo esta tendencia, el resultado final, sería que:

$$I_{r_5} = I_R = I_{o_1} \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_3 \cos^2 \alpha_4 \cos^2 \alpha_5$$

La cual se hace cero si, y solo si, alguno de los ángulos es de 90° .

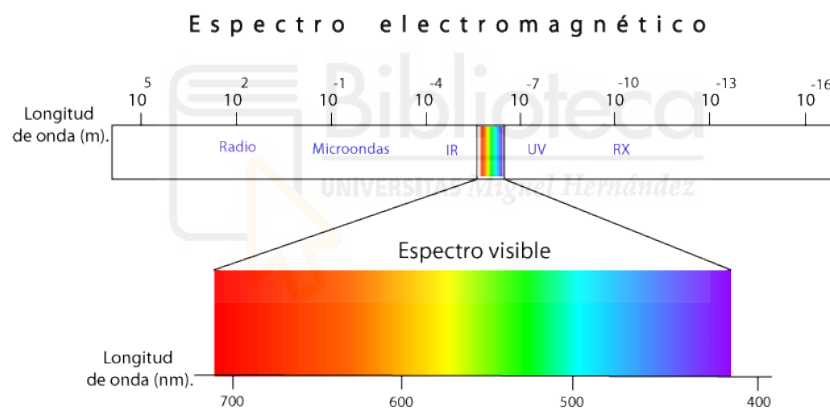
2.6. Otros

2.6.1. Medición de la velocidad de la luz

Medir la velocidad de la luz es un aspecto fundamental de la física, que a menudo requiere técnicas sofisticadas para obtener resultados precisos y confiables debido a lo extremadamente alta que es. Para ello, se han empleado varios métodos, como el método de espejo giratorio de Foucault con una fuente láser (Domkowski et al., 1972), que arrojó un resultado de $c = 3,00 \pm 0,02 \cdot 10^8$ m/s. Otros enfoques incluyen el uso de una célula Kerr

(el efecto Kerr es una birrefringencia creada en un material por un campo eléctrico exterior) para modular la luz a altas frecuencias y una célula fotoeléctrica para la detección (dePillis & Wudka, 2013), lo que dio como resultado un valor de $299,764 \pm 15 \text{ km/seg}$. Asimismo, el Laboratorio Nacional de Física propone mediciones de frecuencia y longitud de onda con un láser de CO₂ para determinar la velocidad de la luz con precisión (Voudoukis, 2018), una opción más o menos sencilla para realizar experimentos parcialmente elaborados en clase, pero que sale de nuestra zona de trabajo, ya que pretendemos que el presupuesto sea el menor posible. En nuestro caso lo realizaremos de otra forma mucho más asequible para obtener una medición aproximada de la velocidad de la luz.

A lo largo de todo este trabajo hemos mencionado en numeradas ocasiones a la luz, pero no hemos hecho alusión completa a su comportamiento ondulatorio. La luz se propaga en forma de onda electromagnética transversal, de forma que poseerá picos y valles separados por una longitud igual a la longitud de onda particular de la onda que estemos tratando. Por ejemplo, si se trata de un foco de luz roja, la longitud de onda (λ) será de unos $625 - 740 \text{ nm}$.



(a)

Figura 16: Esquema del espectro electromagnético. (AulaClic, 2020)

También existe la llamada frecuencia de una onda, relacionada con el periodo de la misma. La definición del periodo es bastante sencilla. Podemos pensar, por ejemplo, en el periodo orbital de la Tierra alrededor del sol, es decir, 365 días. Por tanto, estamos hablando de una cantidad temporal, algo que ocurre de forma regular y que es posible contabilizar. En general, lo definiremos como el tiempo que tarda un objeto en completar un ciclo o una revolución. Ahora bien, la frecuencia se define sencillamente como la inversa del periodo: $\nu = 1/T$, donde T es el periodo y ν es la frecuencia, de forma que nos indica el número de veces por unidad de tiempo que se completa un ciclo o revolución.

Por otro lado, tenemos una fantástica relación entre la longitud de onda de una onda electromagnética y su frecuencia que, además, involucra a la velocidad de la luz. Esta es:

$$c = \nu\lambda \quad (2.13)$$

Dicho lo anterior, es claro que, conociendo la frecuencia y la longitud de onda, es posible obtener la velocidad de la luz tan simplemente multiplicando estas dos cantidades. En el experimento que realizaremos vamos a obtener estas dos cantidades, para lo que necesitaremos un microondas, que en general todos tenemos en casa o incluso en el trabajo. La frecuencia de trabajo estándar para la mayoría de los hornos de microondas domésticos es de 2.45 GHz (aunque es posible comprobarlo en la información del fabricante), por lo que ya sabemos cuál es, aproximadamente, la frecuencia que buscamos, por lo que solo resta encontrar la longitud de onda.

Para encontrar la longitud de onda utilizaremos la potencia del propio microondas sobre una tableta de chocolate. Puesto que el microondas trabaja con ondas electromagnéticas, encontraremos puntos de alta y baja intensidad, por lo que si calentamos la tableta de chocolate podremos ver puntos derretidos de la tableta con mayor intensidad que otros. La distancia entre estos puntos derretidos nos proporcionará la distancia entre dos picos de la onda electromagnética, es decir, la longitud de onda λ .

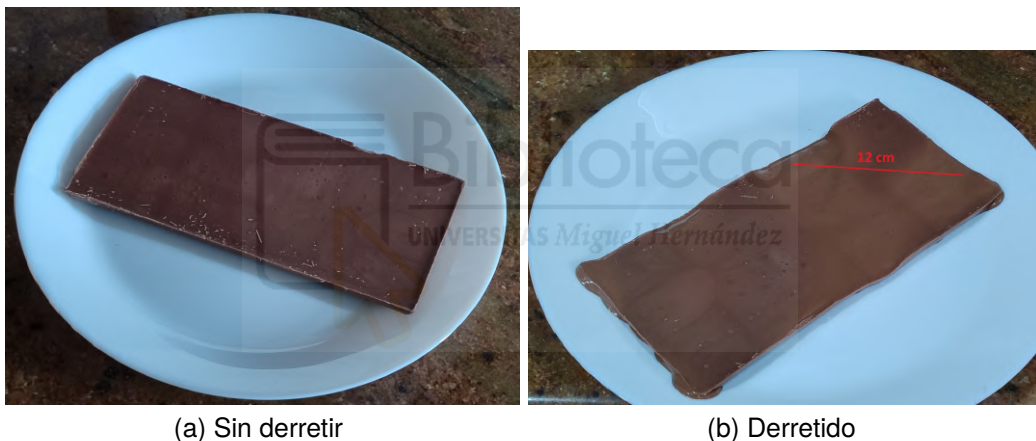


Figura 17: Podemos ver en la figura b) cómo en la tableta de chocolate hay puntos particulares más derretidos que otros.

Como vemos en la Figura 17, hemos encontrado dos puntos en los que se ha derretido más, por lo que será la distancia que mediremos, donde se ha obtenido que $\lambda \approx 12 \text{ cm}$, de forma que:

$$c = \nu\lambda = 2,45 \cdot 10^9 \cdot 0,12 \approx 294 \cdot 10^6 \text{ m/s} \approx 294000 \text{ km/s}$$

que es una cantidad muy cercana a la velocidad de la luz. Recordemos que en aire la velocidad de la luz no es tan próxima a 300000 km/s , sino que es un poco menor, por lo que podemos considerar que se trata de un resultado bastante aceptable (y dulce, si cabe).

2.6.2. Disco de Newton

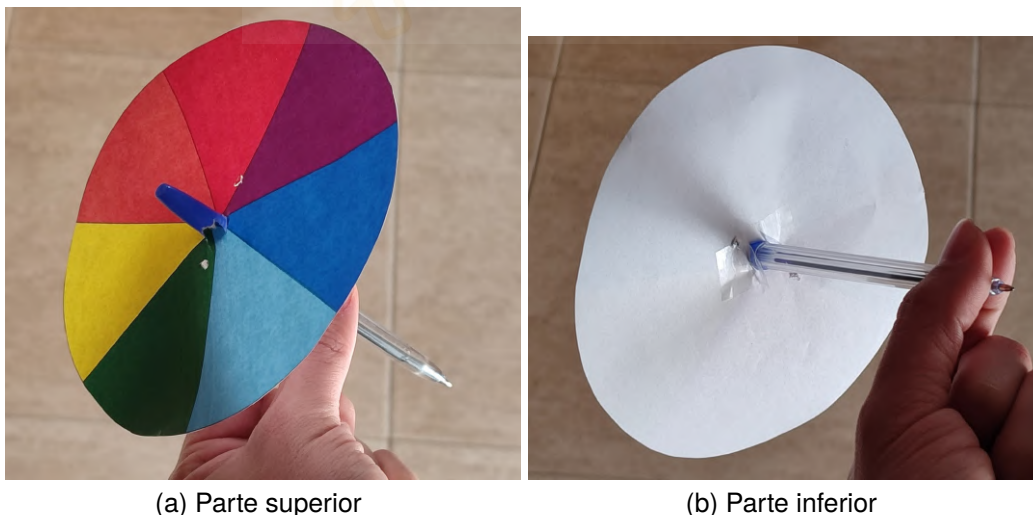
Este es uno de los experimentos más sonados por su simpleza y todo lo que consigue mostrar con tan poco. El disco de Newton es una herramienta clásica de enseñanza óptica

que demuestra la aparición del color blanco al girarlo debido a la síntesis aditiva de los colores impresos que hay en él (Silveira & Barthem, 2016). A pesar de su nombre, disco de Newton, muchos otros personajes científicos teorizaron sobre este disco antes que él. Fue Ptolomeo (100 dc. - 170 dc.) quien desarrolló el experimento de una rueda con diferentes colores que gira, extrayendo algunas conclusiones sobre la mezcla de los colores (Ptolemy & Smith, 1996). Desde este punto, muchos intentaron dar una explicación al fenómeno de la mezcla de colores, como pueden ser Porphyry (243 dc. - 305 dc.) (Barker, 2015) o Ibn al-Haytham (965 dc. - 1040 dc.) (Alhazen & Smith, 2001), pero ninguna fue correcta o completamente válida, aunque todos llegaron a una conclusión parecida: la vista necesita cierto tiempo para discernir un color.

Finalmente, fue Newton quien dio sentido a este experimento con su teoría del color y sus experimentos de refracción que lo llevaron a deducir que la luz blanca está formada por los siete colores primarios rojo, naranja, amarillo, verde, azul, violeta e índigo. Es por esto que el experimento se bautizó con quien le dio el sentido que merecía.

La naturaleza de la luz es complicada, por lo que asumir que es una mera combinación de diferentes colores es escaso. Sin embargo, para el problema que nos atañe, lo tomaremos como tal, de forma que podemos intentar obtener, al igual que se hizo en la antigüedad, el color blanco (o quizás gris debido a las imperfecciones) a través de la creación de un disco de Newton.

El diseño experimental es el que podemos observar en la Figura 18. Se ha impreso un disco en papel (si bien para hacer esto se podría coordinar con la asignatura de plástica cuando se esté estudiando la teoría del color y que los estudiantes fabriquen su propio disco).



(a) Parte superior

(b) Parte inferior

Figura 18: Véase que en la parte inferior se han utilizado dos trozos de celo para mantener fijo el disco al bolígrafo y que no de problemas a la hora de hacerlo girar.

La parte difícil viene en el momento de querer hacerlo girar. Hay varias formas de hacerlo, algunas de ellas son:

- Hacer una peonza.

- Hacer pasar un hilo por dos puntos cercanos al centro del disco y enrollar el hilo para luego estirar y que gire el disco según se desenrolla el hilo.
- Agujerear el centro del disco y pasar un lápiz o bolígrafo y hacerlo girar manualmente.
- Conseguir unirlo a un motor capaz de girar.

En primer lugar, se intentó el método del hilo (en la figura anterior se pueden apreciar dos incisiones a un lado y a otro del centro del disco) pero, al ser simple papel, no funcionó como se esperaba (para que funcionara quizás sería necesario hacerlo con cartón). Por tanto, como se quería mantener la tendencia de utilizar materiales básicos, se optó por la opción del bolígrafo y hacerlo girar manualmente, la cual dio bastante buenos resultados (Figura 19). Sin embargo, es visible que no se ha conseguido como tal el color blanco, debido a que la velocidad de giro no es suficiente, pero sí es posible ver que se comienzan a mezclar los diferentes colores.

Una forma de orientar correctamente esta práctica en clase podría ser que los estudiantes, como bien se ha dicho anteriormente, fabricaran su propio disco y, más tarde, realizar un taller en la clase de física donde se utiliza un motor con el que poder apreciar correctamente la combinación de los colores en los diferentes discos de cada alumno. Se pueden probar, inclusive, diferentes diseños de disco para ver cuál da mejores resultados.

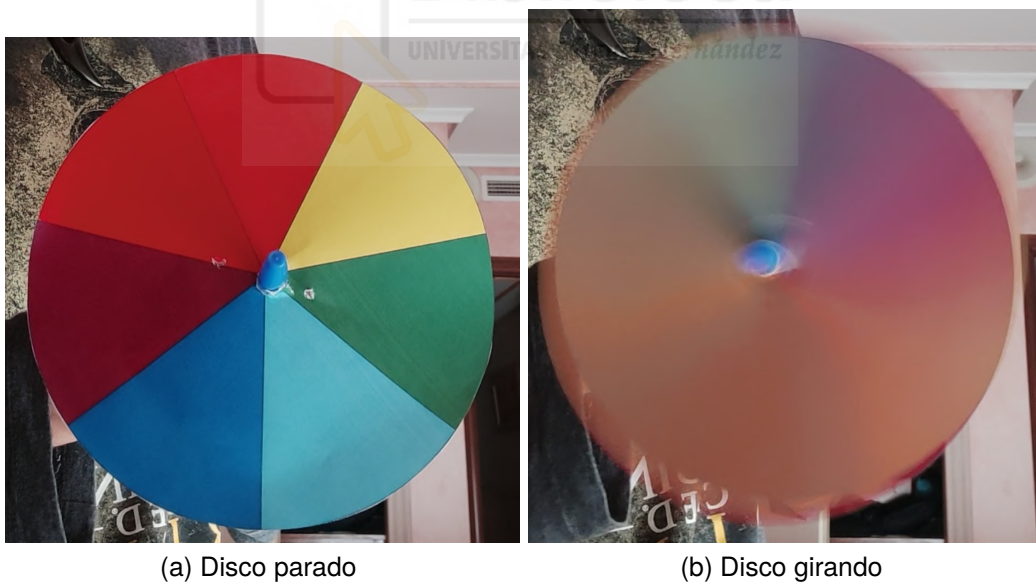
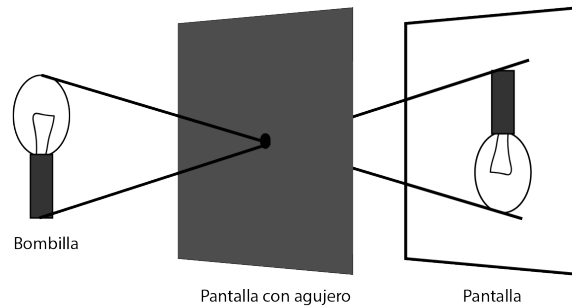


Figura 19: Se produce la mezcla de colores al hacerlo girar.

2.6.3. Propagación rectilínea de la luz

La luz obedece el principio de "la luz viaja en línea recta". Pruebas de esto son las sombras de borde fino formadas por los objetos que interrumpen el paso de la luz. Más formalmente, esto es debido al Principio de Fermat, un concepto fundamental en la óptica geométrica que sirve de base para derivar las leyes de reflexión y refracción (Deng et al., 2022; Rousseau & Felbacq, 2023), como puede ser la Ley de Snell que hemos visto anteriormente.

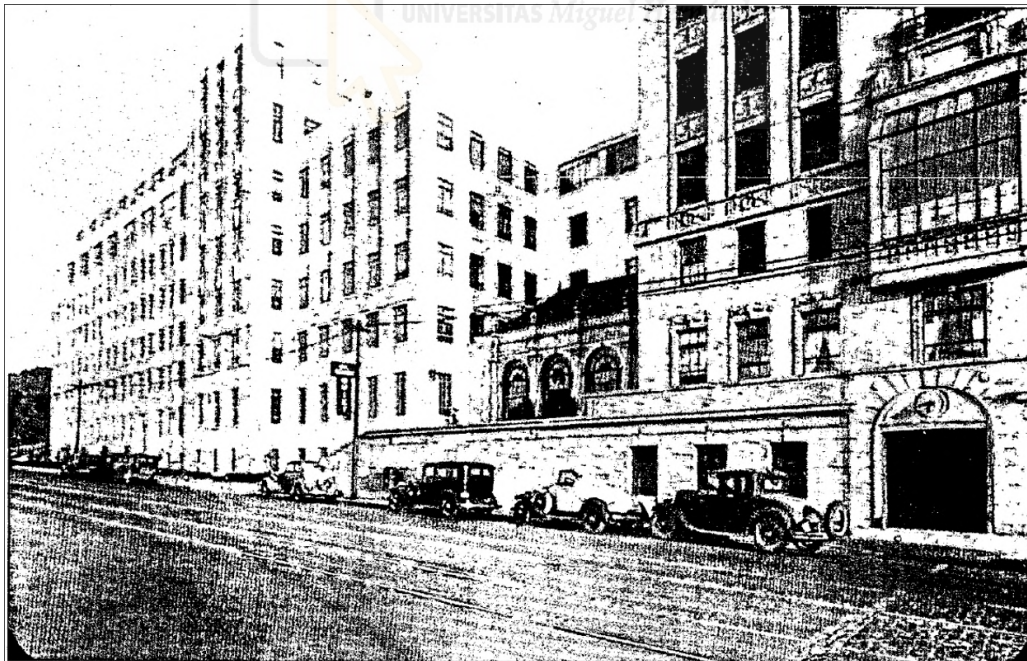
Debido a esto, si hacemos pasar la luz a través de un agujero pequeño, podremos obtener una imagen invertida de lo que había antes del agujero, como vemos en el esquema siguiente:



(a)

Figura 20: Paso de la luz a través de un agujero, formando una imagen invertida.

Este curioso y útil fenómeno se llegó a utilizar para la creación de una cámara llamada "*pinhole camera*". Podemos ver un ejemplo de toma de fotografía con esta cámara en la Figura 21.



(a)

Figura 21: Fotografía de la Universidad de California Hospital, San Francisco, tomada con una "*pinhole camera*". (Jenkins & White, 1976)

Lo que haremos nosotros será reproducir este fenómeno, el cual es particularmente sencillo. Con un trozo de papel, le haremos una perforación (*pinhole*) en la zona central. Tras

ello, solo necesitamos una fuente de luz con la que probar el experimento. En nuestro caso usaremos la bombilla que aparece en la Figura 22. Se ha tapado parte de la bombilla para que se aprecie mejor la inversión de la imagen, ya que, si no, es aparentemente simétrica y no se observa correctamente el efecto.



(a)

(b)

(c)

Figura 22: (a) Diseño experimental, donde se han hecho orificios de diferente tamaño. (b) Fuente de luz. (c) Imagen de cerca de la bombilla. Se ha utilizado masilla adhesiva reutilizable para pegar un trozo de papel a la bombilla.

En esta última Figura 22 podemos observar que tanto las imágenes (a) como (b) están realizadas desde un mismo punto, siendo la única diferencia que la cámara en (a) se ha dirigido hacia abajo y en (b) hacia arriba para hacer las respectivas fotografías. Sin embargo,

a la vista de (a), vemos que la parte de la bombilla que está tapada con papel estaría más alejada de la cámara según podemos dilucidar a partir de la sombra generada, mientras que en la imagen (b) vemos que el papel que tapa la bombilla está en realidad en la parte más cercana a la cámara, probando así la inversión de la imagen.

3. Discusión y conclusiones

Ya hemos visto que el estudio y la comprensión de la óptica son fundamentales en la formación científica de los estudiantes, ya que nos permiten explorar y entender el comportamiento de la luz, uno de los fenómenos más fascinantes y omnipresentes en nuestro universo. A través de la realización de este tipo de experimentos sencillos, los estudiantes tienen la oportunidad de interactuar directamente con los principios físicos que gobiernan el mundo que les rodea.

A lo largo de este trabajo hemos podido ver una serie de experimentos que abarcan una amplia gama de fenómenos ópticos, desde la refracción hasta la interferencia y la difracción, así como la mera reflexión, que no es tan sencilla cuando se estudia en profundidad. Cada experimento no solo proporciona una oportunidad para observar estos fenómenos en acción, sino que se convierte en un puente para los alumnos para la exploración activa y el descubrimiento. Al realizar estos experimentos en clase, proporcionamos a los estudiantes una experiencia práctica a la vez que fomentamos su curiosidad y su capacidad para plantear y responder preguntas científicas, incrementando su observación cuidadosa, medición precisa y análisis crítico de los resultados.

Por supuesto, también se ha prestado especial atención para asegurar que todos los experimentos seleccionados sean perfectamente realizables tanto en casa como en el entorno escolar, utilizando materiales que son sencillos de encontrar o que, en caso de necesidad, sean de bajo costo. En uno de los experimentos de difracción se ha necesitado el uso de un láser, por lo que la solución sería adquirir uno de bajo costo (que por lo general suele ser así), o bien utilizar las instalaciones del instituto, donde presumiblemente se podrá encontrar un láser.

Es importante destacar que la óptica no solo tiene aplicaciones en el ámbito académico, sino que también juega un papel crucial en numerosos aspectos de nuestra vida cotidiana y en una amplia gama de campos, desde la tecnología hasta la medicina. Al comprender los principios básicos de la óptica desde una edad temprana, los estudiantes están mejor preparados para comprender y apreciar estas aplicaciones en el mundo real.

En resumen, la realización de experimentos sencillos de óptica en el aula no solo enriquece la experiencia educativa de los estudiantes, sino que también les proporciona las habilidades y el conocimiento necesarios para comprender mejor el mundo que los rodea y contribuir al avance de la ciencia y la tecnología en el futuro. Es una oportunidad invaluable para inspirar a la próxima generación de científicos, ingenieros y pensadores creativos. Asimismo, la recopilación de experimentos de óptica presentada en este trabajo es una herramienta valiosa para profesores de secundaria que buscan ofrecer a sus estudiantes experiencias de aprendizaje significativas y motivadoras. La variedad de experimentos y su adaptabilidad a diferentes niveles educativos hacen de este recurso una herramienta útil

para cualquier docente de física.





Referencias

- Alhazen & Smith, A. M. (2001). *Alhacen's Theory of Visual Perception: A Critical Edition, with English Translation and Commentary, of the First Three Books of Alhacen's De Aspectibus, the Medieval Latin Version of Ibn Al-Haytham's Kitab Al-Manazir*. American Philosophical Society.
- AulaClic. (2020). *Espectro Electromagnético*. <https://www.aula clic.es/fotografia-photoshop/graficos/espectro1.gif>
- Barker, A. (2015, septiembre). *Porphyry's Commentary on Ptolemy's Harmonics: A Greek Text and Annotated Translation*. Cambridge University Press.
- Deng, Y., Wu, N., & Mao, Q. (2022). A Natural Exposition and Concise Derivation of Geometric Optics Laws by Fermat Principle. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 1, 155-162. <https://doi.org/10.54097/hset.v1i.443>
- dePillis, J., & Wudka, J. (2013, diciembre). *Illustrated Special Relativity through Its Paradoxes: A Fusion of Linear Algebra, Graphics, and Reality*. American Mathematical Soc.
- Domkowski, A. J., Richardson, C. B., & Rowbotham, N. (1972). Measurement of the Speed of Light. *American Journal of Physics*, 40(6), 910-912. <https://doi.org/10.1119/1.1986694>
- Doval, A., & Fuente, R. d. I. (2023). Brewster's Angle as Never Seen Before. *The Physics Teacher*, 61(1), 52-54. <https://doi.org/10.1119/5.0063687>
- Driscoll, W. G., Vaughan, W., & America, O. S. o. (1978). *Handbook of Optics*. McGraw-Hill Companies.
- Fibra Óptica*. (2015). <https://d7lju56vlbdri.cloudfront.net/video/flv/136411/3475882%7D>
- Jenkins, F. A., & White, H. E. (1976). *Fundamentals of optics*. McGraw-Hill Companies.
- Ptolemy & Smith, A. M. (1996). *Ptolemy's Theory of Visual Perception: An English translation of the optics*. American Philosophical Society.
- Rousseau, E., & Felbacq, D. (2023). Detailed derivation of the generalized Snell–Descartes laws from Fermat's principle. *Journal of the Optical Society of America A*, 40(4), 676. <https://doi.org/10.1364/josaa.478123>
- Silveira, M., & Barthem, R. (2016). Disco de Newton com LEDs. *Revista Brasileira De Ensino De Fisica*. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0090>
- Simón-Tor, J., Simón-Castellví, S., Simón, J., & Simón, C. (2004). Los mitos sobre el origen de los anteojos (III). *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*, 79, 409-411. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0365-66912004000800011&nrm=iso
- Voudoukis, N. F. (2018). Speed of Light Measurement with a Simple Way. *European Journal of Engineering Research and Science*, 3(4), 69. <https://doi.org/10.24018/ejers.2018.3.4.714>
- Wenning, C. J., & Vieyra, R. E. (2020, septiembre). Using technology effectively. En *Teaching High School Physics* (pp. 3-1-3-20). AIP Publishing LLC Melville, New York. http://dx.doi.org/10.1063/9780735422018_003
- Williams, K. M., Nathanson, C., & Paulhus, D. L. (2010). Self-Report Cheating Scale. *PsychTESTS Dataset*. <https://doi.org/10.1037/t03507-000>