

CAPÍTULO 1

Evolución histórica de la Óptica y la Fotónica

1.1	¿Por dónde empezamos?	2
1.2	Arquímedes y la defensa de Siracusa	4
1.3	Entendiendo la reflexión y refracción	6
1.4	Al-Hazen: el padre de la óptica moderna	13
1.5	Roger Bacon: filósofo, teólogo y científico	16
1.6	Evolución de lentes y gafas	17
1.7	Leonardo da Vinci	18
1.8	Telescopio: “espiando” a distancia	21
1.9	Galileo: y sin embargo	22
1.10	La Ley de Snell	24
1.11	Refracción y espejismos	26
1.12	El microscopio y el padre de la microbiología	27
1.13	El Principio de Fermat	29
1.14	Huygens y Newton: ondas y partículas	31
1.15	Thomas Young y el funcionamiento del Ojo Humano	33
1.16	Wollanston y la composición del Sol	34
1.17	William Herschel y el descubrimiento de la luz invisible	37
1.18	Maxwell y la Teoría Electromagnética	37
1.19	Becquerel y Hertz: el efecto fotoeléctrico	38
1.20	Conclusiones	39
1.21	Anexo: entendiendo el Arco Iris	40

1.1. ¿Por dónde empezamos?

¡Por el principio! Claro que, sin ponernos “filosóficos”, no es fácil datar el comienzo de la historia de la Óptica. Quizás sea conveniente comenzar por definir qué podemos entender por Óptica:

“La Óptica es la rama de la física que estudia las propiedades de la luz, incluyendo su interacción con la materia y la construcción de elementos que hagan uso de ella o permitan su detección” (Wikipedia (versión inglesa))

Comenzaremos precisamente por el final, ya que podemos entender que la Óptica comienza cuando el ser humano fabrica los primeros utensilios para aprovechar las propiedades de la luz:



Figura 1. Espejo egipcio de madera y cobre, expuesto en el Museo del Louvre. Fuente: Wikimedia Commons (CC BY-SA 1.0). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Egypte_louvre_162.jpg

Los primeros “objetos” ópticos de los que se tiene conocimiento son, probablemente, espejos metálicos encontrados en tumbas egipcias y empleados probablemente para desviar la luz solar; así como lentes encontradas tanto en Pompeya como Mesopotamia (3000 a.C.) y Creta.

En el siglo XV a.C., durante el reinado de Tutmés III, aparecen los primeros vasos de vidrio^{1 2} y esmaltes artísticos de este material.

¹El vidrio es un material amorfo que se obtiene por fusión a unos 1500 °C de arena de sílice (SiO₂), carbonato de sodio (Na₂CO₃) y caliza (CaCO₃).

²El término cristal.^{es} utilizado muy frecuentemente como sinónimo de vidrio, aunque es incorrecto en el

En el siglo VI a.C. Confucio (China entre el 551 y el 479 a.C.) habla de un zapatero que usaba “vidrios” en los ojos. Esto hace suponer el uso de este material como decorativo o medicina y Empédocles de Agrigento (Sicilia hacia el año 495 a.C.) menciona por primera vez el campo visual.

Las primeras referencias escritas a la existencia de lentes son bastante antiguas. Un relato histórico afirma que se encontró una lente convergente de cristal de roca entre las ruinas de Nínive. También Aristófanes, en su obra "Las nubes" que se remonta al 423 a.C., cita la existencia de lentes: en la obra Strepsiades planea usar una lente quemadora para enfocar los rayos del Sol en una tableta de cera y así fundir el registro de la deuda de una apuesta.

En el siglo V a.C. los griegos, romanos, árabes... conocían las propiedades de los espejos, cauterizaban las heridas con lentes positivas y para encender usaban unas esferas de vidrio llenas de agua llamadas “cristales encendedores”. Quizá la primera lente que hubo en el mundo fue la que construyó Aristófanes en el año 424 a.C. con un globo de vidrio soplado, lleno de agua. Sin embargo, su propósito no era la de amplificar imágenes, sino la de concentrar la luz solar.

Es en la época de la **antigua Grecia** donde se tratará de dar unas primeras explicaciones al **fenómeno de la visión**, proponiendo diferentes teorías en las que los conceptos de “luz” y “visión” se entremezclaban¹.

Así por ejemplo, la **escuela Pitagórica** propone que la visión es causada por la **proyección de imágenes lanzadas desde los objetos** hacia el ojo.

Por contra, **Euclides y los “platónicos”** defienden que la sensación visual se produce cuando los “haces oculares” enviados desde los ojos chocan con los objetos.

Una tercera explicación es propugnada por **Aristóteles** que, en desacuerdo con las anteriores teorías, propone que cuando el medio que se sitúa entre el ojo y el objeto está en reposo, hay oscuridad. Sin embargo, si el medio es excitado por el “fuego” del objeto, el medio pasa a un estado activo, volviéndose transparente. De esta manera, los colores del objeto pueden viajar hasta los ojos, dependiendo de las características del medio los colores que serán realmente transmitidos.

Al margen de explicar el fenómeno de la visión, los matemáticos griegos también se preocuparon por los **aspectos geométricos de la óptica**. Entre las diferentes contribuciones destacan las de **Euclides**, que defendió la propagación rectilínea de la luz y la igualdad de los ángulos de incidencia y de reflexión².

ámbito científico debido a que el vidrio es un sólido amorfo (sus moléculas no están dispuestas de forma regular) y no un sólido cristalino.

¹Breve Historia de la Óptica (José Villasuso) <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>

²Cuando la luz incide sobre una superficie, por ejemplo un espejo, y es reflejada, los ángulos que forman los “rayos” incidentes y los reflejados con la superficie reflectante son idénticos.

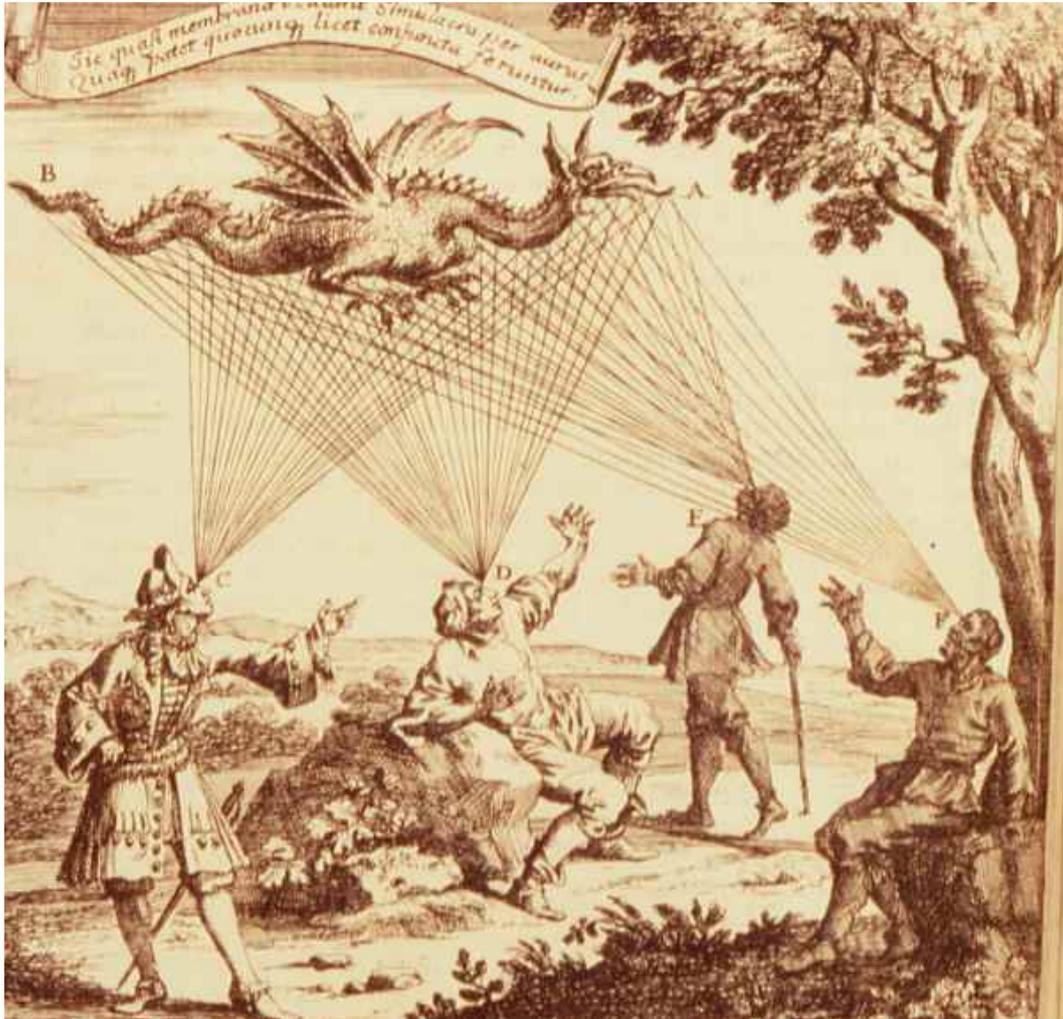


Figura 2. Ilustración de la Edad Media representando la explicación *platónica* del fenómeno de la visión . Licencia: Dominio Público. Fuente: <https://bit.ly/34PUCIy>

1.2. Arquímedes y la defensa de Siracusa

A raíz de su supuesta defensa de Siracusa con un sistema de grandes espejos, a Aristóteles se le podría considerar como el precursor de la **energía termosolar**, en la que, mediante sistemas de espejos, se utiliza la energía del Sol para calentar determinados fluidos y generar posteriormente energía eléctrica. Esta tecnología es también referida en ocasiones como energía solar termoeléctrica o, en inglés CSP: *Concentrating Solar Power* o Energía Solar de Concentración. Esta última denominación puede inducir a confusión, ya que en castellano se suele utilizar el término de “concentración” para referirse a la energía solar fotovoltaica en la que se usan sistemas de espejos para concentrar la energía del Sol en un área pequeña.

Aunque el uso de espejos para cauterizar heridas y otros usos se remonta a épocas anteriores, se puede considerar a **Arquímedes** como uno de los “padres” de la energía solar térmica. O al menos según la leyenda, ya que la veracidad histórica de su supuesta defensa de Siracusa del ataque de los romanos con un **sistema de grandes espejos capaces de concentrar la energía del Sol** y quemar los barcos romanos no está muy clara. Al margen

de la supuesta viabilidad técnica del sistema, las dudas surgen también del hecho de que las primeras fuentes históricas que mencionan estos acontecimientos son muy posteriores.



Figura 3. Grabado que ilustra la supuesta defensa de Siracusa por parte de Arquímedes usando un sistema de espejos para concentrar la luz del Sol. Licencia: Dominio Público.

Sin embargo, este supuesto sistema (que, de existir, no fue muy exitoso ya que Siracusa sucumbió al ataque, muriendo Arquímedes a manos de un soldado romano) ha tratado de ser replicado en múltiples ocasiones: desde el programa “Cazadores de Mitos”¹ al mismísimo MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts)², con resultados diversos.

La obra de Arquímedes influenciará a muchos científicos posteriores, por supuesto también en el cambio de la óptica, donde tenemos el ejemplo de Herón, que estudio espejos de diversas formas, tanto planos como cóncavos y convexos.

¹Puedes ver el vídeo en el siguiente enlace: <https://youtu.be/kAWBvZcBZ0U>

²Puedes consultar información sobre el experimento del MIT en el siguiente enlace: <http://bit.ly/1md1NdI>

Importante 1.1: La muerte de Arquímedes

Arquímedes fue un gran científico, con contribuciones destacadas en matemáticas, física, ingeniería y astronomía. Entre sus aportaciones más celebradas destacan aquellas realizadas en el cálculo integral, en la estimación del número pi, en la formulación de la ley de la palanca y el diseño de la polea compuesta y en la propuesta de la ley de la hidrostática, por mencionar las más relevantes. Arquímedes murió durante la conquista romana de Siracusa, pese a que los mandos militares habían dado órdenes expresas de que se respetase su vida. Aunque no existe una única versión, parece que su muerte pudo ser provocada por su carácter de "genio", al negarse a seguir las indicaciones de un soldado romano por encontrarse resolviendo un problema en ese momento.

Cuestión 1.1: La muerte de Arquímedes

Como actividad, indaga en la supuesta veracidad de la defensa de Siracusa con grandes espejos. Con las fuentes que hayas consultado, trata de llegar a una conclusión propia: ¿crees que fue real la historia de Arquímedes?

1.3. Entendiendo la reflexión y refracción

Tomando como excusa la revisión histórica que estamos realizando, nos detendremos brevemente en la figura de **Claudio Ptolomeo** para explicar dos fenómenos interrelacionados y fundamentales dentro de la óptica y de nuestra vida cotidiana: la **reflexión** y la **refracción** de la luz.

Ptolomeo, que vivió durante el siglo II d.C. en Egipto, se cree que concretamente trabajando en la famosa biblioteca de Alejandría, contribuyó de manera notable en diferentes áreas. Probablemente sus contribuciones más notables se refieren a la astronomía, donde propuso su famoso modelo de universo geocéntrico, situando a la Tierra inmóvil en el centro del mismo y con el resto de cuerpos celestes girando a su alrededor.

Sin embargo, también realizó estudios y trabajos en geografía, música, astrología y, por supuesto, óptica. En este último campo trató de estudiar las propiedades de la luz, más concretamente del fenómeno de reflexión y refracción. En uno de sus libros de óptica informa de la construcción de un aparato para la medida exacta de los ángulos de incidencia y refracción, intentando obtener una relación entre ambos, aunque no fue capaz de formular una ley al respecto.

En este sentido, escribió tablas con valores de los ángulos para diversos medios transparentes y llegó a afirmar que los rayos que llegan de las estrellas se refractan en el aire, motivo por el cual la trayectoria (de la luz) observada difiere de la real.

1.3.1. Reflexión de la luz

¿Cómo podemos explicar los fenómenos de **reflexión y refracción de la luz**? Comencemos por el primero, al que estamos acostumbrados y que probablemente seríamos capaces



Figura 4. Dibujo de Claudio Ptolomeo de un libro del siglo XVI. Licencia: Dominio Público. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ptolemy_16century.jpg

de explicar de manera intuitiva: **la reflexión de la luz** es el fenómeno que se produce cuando ésta se encuentra, en su propagación, con un medio “distinto” (de distinta naturaleza), cambiando de dirección e invirtiéndose su sentido de propagación.

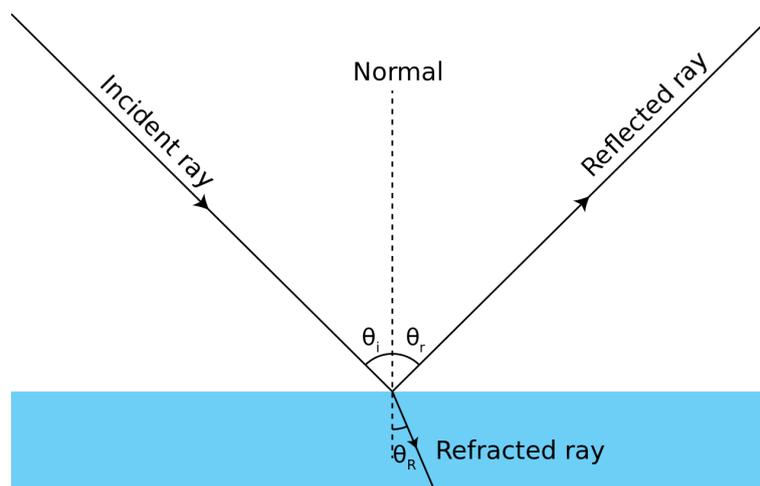


Figura 5. Esquema ilustrativo de los fenómenos de reflexión y refracción de la luz. Licencia: (Dominio Público (modificada)). Fuente: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_\(optics\)#/media/File:Ray_optics_diagram_incidence_reflection_and_refraction.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ray_(optics)#/media/File:Ray_optics_diagram_incidence_reflection_and_refraction.svg)

El fenómeno de la **reflexión** lo apreciamos de manera común en nuestra vida cotidiana, por ejemplo cada vez que nos miramos en un espejo. Otro ejemplo ilustrativo es lo que ocurre con la luz cuando, tras viajar por el aire, se encuentra con el agua, por ejemplo del mar. Esta situación se representa en la **Figura 6**, donde vemos la reflexión producida en el agua del templo (situado en Singapur).

Un último (y curioso) ejemplo al que estamos acostumbrados es al de observar el reflejo de la luz en personas o animales en fotografías. Veamos en la [Figura 7](#) el ejemplo con un simpático gato. ¿A qué se debe ese brillo tan espectacular en sus ojos? La respuesta está en la reflexión de la luz: la luz que penetra en el ojo de perros o gatos llega hasta el fondo del globo ocular y ahí es detectada por los fotorreceptores (células especializadas en convertir la luz en señales eléctricas interpretables por el cerebro). Sin embargo, una gran parte de esa luz no es detectada y llega a la pared posterior del ojo. En los perros y gatos esta superficie refleja la luz, aumentando así las posibilidades de que, en el camino de vuelta, la luz sea detectada. Toda la luz que no es absorbida por los fotorreceptores sale del ojo, provocando ese efecto tan curioso representado en la imagen.

Para concluir esta breve explicación sobre la reflexión de la luz, probablemente resta comentar que el ángulo con el que el rayo es reflejado por la superficie es idéntico al ángulo que forma el rayo incidente con dicha superficie. Este hecho se aprecia perfectamente en la [Figura 5](#) anteriormente comentada.



Figura 6. Ejemplo de reflexión de la luz en el agua (templo en Singapur). Licencia: (Dominio Público). Fuente: <http://bit.ly/2BJaVWS>



Figura 7. Ejemplo de reflexión de la luz en los ojos de un gato. Licencia: (CC BY-SA 3.0). Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reflection_of_light_from_cat%27s_eye.jpg

Importante 1.2: El índice de refracción

Anteriormente hemos comentado que la luz se refleja (o refracta) cuando se encuentra con un medio “distinto” o de distinta naturaleza. Una explicación más técnica podría indicar que la luz sufre estos fenómenos cuando se encuentra con un medio cuyo índice de refracción es distinto al que está viajando.

El índice de refracción n nos da una idea de la velocidad con la que viaja la luz en un medio. Por ejemplo, el índice de refracción del aire es $n = 1$, mientras que el del agua es $n = 1.33$. La luz viaja más rápida en el aire que en el agua, por lo que vemos que la velocidad de propagación de la luz en un medio es inversamente proporcional al índice de refracción de dicho medio.

De manera intuitiva podemos pensar que, cuanto más denso sea un medio, más lenta viajará la luz en él.

Importante 1.3: La velocidad de la luz

¿Te ha sorprendido lo que acabamos de comentar? Quizás pienses que la velocidad de la luz es constante y, además, como postuló Albert Einstein, es la máxima velocidad a la que se puede viajar en nuestro universo $c = 3 \cdot 10^8 m/s$.

En realidad esa es la velocidad de la luz en el vacío. Como acabamos de comentar, la velocidad de la luz depende de las características del material por el que viaje. Por ejemplo el índice de refracción del diamante es 2.42, por lo que la velocidad de la luz en el diamante será de $v = c/2.42$.

1.3.2. Refracción de la luz

Aunque la reflexión es probablemente un fenómeno más intuitivo, todos estamos también acostumbrados a observar en nuestra vida cotidiana el fenómeno de refracción de la luz. Veamos el ejemplo de la [Figura 8](#): cuando observamos un lápiz colocado dentro de un vaso con agua, la parte del lápiz sumergida en el agua da la impresión de estar “doblada” o “torcida” con respecto a la parte que está fuera.



Figura 8. Ejemplo de refracción de la luz con un lápiz y un vaso de agua. Licencia: (CC BY-SA 4.0). Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/Refracci%C3%B3n_de_un_l%C3%A1piz.jpg

¿Por qué ocurre esto? Precisamente por el fenómeno de **refracción**, que aparece cuando la luz pasa de un medio a otro, por ejemplo del aire al agua, teniendo ambos medios una “densidad óptica” o índice de refracción distintos. Cuando la luz pasa del aire (con índice de refracción igual a 1) al agua (índice de refracción de 1.33), la luz cambia su velocidad y, consecuentemente, su dirección. ¿Por qué parece que el lápiz está “doblado”? Trataremos de explicarlo con la [Figura 9](#). Los rayos de luz que viajan de la parte del lápiz que está fuera del agua al ojo lo hacen en línea recta. Sin embargo, los rayos de luz que viajan de la parte del lápiz sumergida en el agua al ojo lo hacen siguiendo una trayectoria “curvada”. Si tomamos como referencia el extremo del lápiz, el punto **X**, vemos como los rayos de luz salen en una dirección, pero al llegar a la frontera entre el agua y el aire, esa trayectoria se desvía, llegando posteriormente al ojo. Así, el ojo piensa que el lápiz está realmente en **Y**, al ser esa la dirección de los rayos de luz que le llegan.

En la tabla de la [Figura 10](#) se muestra el índice de refracción de diferentes elementos. Puede apreciarse como, desde un punto de vista genérico, podemos afirmar que a mayor densidad del material, mayor es el índice de refracción asociado y, por tanto, menor será la velocidad de propagación de la luz en ese medio, algo que podemos considerar “intuitivo”: a mayor número de “obstáculos”, más difícil será para la luz atravesarlos.

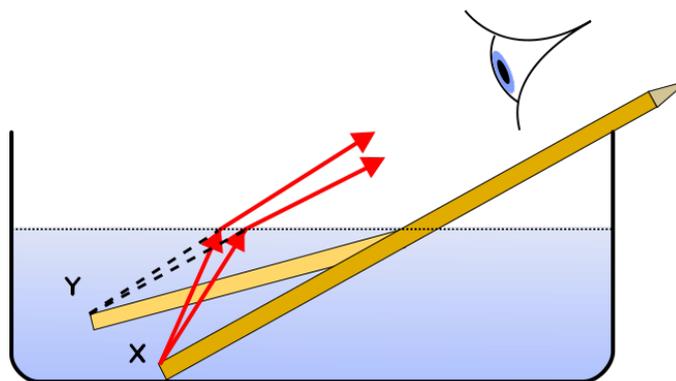


Figura 9. Percepción del fenómeno de refracción de la luz con un lápiz y un vaso de agua. Licencia: (CC BY-SA 3.0). User: Theresa knott Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Refraction#/media/File:Pencil_in_a_bowl_of_water.svg

SUSTANCIAS	n
Aceite	1,51
Agua	1,33
Aire	1,00
Cuarzo	1,54
Diamante	2,42
Glicerina	1,47
Hielo	1,31

Figura 10. Índices de refracción asociados a diferentes elementos. Fuente: weberciencias.blogspot.com

Importante 1.4: La velocidad de la luz (II)

Un ejemplo interesante para comprender mejor el concepto del índice de refracción: la luz del Sol tarda 8 minutos en llegar a la Tierra (desde que escapa de la superficie del Sol). Si en vez de vacío tuviésemos agua entre el Sol y la Tierra, la luz tardaría 11 minutos en completar dicho trayecto.

La explicación a este curioso efecto la podemos entender rápidamente si analizamos el esquema representado en la [Figura 12](#), donde vemos lo que ocurre con la luz

Cuestión 1.2: Efectos curiosos de la refracción

Estamos acostumbrados a algunos efectos ópticos producidos por la refracción, como las habituales imágenes del lápiz “torcido” dentro del vaso de agua. Sin embargo, otros efectos pueden parecernos más sorprendentes, como probablemente ocurrirá con el experimento mostrado en la [Figura 11](#). Como puede apreciarse en las imágenes, si delante de un folio con dos flechas impresas ponemos un vaso, éste distorsionará en cierta medida la imagen, haciendo que las flechas aparezcan más pequeñas. Lo realmente sorprendente es que si llenamos el vaso con agua, las flechas ... ¡cambian de sentido!

Trata de explicar este fenómeno realizando una representación esquemática de lo que ocurre. Tras ello puedes consultar a continuación la breve explicación que encontrarás a continuación.

Puedes ver un vídeo del experimento en el siguiente enlace: <https://bit.ly/3EAkszP>

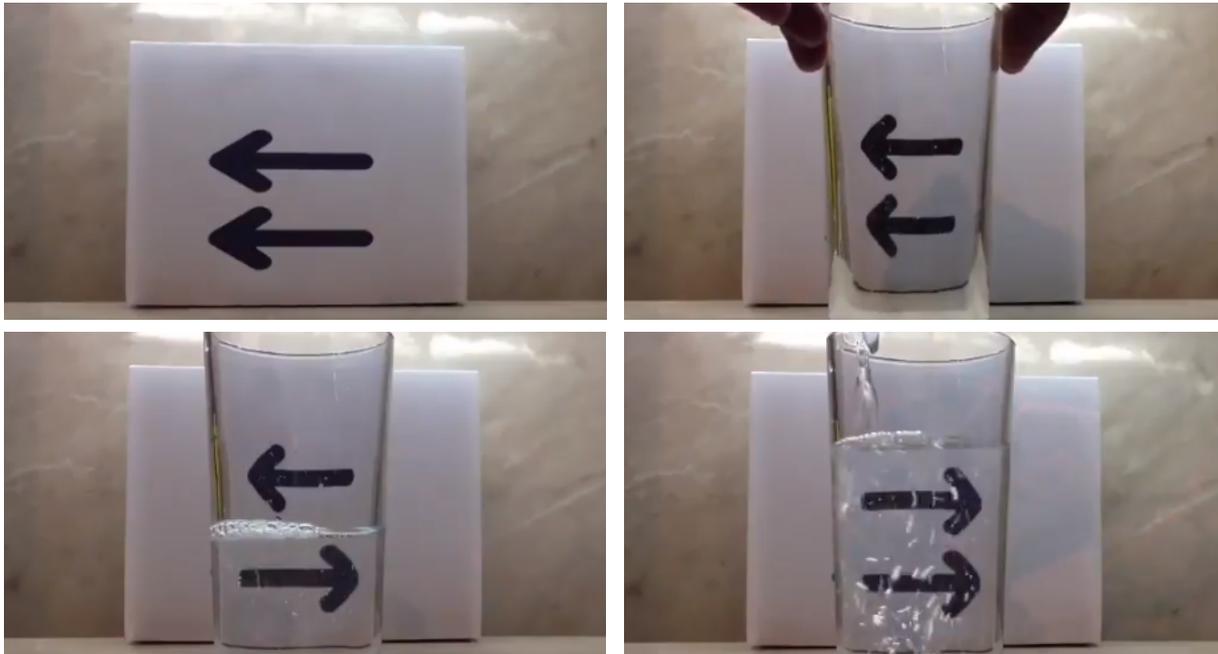


Figura 11. Experimento de refracción realizado con un vaso y agua. Enlace al vídeo: <https://bit.ly/3EAkszP>

El fenómeno representado de la inversión de la flecha mostrado en la figura anterior se puede explicar muy bien por medio de la [Figura 12](#), donde se muestra un esquema con una vista superior (desde arriba) del vaso. Pensemos que el vaso actúa como una lupa, concentrando la luz (los rayos de luz) hacia un punto central, que denominamos **punto focal**¹. Este fenómeno seguramente lo intuimos de manera natural ya que sabemos que las lupas concentran la luz (y su energía asociada) en un punto determinado en el que se generará calor, precisamente por esa concentración de energía. Tal y como se muestra en el esquema, una vez superado el punto focal la imagen aparece invertida, ya que los rayos que

¹Las lentes, por ejemplo las de una cámara de fotos o las de nuestras gafas, tienen una distancia focal determinada; esto es, una distancia a la cual se produce un enfoque óptimo.

han cambiado dirección al sufrir refracción al pasar por el vaso de agua se cruzan en el punto focal y a partir de ese momento, la luz que estaba a la izquierda (punta de la flecha) aparece a la derecha, y viceversa.

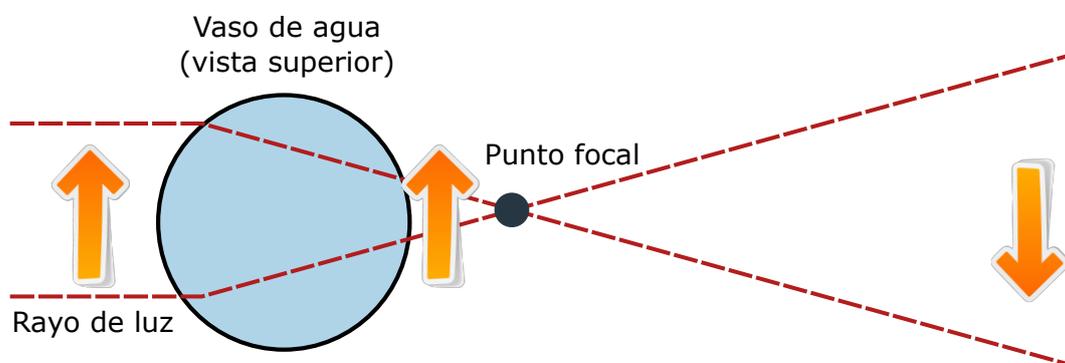


Figura 12. Experimento de refracción realizado con un vaso y agua (explicación). Fuente: elaboración propia.

La **refracción de la luz** explica infinidad de procesos, desde la visión del ojo humano (cómo se enfoca la luz en la retina), hasta el funcionamiento de gafas o lentes para la visión o la formación del arco iris. A lo largo de los siguientes capítulos volveremos sobre este tema, pero ahora continuemos con la historia que nos ocupa: la Historia de la Óptica y la Fotónica.

Importante 1.5: Vídeo sobre refracción de la luz

En este breve vídeo puedes ver un sencillo experimento sobre la refracción de la luz, donde incluso en la parte final puedes observar la curvatura de la luz que da lugar a los espejismos.

Enlace al vídeo: <https://bit.ly/3F5dYc1>

1.4. Al-Hazen: el padre de la óptica moderna

Al-Hazen (965-1039 d.C.) es una figura fascinante, de esas que parecen sacadas de un guión de cine un tanto exagerado. Al-Hazen (o Alhacén) nace en el actual Irak hacia el año 965 d.C., sintiendo inclinación por las ciencias y realizando contribuciones en matemáticas, geometría y astronomía. Al-Hazen llega a El Cairo durante el reinado de Al-Hakim, califa que estaba muy interesado en la astronomía y con un objetivo fundamental, poder controlar las crecidas del Nilo que tanto perjuicio suponían a la región. Al-Hazen se ofreció a resolver el problema mediante la construcción de una presa en el actual emplazamiento de la presa de Asuán, pero al poco tiempo se dió cuenta de que el proyecto resultaba imposible y desistió.

Cuenta la leyenda que Al-Hazen, temiendo la ira del califa, que podría haberle hecho pagar con su vida por no cumplir con su cometido, se hizo pasar por loco. Así conseguiría haber evitado la pena de muerte, estando encarcelado en el periodo que transcurre entre los años 1011 al 1021. Precisamente en ese periodo aprovecharía su reclusión para realizar diferentes observaciones sobre la luz que le llevarían a realizar sorprendentes aportaciones en campos tales como:



Figura 13. Representación de Al-Hazen encerrado en prisión en el documental “Light Fantastic” de la BBC. Fuente: YouTube. Licencia YouTube estándar.

Óptica de lentes y espejos Fabricó lentes, construyó equipos parabólicos como los que ahora se usan en los modernos telescopios y estudió las propiedades del enfoque que producen. Estuvo a punto de descubrir la teoría del aumento de las lentes que fue desarrollada en Italia tres siglos más tarde. Estudió la propiedad que tienen los vidrios de caras curvas de aumentar las dimensiones de los objetos y experimentó con garrafas de vidrio llenas de agua la refracción de los rayos en un medio transparente¹.

Naturaleza de la Luz Realizó estudios sobre sombras, eclipses y la naturaleza de la luz.

Dispersión Llevó a cabo también las primeras experiencias de la dispersión de la luz en sus colores.

El ojo humano y el proceso de visión Fue el primero en describir exactamente las partes del ojo y dar una explicación científica del proceso de la visión. Contradiendo la teoría de Tolomeo y de Euclides de que el ojo emite los rayos visuales a los objetos, él considera que son los rayos luminosos los que van de los objetos al ojo.

Cámara oscura Fue el primero en analizar correctamente los principios de la cámara oscura, que consiste en un cuarto o cajón oscuro que tiene en una de sus paredes un pequeño orificio. En la pared opuesta se forma una imagen invertida de los objetos exteriores. Este aparato es el antecesor de la moderna cámara fotográfica.

Velocidad de la Luz Anticipó un descubrimiento fundamental: la luz viaja con una velocidad finita.

¹<http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/historia/Historia.htm>



Figura 14. Dispersión de la luz provocada por un prisma. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: CC-by-SA 3.0. <https://bit.ly/3ePQcoe>

Importante 1.6: Dispersión de la luz

En el listado anterior de contribuciones de Al-Hazen se ha mencionado la dispersión: ¿sabes a qué nos referimos?

La **dispersión de la luz** es el fenómeno que se produce cuando un rayo de luz (supongamos que del Sol) atraviesa un medio “dispersivo”, por ejemplo un prisma (ver [Figura 14](#)). Probablemente estemos familiarizados con esa imagen, en la cual la luz se “descompone” o “dispersa” en sus diferentes **colores**. Este fenómeno está directamente relacionado con la refracción, ya que se produce al viajar cada “color” a una velocidad diferente en el material y, por lo tanto, sufrir un ángulo de refracción diferente. Esto ocurre ya que el índice de refracción del material es dependiente de la longitud de onda o frecuencia de la luz.

No te preocupes, volveremos a explicar este concepto más adelante. Sigamos con nuestra apasionante historia ...

Cuestión 1.3: ¡Observa la dispersión en tu casa!

Aunque no dispongas de un prisma como el de la imagen, en realidad es muy sencillo observar este fenómeno en casa. ¿Tienes un CD a mano? Si es así, cógelo y orienta su cara inferior a una fuente de luz que tengas en casa, por ejemplo un fluorescente. Muévelo ligeramente y, con suerte, verás cómo aparecen los diferentes colores.

En resumen, con lo comentado anteriormente queda clara la gran relevancia de Al-Hazen en nuestra comprensión de diversos fenómenos relacionados con la luz y con la visión. Al-Hazen ejercería una notable influencia en científicos posteriores Roger Bacon o Leonardo Da Vinci.

1.5. Roger Bacon: filósofo, teólogo y científico

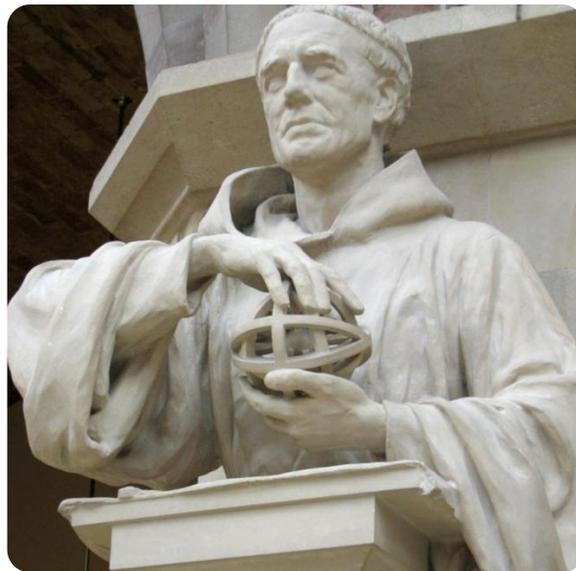


Figura 15. Estatua de Roger Bacon en el Museo de Historia Natural de la Universidad de Oxford. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: CC-by-SA 3.0. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Roger-bacon-statue.jpg>

El nombre del fraile franciscano **Roger Bacon** (1214, 1294) suele ser rápidamente asociado al del **método científico**, ya que fue uno de los primeros pensadores en proponer y defender dicho enfoque. Al margen de sus contribuciones en filosofía y teología, Bacon es comúnmente considerado como el padre de las lentes o gafas, al citar en una de sus obras que un trozo de cristal permitía observar objetos con aumento, lo que:

“debería ser muy útil para personas ancianas y aquellas que tienen los ojos débiles, pues ellas pueden ver así las pequeñas letras con grandor suficiente.”

Bacon, que también anticiparía el uso del microscopio y el telescopio, fue claramente influenciado por la obra de Al-Hazen en lo que se refiere a sus contribuciones a la óptica, si bien también aportó estudios en matemáticas, astronomía y alquimia.

Desgraciadamente, Bacon fue perseguido y encerrado por la iglesia durante 14 años, siendo censurados sus escritos. El hecho de que el Papa Clemente IV fuese un gran admirador suyo evitó, probablemente, que su obra se perdiese y su vida fuese sacrificada antes de tiempo¹.

Importante 1.7: Lente de Lenteja

Se cree que Roger Bacon talló las primeras lentes en 1266. El nombre de lente derivaría de su forma de **lenteja**: ¡curioso!

Importante 1.8: Anteojos

En los primeros anteojos se utilizó el cuarzo y el agua marina, pero conforme aumentó la demanda fue necesario elaborar vidrio óptico que se rompe con facilidad por lo que resulta peligroso. A partir de este momento, las gafas han evolucionado según las necesidades de la sociedad.

1.6. Evolución de lentes y gafas

El desarrollo de las primeras lentes se suele asociar a los vidrieros venecianos y, más concretamente, a la zona de la Isla de Murano. Los talleres de sus famosos sopladores de vidrio fueron el lugar de donde proceden los primeros cristales tallados ideados en principio para un sólo ojo.

Una vez desarrolladas las lentes, el siguiente paso consistiría en añadir la montura a las mismas, lo que ocurriría entre los años 1285 y 1300, aproximadamente. La atribución de esta configuración se reparte entre **Alexandro della Spina** (monje dominico de Pisa) y **Salvino de Armati** (Florencia).

Es importante resaltar que las primeras lentes conocidas eran del tipo convergente, esto es, enfocaban los rayos o haces de luz incidentes en la lente en un único punto (tal y como hace el ojo humano), mientras que las divergentes dispersan los haces en diferentes direcciones. Esto se aprecia mejor en la [Figura 16](#).

Con posterioridad aparecerán referencias escritas del uso de lentes como ayuda para la visión. En el libro “Liliban Medicinae” (1299) aparece indicado el uso de lentes llegadas de oriente a Europa (en este caso Italia) como remedio para la visión. **Francesco Petrarca** (1304-1374) expresa en su “Carta a la posteridad” que a sus 60 años necesita lentes para leer. Si avanzamos hasta el año 1352 nos encontramos ya con la primera representación en un cuadro (realizado por Tomásso da Modena) de una persona con gafas, se trata del cardenal Hugo de Provenza. El cuadro (ver [Figura 17](#)) se encuentra en la iglesia de San Nicolás de Treviso.

¹<https://mundosoxidados.wordpress.com/2015/04/11/el-germen-de-la-ciencia-experimental-el-legado-de-roger-bacon/>

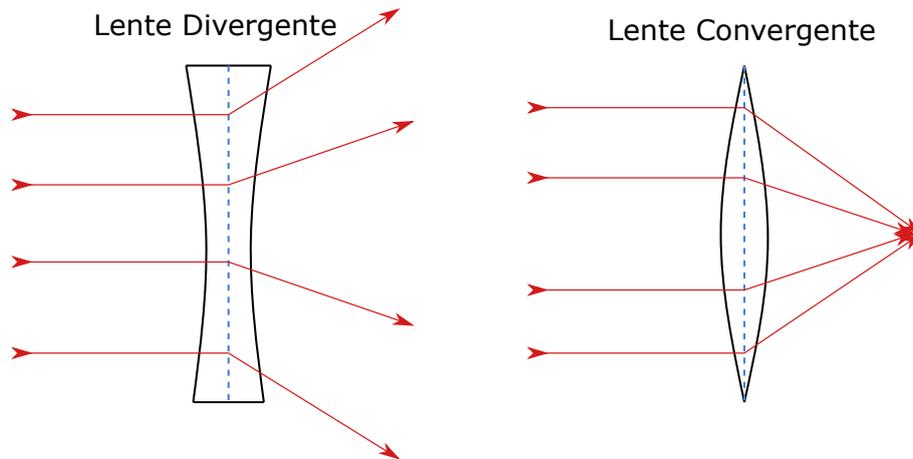


Figura 16. Representación esquemática de lentes convergentes y divergentes. Fuente: Elaboración propia.

Importante 1.9: El nombre de la Rosa

En la película “El nombre de la Rosa”, basada en la novela homónima de Umberto Eco, el protagonista (Guillermo de Baskerville, franciscano, antiguo inquisidor y con grandes dotes “detectivescas”, interpretado por Sean Connery) se vale de unos anteojos para consultar textos relacionados con los crímenes que ocurren en la abadía. De hecho, estos anteojos le son sustraídos en un determinado momento, lo que le dificulta avanzar con sus investigaciones.

Cuestión 1.4: Miopía y Presbicia

¿En qué se basa el uso de lentes (gafas, lentes de contacto) para corregir los efectos que la miopía y la presbicia tienen en la visión?
Explica brevemente ambas patologías e indica el tipo de lentes que deben usarse en cada caso para su corrección.

1.7. Leonardo da Vinci

En nuestro recorrido por la historia de la óptica llegamos a uno de los grandes genios científicos de todos los tiempos: el gran **Leonardo da Vinci**.

Las aportaciones de da Vinci (1452-1519) en infinidad de campos son apabullantes. Baste con citar el siguiente extracto de su reseña en Wikipedia¹:

“Fue a la vez pintor, anatomista, arquitecto, paleontólogo, artista, botánico, científico, escritor, escultor, filósofo, ingeniero, inventor, músico, poeta y urbanista.”

Desde el punto de vista de sus aportaciones a la óptica, Leonardo estudió la **estructura**

¹https://es.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci

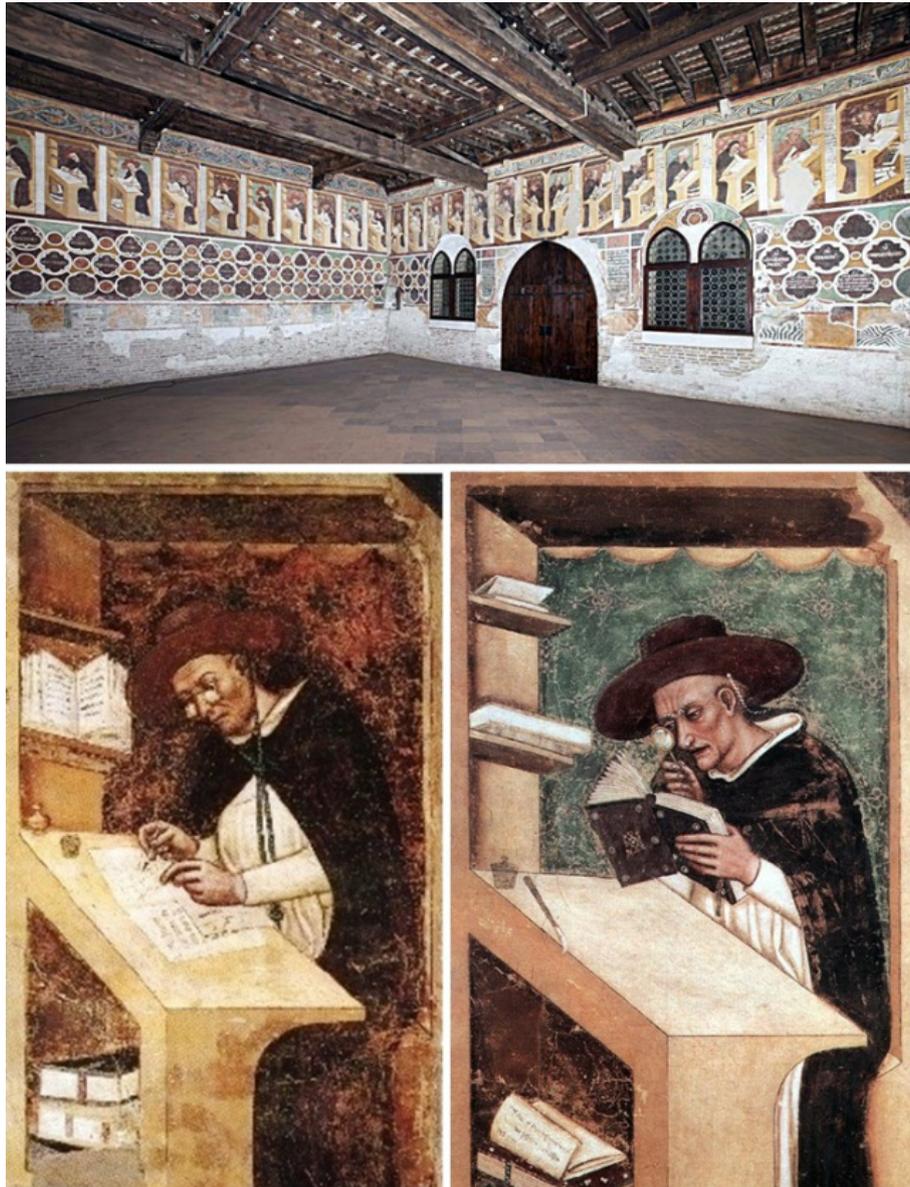


Figura 17. Iglesia de San Nicolás de Treviso (Superior) y representaciones del cardenal Hugo de Provenza. Fuente: Histoptica.com. <https://histoptica.com/apuntes-de-optica/breve-historia/comienzos/francesco-petrarca-gregor-reisch/>

y funcionamiento del ojo humano, aunque, al igual que sus predecesores, creyera que la capacidad de visión residía fundamentalmente en el cristalino, en vez de en la retina. Para apoyar sus teorías sobre la visión se valió del funcionamiento de la **cámara oscura**¹. En la **Figura 20** se presenta el esquema de una cámara oscura de la época, así como bocetos de Canaletto realizados con la ayuda de una cámara oscura.

Leonardo también diseñó varias máquinas destinadas a la fabricación de grandes espejos (probablemente influenciado por la historia de la defensa de Siracusa de Arquímedes), aunque nunca llegó a construir ninguna. Además, también fue la primera persona en proponer el uso

¹Instrumento comúnmente usado por los pintores de la época y que básicamente permite la proyección de una imagen exterior sobre una superficie plana.



Figura 18. Sean Connery en una escena de la película “El nombre de la Rosa”. Fuente: radicalbarbatilo.blogspot.com.es. <http://radicalbarbatilo.blogspot.com.es/2016/07/el-eco-cientifico-de-el-nombre-de-la.html>



Figura 19. Efecto de lente provocado por unas gotas de agua sobre una hoja. Fuente: Pablo Artal (@pablo_artal) <https://bit.ly/3ngmkE0>

de lentes de contacto para la corrección de problemas visuales.

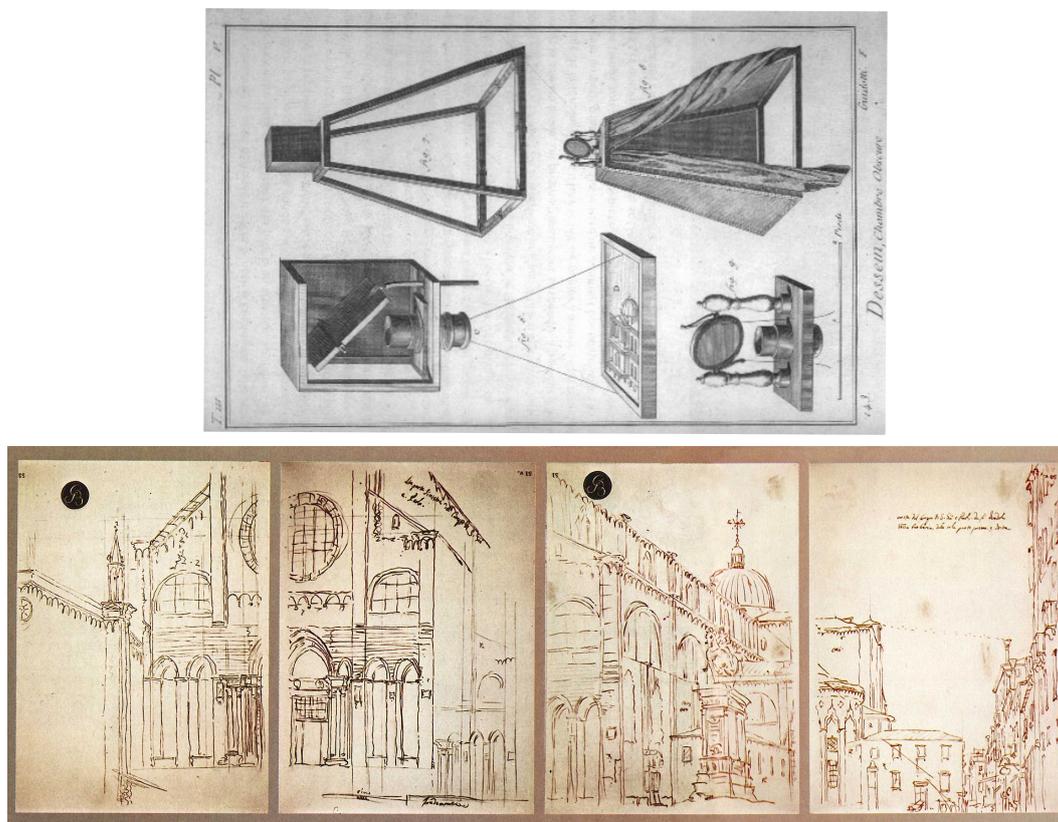


Figura 20. Esquema de una cámara oscura (superior) y bocetos obtenidos mediante una cámara oscura (Canaletto: Basílica de los santos Giovanni e Paolo, en Venecia). Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público. https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_oscura

1.8. Telescopio: “espiando” a distancia

La invención del **telescopio**, a finales del siglo XVI o comienzos del XVII está envuelta en polémica y misterio, ya que no se sabe con exactitud quién fue el auténtico inventor. El primer candidato es el italiano **Gianbattista della Porta**, que en 1589 escribió en su libro *Magia Naturalis* una descripción de lo que parece ser un telescopio. El segundo es el holandés **Zacarías Jansen** en 1590, ya que se han encontrado escritos donde se afirma esto. Pero el más probable inventor de este instrumento es un fabricante de anteojos holandés llamado **Hans Lippershey**, ya que, según cuidadosas investigaciones históricas, construyó un telescopio en el año de 1608.

Estos descubrimientos se encuentran en su libro “*Siderius Nuntius*”, (*El mensajero de las estrellas*). Una vez publicado y agotado en unos cuantos días los fabricantes de lentes se pusieron a hacer telescopios cada vez más grandes y más potentes.

Sin embargo la historia de la invención del telescopio termina aquí: hace unos años las investigaciones de Nick Pelling (un informático y periodista de investigación histórica británico) fueron publicadas en la revista *History Today*. Según este estudio la invención del telescopio correspondería en realidad al gerundense Juan Roget en 1590. Según esta teoría Zacharias Janssen habría copiado a Roget e intentado patentar la invención. Sin embargo, Hans Lippershey también intentaría patentarlo en Holanda tras realizar una demostración al

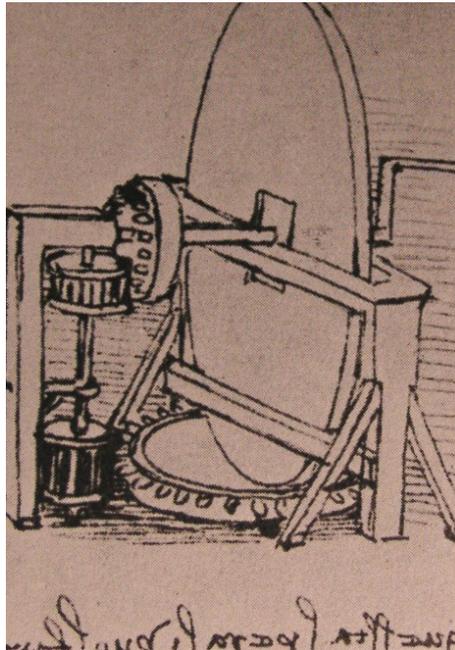


Figura 21. Boceto de una máquina diseñada por da Vinci para la fabricación de grandes espejos. Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público. https://es.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci

príncipe Mauricio de Nassau en plena guerra civil; e incluso otros dos artesanos holandeses. Este “conflicto” hizo que las autoridades holandesas decidiesen no conceder la patente.

Importante 1.10: La invención del telescopio

Este artículo de “El País” os permitirá profundizar un poco más en esta apasionante historia:

https://elpais.com/elpais/2015/10/12/ciencia/1444663380_596594.html

1.9. Galileo: y sin embargo ...

... ¡se mueve! Esa es la frase (supuestamente) pronunciada por Galileo (1564-1642) tras su abjuración asociada al proceso que la iglesia emprendió contra él por sus postulados heliocentristas. Pero comencemos por el principio: Galileo Galilei fue un filósofo, astrónomo, físico, matemático e ingeniero italiano. En 1583 se decide por su vocación matemática, comenzando una exitosa carrera científica con grandes aportaciones, como la ley del movimiento uniformemente acelerado.

Es en 1609 cuando descubre el telescopio, fabricando inmediatamente varios modelos (a partir únicamente de la descripción de la invención) que irían mejorando sus características, principalmente su aumento¹². Con sus telescopios Galileo comienza a realizar diferentes ob-

¹En realidad Galileo no dominaba la teoría óptica y esto hizo que muchos de sus telescopios no fuesen en realidad útiles.

²Galileo llegaría los derechos del telescopio a la República de Venecia, muy interesada en sus aplicaciones



Figura 22. Galileo enseñando al dux de Venecia el telescopio. Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público. https://es.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei

servaciones y descubrimientos que le convencen de algo que ya intuía: el modelo geocéntrico es incorrecto, la Tierra no es el centro del Universo.

¿Qué descubrimientos realiza Galileo que apoyan el modelo heliocéntrico o teoría copernicana¹?

1. Montañas en la Luna
2. Nuevas estrellas
3. Satélites de Júpiter
4. Manchas solares
5. Las fases de Venus
6. Argumento de las mareas²

Con sus argumentos, Galileo obtiene un importante reconocimiento científico. Sin embargo, como ya sabemos, se encontró con la oposición de la iglesia, que le juzgaría en 1633 y, militares.

¹

²Para más información sobre estos puntos, por favor acude a: https://es.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei

bajo amenaza de tortura, confesaría y se retractaría de sus teorías, lo que le permitiría permanecer bajo arresto en su casa, en vez de en prisión. Galileo moriría a los 77 años y la iglesia, lentamente, iría aceptando su obra con el paso de los años. En el S. XVIII Benedicto XIV autorizaría las obras sobre el heliocentrismo y en el S. XX, a partir de Pío XII, se comienza a rendir homenaje a Galileo.



Figura 23. Galileo ante el Santo Oficio, por Joseph-Nicolas Robert-Fleury. Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público. https://es.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei

El papa Juan Pablo II pidió perdón por los errores que hubieran cometido los hombres de la Iglesia a lo largo de la historia. En el caso de Galileo propuso una revisión honrada y sin prejuicios en 1979, pero la comisión que nombró al efecto en 1981 y que dio por concluidos sus trabajos en 1992, confirmó una vez más la tesis de que Galileo carecía de argumentos científicos para demostrar el heliocentrismo y sostuvo la inocencia de la Iglesia como institución y la obligación de Galileo de reconocer y prestar obediencia a su magisterio, justificando la condena y evitando una rehabilitación plena¹.

Importante 1.11: Galileo: Documental

Si queréis profundizar más en la figura de Galileo, podéis consultar el documental del siguiente enlace: <https://youtu.be/npMaWBgYw88>

1.10. La Ley de Snell

Aunque pueda parecer el título de una película de Clint Eastwood, la ley postulada por **Willebrord Snell** (1581-1626) es fundamental en el mundo de la óptica. La **Ley de Snell**

¹https://es.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei

no es sino la **ley que explica la refracción de la luz**. Algo en lo que, como hemos visto en páginas anteriores, se ocuparon con gran dedicación científicos muy anteriores en el tiempo. Con sus mediciones de los ángulos que formaban los rayos refractados y reflejados en la interfaz¹ entre dos medios como aire y agua, fue capaz de deducir la ley que permite modelar, de manera genérica, la refracción y reflexión de la luz.

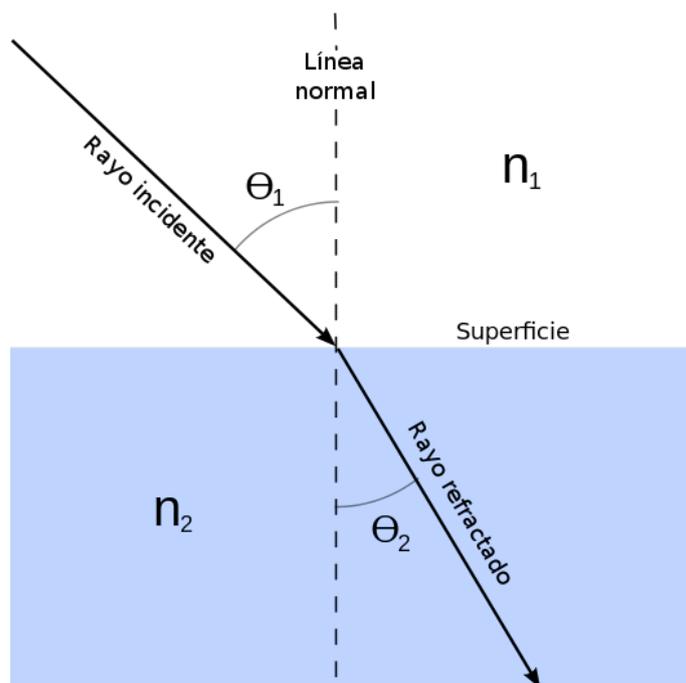


Figura 24. Ley de la refracción o ley de Snell. Fuente: Wikipedia. Licencia: CC-by-SA 4.0. https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Snell

Se trata de una ley cuya expresión es muy sencilla, tal que:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2) \quad (1.1)$$

La explicación de la ley es también sencilla y para ello podemos apoyarnos en la [Figura 24](#). El ángulo θ_2 con el que un rayo de luz será refractado al cambiar de un medio 1 a otro 2, dependerá del ángulo del rayo incidente (θ_1) y de los índices de refracción de ambos medios n_1 y n_2 .

Importante 1.12: ¡¿Ecuaciones?!

¡Tranquilo! No vamos a ver muchas más ecuaciones durante el curso. Por cierto, si no recuerdas claramente el concepto de índice de refracción, no dudes en consultarlo en el apartado 1.3 de estos apuntes.

¹Cuando hablamos de interfaz, por ejemplo entre aire y agua, nos referimos al punto (superficie) en el que ambos medios entran en contacto.

1.11. Refracción y espejismos

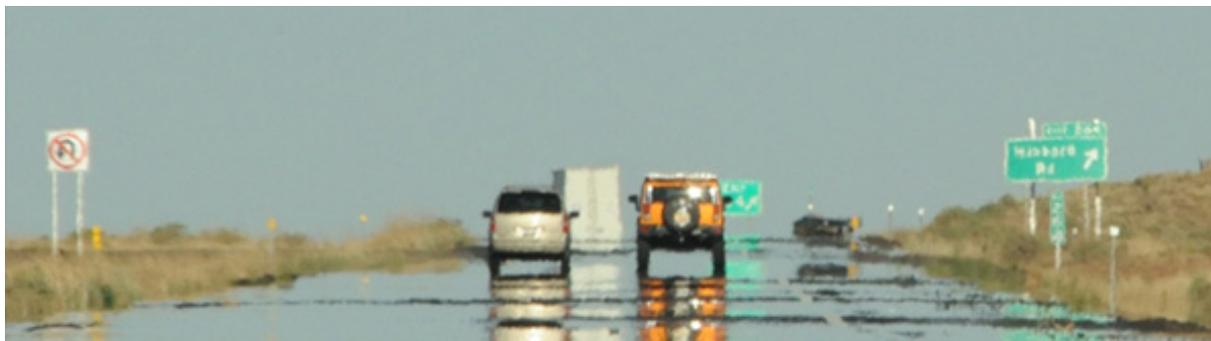


Figura 25. Imagen de un espejismo en una carretera. Fuente: hyperphysics.phy. <https://bit.ly/3oX1tc5>

Ahora que comprendemos ya mucho mejor en qué consiste y cómo se comporta la refracción, puede ser un buen momento para hablar sobre los **espejismos**, ya que éstos se producen precisamente por fenómenos de **refracción en la atmósfera**. Comencemos por la [Figura 25](#), donde vemos una imagen a la que probablemente estemos acostumbrados y a la que, quizás, nunca hemos asociado a un espejismo. En la imagen, tomada en una carretera en Arizona en un día cálido en verano, podemos apreciar como el asfalto parece estar mojado y los coches parecen reflejarse en él. Este fenómeno, denominado en ocasiones espejismo de charco, se genera precisamente por la **refracción de la luz en la atmósfera**. En concreto, **el índice de refracción del aire caliente y frío es distinto**: podemos intuir que el aire caliente es menos denso y, por lo tanto, su índice de refracción será menor que el del aire frío. Esto hace que los rayos de luz se “comben” hacia la parte más fría de la atmósfera, que en situaciones como la de la imagen serán las más alejadas del suelo/asfalto, que estará más caliente. La [Figura 26](#) muestra por qué se produce el espejismo: la luz de los vehículos que van por delante (el rojo en este caso) es refractada hacia arriba, provocando en el observador el efecto ya mencionado.

Este fenómeno de formación de este tipo de espejismos quizás se entienda mejor con el ejemplo mostrado en la [Figura 27](#), que muestra una situación muy similar. El observador en este caso dirige su mirada hacia una palmera, pero la luz que proviene de la parte superior de la misma se comba por efecto de la refracción de la luz en el aire (que está a diferentes temperaturas, más frío en la parte superior, más caliente en la inferior), llegando al ojo del observador en una dirección que se correspondería con el punto marcado con una **X** en la imagen, “engañando” por tanto a nuestro sentido de la visión.

Aunque los espejismos pueden dar lugar a múltiples efectos, vamos a finalizar este apartado con un tipo de espejismo que genera imágenes tan curiosas como la que se muestra en la [Figura 28](#). Podemos apreciar como en ambas imágenes los barcos parecen “levitar” sobre el agua, algo que intuimos no puede ser cierto. La explicación a la formación de este espejismo la encontramos en la [Figura 29](#), donde vemos que, como ya sabemos, la refracción hace que los rayos de luz se curven hacia la superficie más fría. Al contrario que lo que ocurría en el espejismo de la carretera o el desierto, para que se forme este tipo de espejismo es necesario que la superficie del agua esté más fría que el aire sobre ella, situación que puede darse en ciertas latitudes y ciertos momentos del año.



Figura 26. Esquema de la formación de un espejismo en una carretera. Fuente: hyperphysics.phy. <https://bit.ly/3oX1tc5>

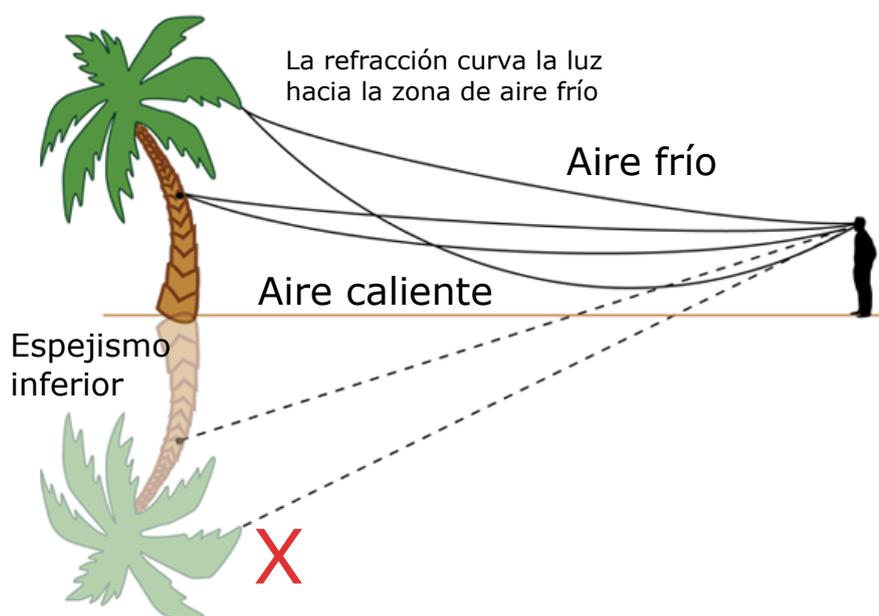


Figura 27. Esquema de la formación de un espejismo inferior. Fuente: hyperphysics.phy. <https://bit.ly/3oX1tc5>

1.12. El microscopio y el padre de la microbiología

En el mundo de la ciencia nos encontramos a menudo con personajes curiosos, auténticos “hombres del renacimiento” como da Vinci o Galileo o personas que, como **Antonie van Leeuwenhoek** (1632-1723) son capaces de invenciones fundamentales sin un conocimiento académico formal sobre la materia en cuestión.

Van Leeuwenhoek fue un empresario textil holandés con una gran afición por la fabricación de lentes, lo que le llevó a la fabricación de sus propios microscopios. Probablemente no se pueda atribuir a van Leeuwenhoek la invención del microscopio, siendo probablemente el ya



Figura 28. Ejemplos de espejismos superiores. Fuente: hyperphysics.phy. <https://bit.ly/3oX1tc5>

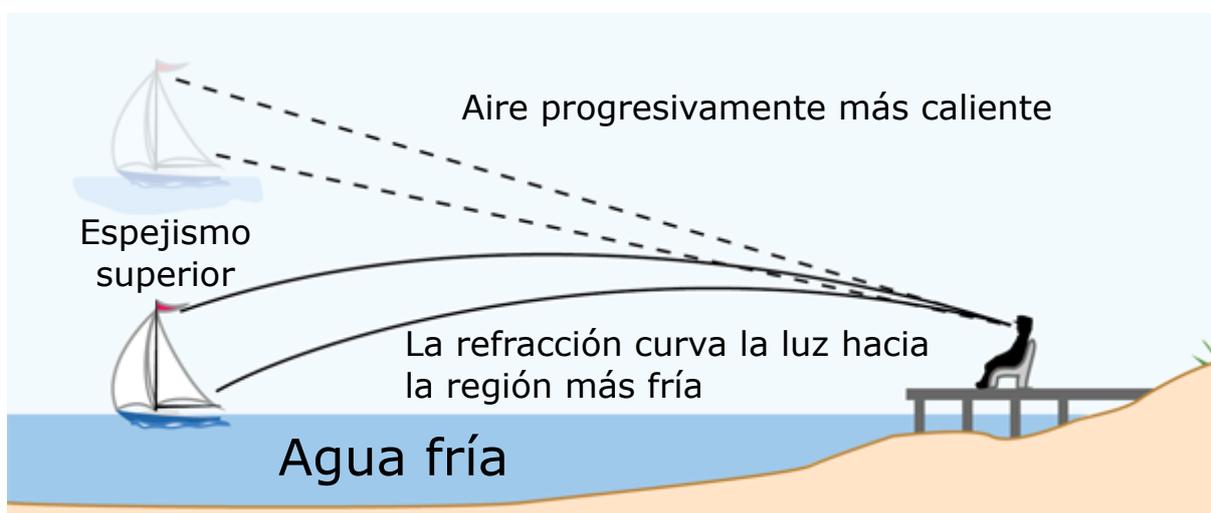


Figura 29. Esquema de la formación de espejismos superiores. Fuente: hyperphysics.phy. <https://bit.ly/3oX1tc5>

mencionado Zacharias Janssen la persona sobre la que deba recaer este honor.

Sin embargo, sobre lo que no hay duda es que van Leeuwenhoek es considerado como el padre de la microbiología gracias a sus fantásticas observaciones: fue el primero el observar protozoos y bacterias (que él denominaría "animálculos"), así como el primero en ver glóbulos rojos y espermatozoides. Estas observaciones fueron posibles gracias a los hasta 200 aumentos que tenían sus microscopios. Se cree que van Leeuwenhoek construyó más de 500 ejemplares de microscopio, de los que unas pocas unidades han llegado hasta nuestros días.

Importante 1.13: Los microscopios de van Leeuwenhoek

En 2009 salió a subasta en la famosa galería Chisties's un microscopio de Leeuwenhoek original de plata que se vendió por 321.237,50 libras^a.

^a<http://www.investigacionyciencia.es/blogs/medicina-y-biologia/43/posts/los-microscopios-de-van-leeuwenhoek-13351>

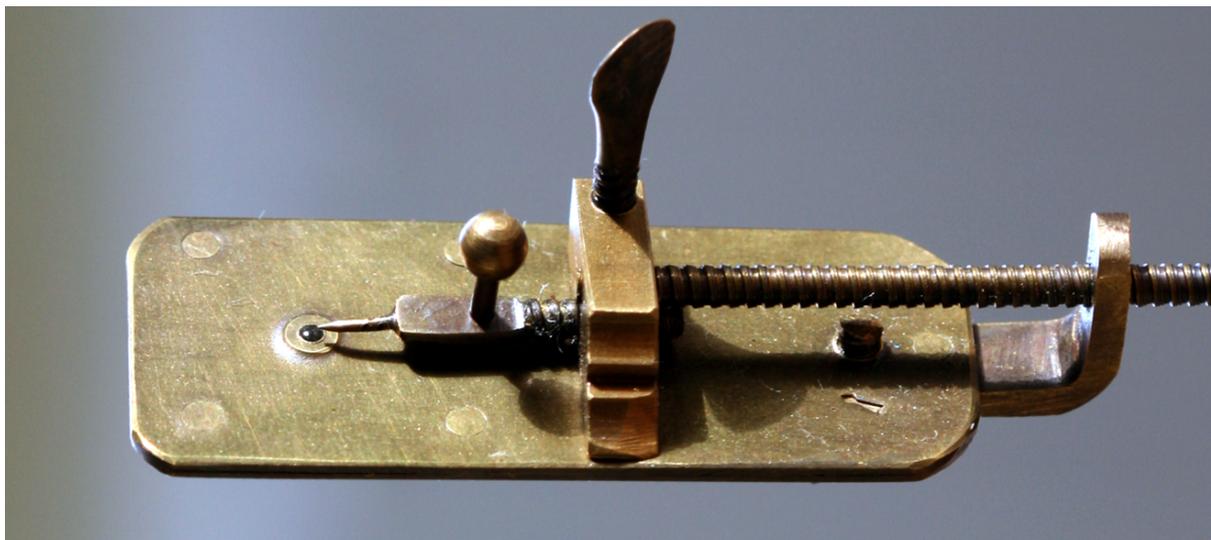


Figura 30. Réplica de un microscopio de van Leeuwenhoek. Fuente: Wikipedia. Licencia: CC-by-SA 3.0. https://es.wikipedia.org/wiki/Anton_van_Leeuwenhoek

Importante 1.14: Van Leeuwenhoek: para saber más

Si quieres saber algo más sobre la vida y obra del padre de la microbiología puedes consultar los siguientes enlaces:

<http://bit.ly/2ed0h19>

<https://youtu.be/OniSF8QrHac>

1.13. El Principio de Fermat

Pierre de Fermat (1601-1665) fue un notable matemático francés con múltiples aportaciones a dicha disciplina como el cálculo diferencial o la teoría de probabilidades. Sin embargo, desde el punto de vista de la óptica, su contribución más celebrada es el **Principio de Fermat**, que establece que:

“El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es un mínimo.”

Algunos científicos anteriores, como nuestro ya famoso Al-Hazen, se habían acercado a este principio, que puede explicarse de manera gráfica mediante el ejemplo del socorrista (ver [Figura 32](#)).

Como puede apreciarse en la imagen, tenemos un socorrista en la playa que debe atender a un bañista (representado por el salvavidas) que se ve atacado por un feroz tiburón. La opción más simple para el socorrista sería la de recorrer una trayectoria recta para salvar al bañista. Sin embargo, cualquier persona corre más rápido que nada, lo que implica que con esta opción se estaría perdiendo un valiosísimo tiempo. La opción óptima sería la de minimizar



Figura 31. Pierre de Fermat. Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público. https://es.wikipedia.org/wiki/Pierre_de_Fermat

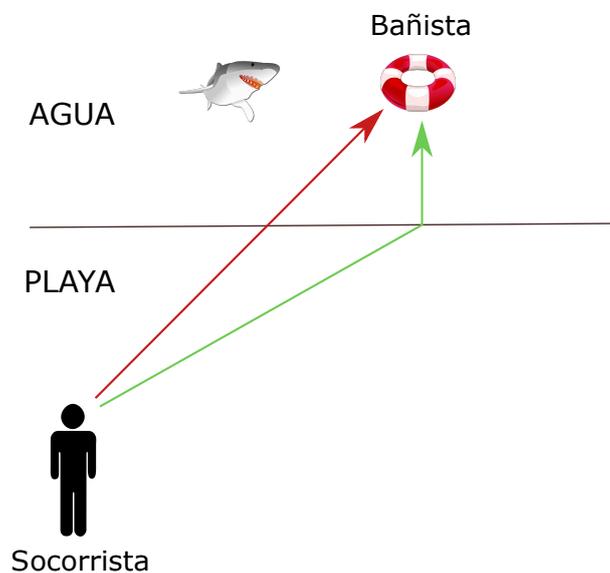


Figura 32. Ilustración explicativa del Principio de Fermat. Fuente: Elaboración propia

el segmento asociado a una menor velocidad, esto es, asociado en este caso a nadar en el agua. Esta opción es la representada por la flecha verde en la imagen.

Esta estrategia es precisamente la que siempre sigue la luz: seguir el camino “óptimo” que minimiza el tiempo para llegar de un punto a otro. De hecho, en el ejemplo mostrado la luz seguiría la trayectoria indicada en verde, ya que, al igual que el socorrista, la luz es más rápida en el aire (índice de refracción en el aire $n_{\text{aire}} = 1$) que en el agua ($n_{\text{agua}} = 1.33$), siendo la velocidad de la luz tal que:

$$v = \frac{c}{n}, \quad (1.2)$$

donde v es la velocidad de la luz en un medio determinado, c la velocidad de la luz en el vacío¹ y n el índice de refracción del medio.

1.14. Huygens y Newton: ondas y partículas



Figura 33. Retratos de Christian Huygens (izquierda) e Isaac Newton (derecha). Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público.

Hemos visto en los apartados anteriores como con el paso de los años el conocimiento sobre la luz y sus fenómenos asociados fue aumentando. Sin embargo, llegamos a comienzos del siglo XVII con una pregunta fundamental que dividirá al mundo científico de la época: ¿qué es la luz: es una onda o una partícula?

Entre los partidarios de la naturaleza **ondulatoria de la luz** nos encontramos a **Christian Huygens** (1629-1695). Pero, para entender su planteamiento quizás sea conveniente definir antes qué es una onda. La cuarta acepción que nos da la RAE es la que buscamos:

4. f. Fís. Movimiento periódico que se propaga en un medio físico o en el vacío.

En física, una onda es precisamente la propagación de una perturbación sobre un medio determinado. Por ejemplo cuando nos comunicamos mediante la voz, ésta se transmite en forma de ondas sonoras, que no son sino perturbaciones de la densidad del aire que se propagan por éste de un interlocutor a otro.

Otro ejemplo clásico es el de las ondas que se forman en el agua al recibir el impacto de un objeto (Figura 34), o las propias olas del mar, que se desplazan como ondas.



Figura 34. Ejemplo de propagación de ondas en el agua. Fuente: Pixabay. Licencia: Creative Commons CCO.

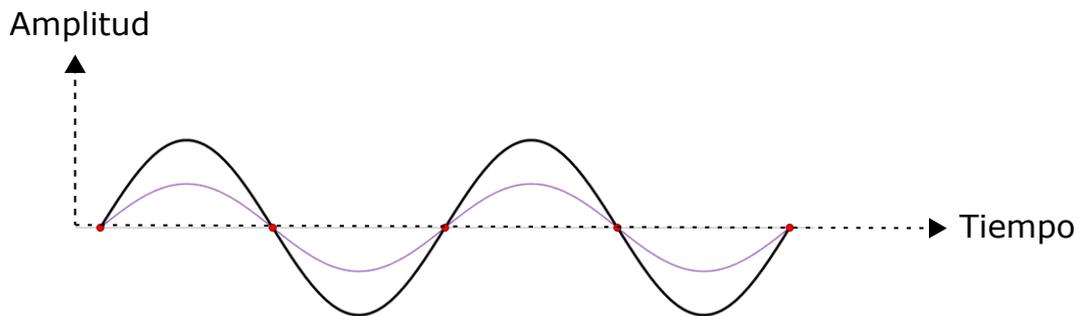


Figura 35. Representación física de una onda. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio Público.

La representación clásica en ciencia de una onda la vemos en la [Figura 35](#), donde en el eje horizontal x se representaría el tiempo y en el eje y la intensidad o amplitud de la onda.

La luz según Huygens y sus partidarios sería entonces una onda que se propaga por distintos medios: vacío, aire, agua, vidrio, etc. Sin embargo, otro grupo de científicos, con **Newton** ni más ni menos a la cabeza, entendía que la luz estaba en realidad formada por **pequeñas partículas** o “corpúsculos” denominados **fotones** (del griego *phos/photos*: **luz**).

¿Quién tenía razón? En su momento, la mayor parte de la comunidad científica apoyó la tesis de Newton, quedando la teoría ondulatoria relegada. Sin embargo: ¿qué teoría es aceptada como válida en la actualidad, 4 siglos después? Analizaremos este tema en mayor profundidad en el siguiente tema de este curso: **Capítulo 2: ¿Qué es la luz? Ondas y Partículas.**

¹ $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

1.15. Thomas Young y el funcionamiento del Ojo Humano



Figura 36. Retrato de Thomas Young. Fuente: Wikimedia Commons. Licencia: Dominio Público. [https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young_\(scientist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Thomas_Young_(scientist))

Ya hemos visto como científicos anteriores en el tiempo como Al-Hazen o da Vinci trataron de explicar el funcionamiento de la visión, presentando diferentes teorías más o menos acertadas. **Thomas Young** (1773-829) fue un médico inglés que se dedicó a estudiar el **funcionamiento del ojo humano**, estableciendo que en la retina existen 3 tipos de **fotorreceptores** asociados con los colores **rojo, verde y azul**. Cada una de estas células reacciona a cada uno de esos colores, convirtiendo la luz recibida en impulsos nerviosos que serán transmitidos al cerebro, donde serán interpretados. En realidad, como veremos en el Capítulo 6, existen en realidad dos tipos de fotorreceptores en el ojo humano: los conos y los bastones, siendo los comentados asociados al rojo, verde y azul del primer tipo.

Young es también célebre por su famoso experimento de la doble rendija, con el que intentaba obtener evidencias sobre el comportamiento de la luz como onda o partícula. Este experimento lo abordaremos en clase, pero en la [Figura 37](#) podemos ver un adelanto de lo que observaremos al realizarlo. ¿Por qué se aprecian varias “franjas” en la imagen inferior? Esto parece ser una prueba del comportamiento de la luz como una onda, pero ...

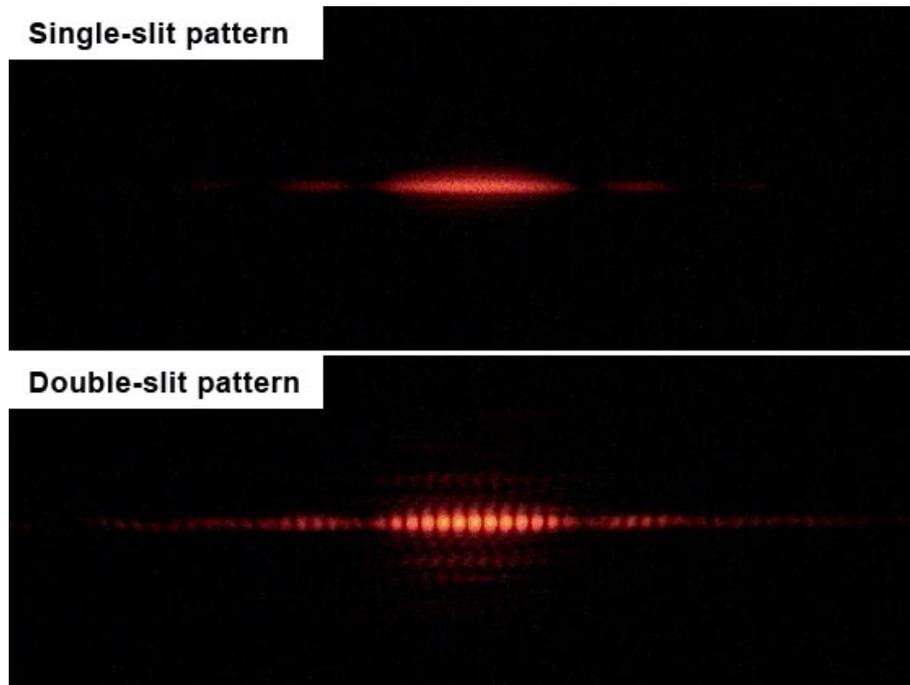


Figura 37. Ejemplo de resultado del experimento de la rendija con una (superior) y dos (inferior) rendijas. Fuente: Wikimwand. Licencia: CC-by-SA 3.0. http://www.wikiwand.com/en/Double-slit_experiment

Importante 1.15: Experimento de la doble rendija

Si tienes más curiosidad sobre este tema, en YouTube tienes multitud de vídeos que hablan sobre ello, si bien tienes que tener cuidado ya que algunos entran en la problemática “cuántica” y pueden resultarte un tanto liosos. Hablaremos sobre este tema más adelante en el curso.

De hecho, si dispones de un puntero láser en casa, puedes tratar de replicar el experimento de manera sencilla con la ayuda de alguno de estos vídeos.

1.16. Wollanston y la composición del Sol

William Hyde Wollaston (1776-1828) destacó por sus trabajos en física y química aunque, curiosamente, su formación académica se desarrolló en la carrera de medicina. Wollaston realizó diferentes contribuciones al mundo de la óptica, como sus estudios sobre la refracción de la luz, inventando un dispositivo que le permitía medir el “poder” de refracción de sólidos.

Wollaston, que se haría rico con un método para procesar platino, descubriría diferentes elementos como el paladio y el rodio, e incluso realizó diferentes experimentos que conducirían al desarrollo del motor eléctrico, tuvo una contribución especialmente significativa en el mundo de la óptica: descubrió unas rayas negras en el **espectro** del Sol.



Figura 38. Retrato de William Hyde Wollaston. Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público. https://es.wikipedia.org/wiki/William_Hyde_Wollaston

Importante 1.16: ¿Qué es un espectro?

Cuando hablamos de **espectro** en óptica, nos referimos a la representación de la luz descompuesta en sus **colores** o **longitudes de onda**. Veamos el ejemplo del espectro de la luz del Sol. Si un rayo de luz del Sol lo hacemos pasar por un prisma, entonces seremos capaces de descomponer dicha luz en sus diferentes colores^a (ver [Figura 39](#)). Si posteriormente, con un dispositivo similar a una cámara de fotos, medimos la contribución de cada color, obtendremos una representación como la de la [Figura 40](#). Puede observarse como al ser la luz descompuesta en sus diferentes componentes, somos capaces de observar como existe contribución en el ultravioleta (UV) (por debajo de 400nm) y en el infrarrojo (IR) (por encima de unos 700nm), siendo mayor la contribución en la región visible del espectro (la que el ser humano es capaz de ver, entre el violeta (400 nm) y el rojo (700 nm)). El concepto de **longitud de onda** será explicado en el siguiente capítulo de este curso.

^aTal y como ocurre con el fenómeno del arco iris.

Una vez entendido el concepto de espectro, podemos regresar al descubrimiento clave de Wollaston. Como comentábamos, en sus observaciones sobre el espectro del Sol, él observó la aparición de unas “rayas negras” que parecían separar los diferentes colores, tal y como se presentan en la [Figura 41](#). Medio siglo después, y tras las observaciones del fabricante de

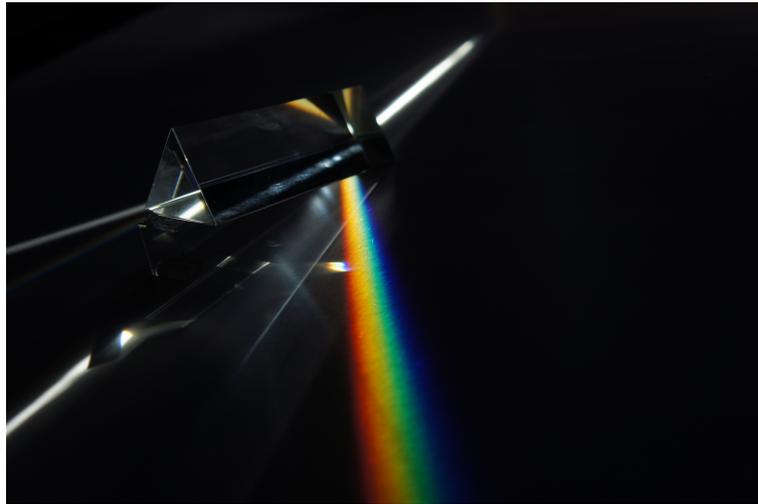


Figura 39. Luz descompuesta (dispersada) en sus diferentes colores tras pasar por un prisma.
Fuente: Wikipedia. Licencia: CCO 1.0. <https://en.wikipedia.org/wiki/Photonics>

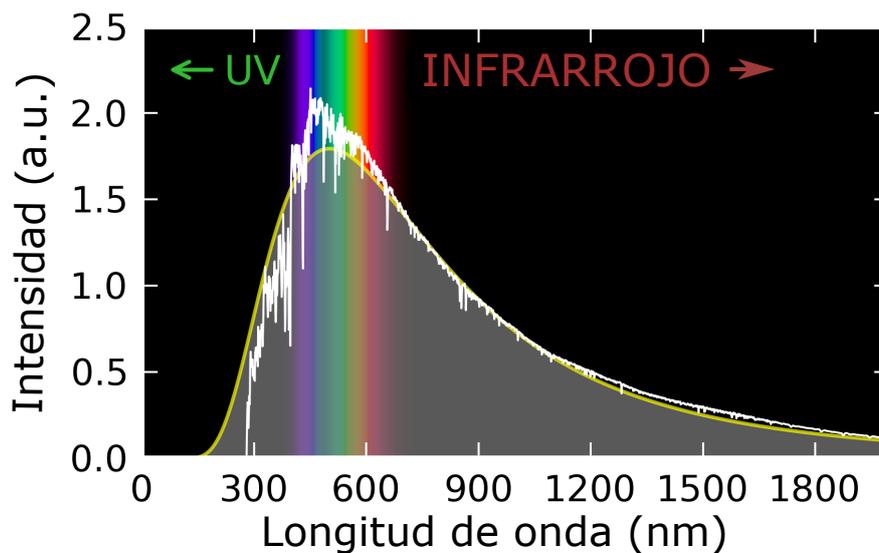


Figura 40. Espectro del Sol. Fuente: Wikimedia Commons (imagen original modificada). Licencia: Dominio Público. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_AMO_spectrum_with_visible_spectrum_background_\(en\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_AMO_spectrum_with_visible_spectrum_background_(en).png)

vidrios bávaro **Joseph Fraunhofer, Kirchhoff y Bunsen** demostrarían que estas líneas de Fraunhofer eran **las huellas dactilares de los elementos presentes en la atmósfera del Sol**. El **análisis espectral** inventado por Fraunhofer podía servir, por tanto, para realizar un sueño de los astrónomos: determinar la composición química tanto del Sol como de otros astros. **Nació así la Astrofísica**. En el **Capítulo 5** se explicará en mayor profundidad el análisis espectral, explicando como los científicos son capaces de determinar la composición de la atmósfera de planetas lejanos mediante la **espectroscopía de absorción**, así como la técnica conocida como **LIBS** (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy* / Espectroscopía de Ruptura Inducida por Láser), que permite analizar la composición de materiales mediante el

uso de un láser y que actualmente usa el Curiosity, el robot que se encuentra en Marte¹.

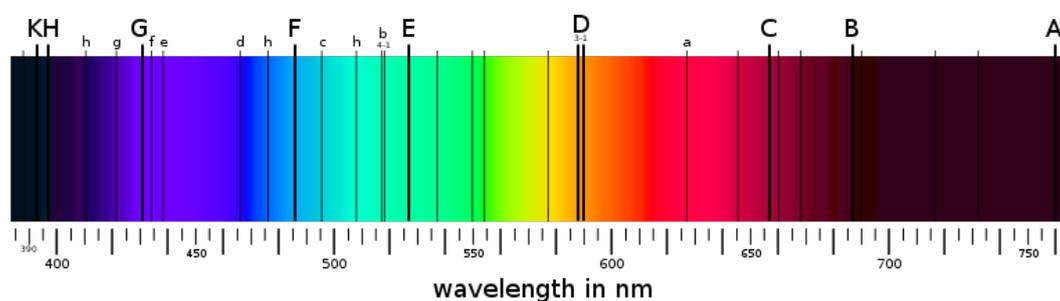


Figura 41. Espectro de Fraunhofer. Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público. https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADneas_de_Fraunhofer

1.17. William Herschel y el descubrimiento de la luz invisible

Acercándonos ya hacia el fin de nuestro apasionante recorrido por la historia de la óptica, llegamos a una de esas figuras excepcionales, por tratarse de un músico que, apasionándose por la astronomía, realizó grandes aportaciones a la ciencia, como el descubrimiento del planeta Urano y de muchos otros objetos celestes con telescopios fabricados por el mismo. En el mundo de la óptica trató de desarrollar la teoría ondulatoria sosteniendo que la luz se propagaba de manera similar al sonido.

La [Figura 42](#) representa a Herschel en el momento del descubrimiento de la luz infrarroja, que como sabemos es invisible para el ojo humano. Herschel descompuso la luz en sus diferentes colores por medio de un prisma, usando termómetros para medir la energía asociada a cada color. Durante el desarrollo del experimento se dio cuenta de un hecho a priori inexplicable. En una zona en la que no se apreciaba luz, uno de los termómetros registraba una temperatura superior a la ambiente: ¿A qué se podía deber este hecho? Como bien intuyó Herschel, la única explicación razonable era estar en presencia de una radiación invisible para el ojo: la radiación infrarroja.

1.18. Maxwell y la Teoría Electromagnética

James Clerk Maxwell (1831-1879) es para muchos el físico más importante del siglo XIX, con una gran influencia sobre la física desarrollada en el siglo XX.

Maxwell desarrolló la **teoría electromagnética clásica**, sintetizando todo el trabajo anterior sobre electricidad, magnetismo y luz. Las famosas ecuaciones de Maxwell demuestran que **electricidad, magnetismo y luz son manifestaciones del mismo fenómeno, el campo electromagnético.**

¹Puedes obtener más información en el siguiente enlace: <http://www.elmundo.es/ciencia/2014/07/17/53c7d172268e3ea3568b4589.html>

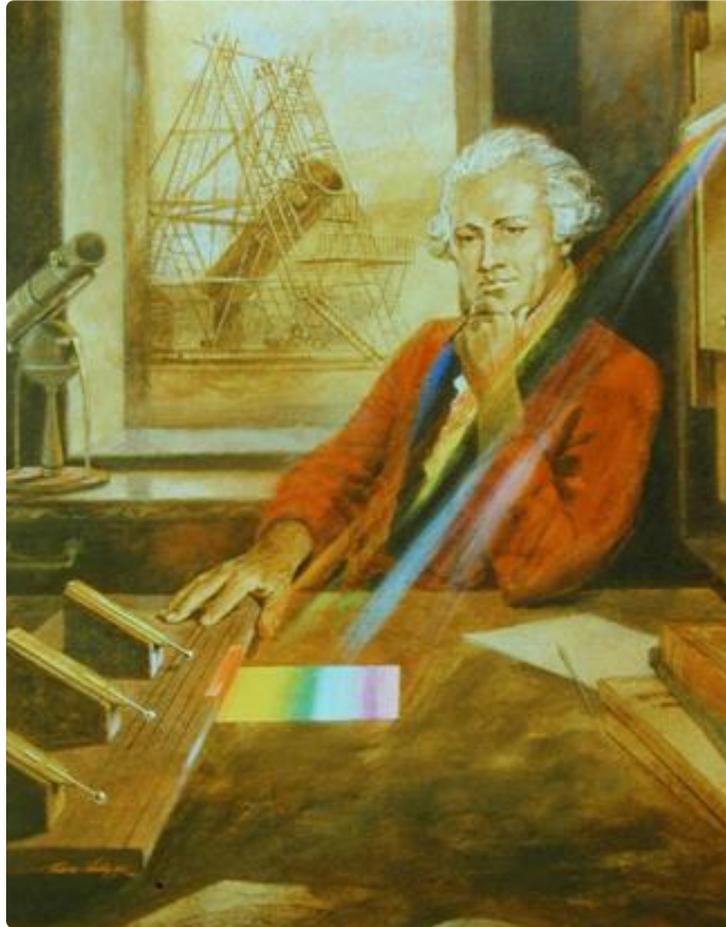


Figura 42. Retrato de William Herschel y su experimento. Licencia: Dominio Público.

1.19. Becquerel y Hertz: el efecto fotoeléctrico

Hacia finales del siglo XIX se desarrollarán diferentes experimentos que serán la semilla de la actual **energía solar fotovoltaica**.

Edmund Becquerel (1820-1891) fue un físico francés que estudió el espectro solar, realizó trabajos relativos a la luminiscencia y fosforescencia y descubrió el **efecto fotoeléctrico** mientras experimentaba con electrodos metálicos en una solución conductora.

Importante 1.17: El efecto fotoeléctrico

El **efecto fotoeléctrico** se basa en que hay determinados materiales que son capaces de generar electricidad cuando son iluminados con luz, como ocurre con un panel solar fotovoltaico.

Por su parte, Hertz, un auténtico apasionado de la física, centró sus estudios en las **ondas electromagnéticas**, por ejemplo en la demostración de la existencia de las ondas VHF y UHF. Precisamente durante unos experimentos con ondas electromagnéticas apreció el



Figura 43. James Clerk Maxwell. Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público. https://es.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell

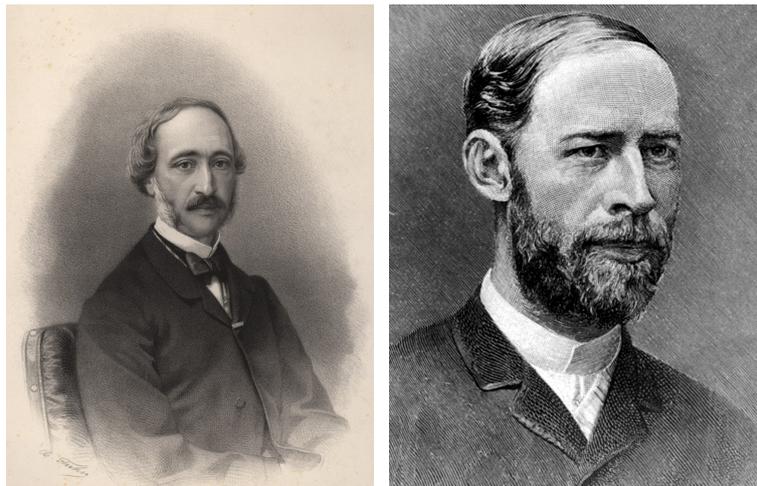


Figura 44. Edmond Becquerel (izquierda) y Heinrich Hertz (derecha). Fuente: Wikipedia. Licencia: Dominio Público.

efecto fotoeléctrico, aunque no le dio mayor importancia. Esta sería una tónica en su carrera científica, ya que mediante sus facilitó a otros científicos importantes implementaciones, como en el caso de Marconi y la **radio**.

1.20. Conclusiones

En realidad aún no hemos finalizado con la historia de la óptica, pero como nuestro próximo personaje, ni más ni menos que **Albert Einstein**, sirve como punto de enlace y nacimiento de la fotónica, esperaremos al **Capítulo 4** para tratar ahí la última aparte de esta gran aventura: la breve (pero muy importante) **historia de la fotónica**.

A lo largo de este capítulo se ha realizado una breve reseña histórica de la evolución de la óptica. Desde el uso de lentes y espejos por los egipcios y griegos hasta la teoría electromagnética de Maxwell o el efecto fotoeléctrico de Becquerel y Hertz (y ay veremos como también de Einstein) se han presentado una serie de estudios y descubrimientos clave a través de breves reseñas de los científicos que las protagonizaron. Además, este capítulo también ha servido de excusa para introducir algunos conceptos clave, como los fenómenos de refracción y reflexión, que se irán afianzando a lo largo del resto del curso.

Continuemos con esta apasionante historia: en el **Capítulo 2** trataremos de dar respuesta a la difícil pregunta: **¿qué es la luz?**

Cuestión 1.5: ¿Qué es la Luz?

Tras este primer tema del curso, y como nexo de unión con el siguiente capítulo, te propongo la siguiente actividad:

Trata de elaborar tu propia definición sobre la luz, sin consultar ninguna fuente adicional. En el siguiente capítulo comprobaremos si tu definición se aproxima o no a lo que los científicos entienden hoy en día por “luz”.

1.21. Anexo: entendiendo el Arco Iris

Para finalizar este capítulo vamos a dedicar unas líneas a tratar de comprender por qué y cómo se forma un **arco iris**, un fenómeno natural que todos hemos podido observar en alguna ocasión y que, por supuesto, tiene mucho que ver con la luz y con efectos que hemos comentado a lo largo de los apartados anteriores.

Para comenzar, vamos a ver **cómo se forma un arco iris**. Como probablemente sepas, un arco iris se forma por la interacción entre la luz del Sol y gotas de agua. Antes de continuar, trata de contestar a la siguiente pregunta:

Cuestión 1.6: Formación de un Arco Iris

Teniendo en cuenta lo comentado a lo largo de este capítulo: ¿cómo crees que se forma un arco iris? ¿Cómo interacciona la luz con las gotas de agua?

Trata de responder a esta pregunta antes de continuar leyendo ...

Un arco iris como el de la [Figura 45](#) se forma por la interacción de la luz con gotas de agua de la siguiente forma (ver [Figura 46](#)):

La luz penetra en la gota de agua sufriendo el ya conocido fenómeno de refracción, desviando la trayectoria original del haz de luz. Comienza a producirse una cierta dispersión (separación de las diferentes longitudes de onda o colores) debido al distinto ángulo de refracción y velocidad de propagación de cada componente.

El haz de luz se refleja en la cara opuesta de la gota de agua, comenzando a sufrir dispersión una dispersión más evidente.



Figura 45. Ejemplo de arco iris. Fuente: Eric Rolph at English Wikipedia. Licencia: CC BY-SA 2.5. Enlace: <http://bit.ly/3bsqyWV>

El haz de luz se vuelve a refractar al salir de la gota de agua formando un ángulo de 42° con respecto al haz de luz entrante.

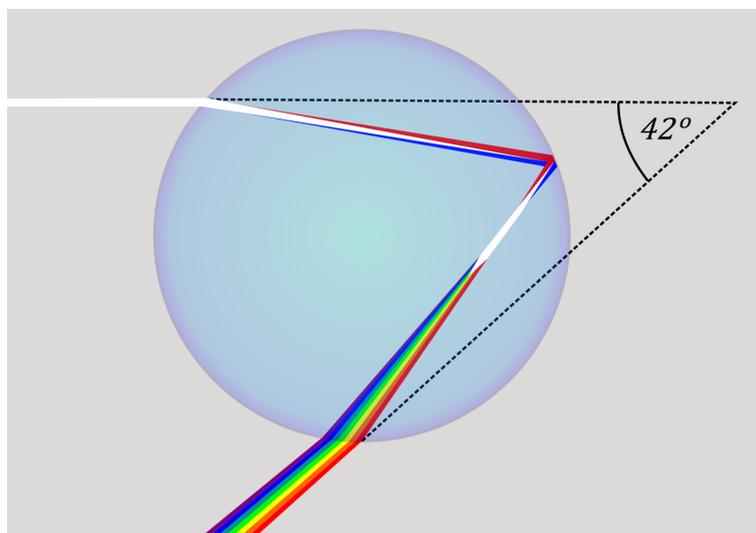


Figura 46. Ejemplo de arco iris. Fuente: KES47. Licencia: Dominio público. Enlace: <http://bit.ly/2XruAH4>

¿Por qué 42° ? ¡Interesante pregunta! Como recordarás, la refracción de la luz está gobernada por los índices de refracción de los medios implicados, en este caso aire y agua. Como los índices son constantes (1 y 1,33, respectivamente), el ángulo de la luz que sale del agua con respecto a la luz incidente del Sol también lo será: ¡ 42° ! Un estupendo experimento para explicar esto es llevado a cabo por el profesor Mike Merrifield en este vídeo que puedes encontrar en YouTube: <https://youtu.be/OXDbc7QfTXU>.



Figura 47. Experimento para comprender la formación del arco iris. Fuente: Sixty Symbols. Licencia: YouTube estándar. Enlace: <http://www.sixtysymbols.com/> y <https://youtu.be/OXDbc7QfTXU>

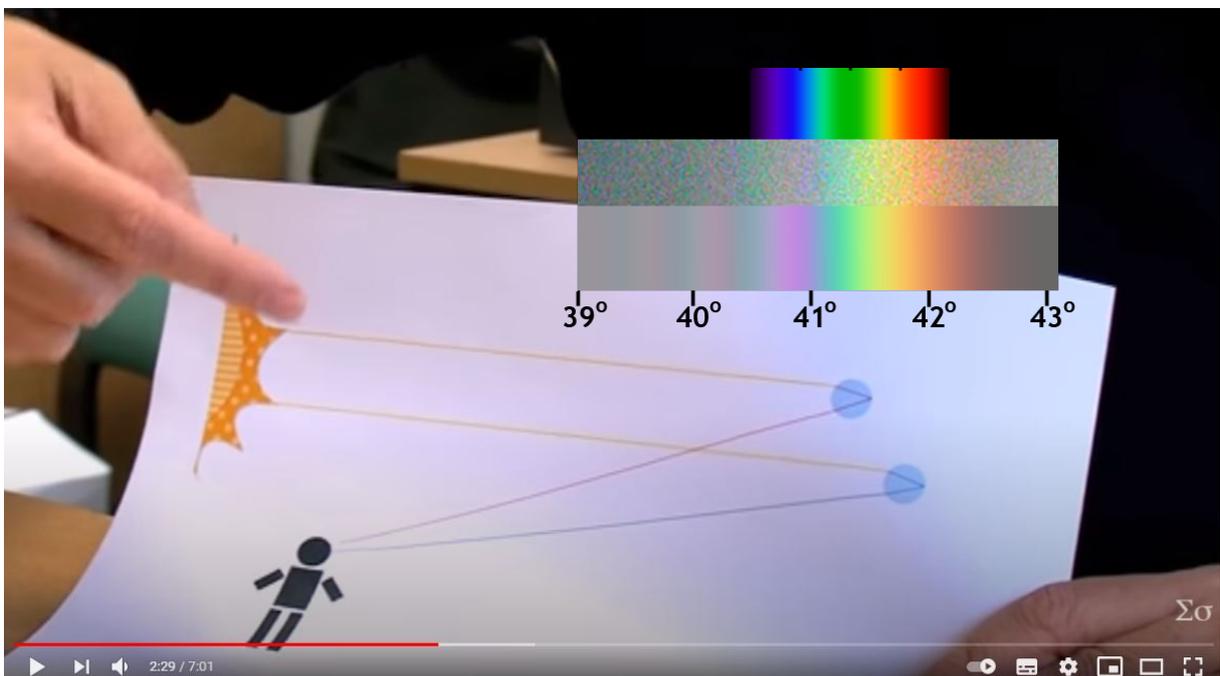


Figura 48. Formación del arco iris con múltiples gotas y ángulo de salida de los diferentes colores de las gotas de agua (inserto en la parte superior derecha). Fuente: Sixty Symbols y Wikimedia Commons (inserto). Licencia: YouTube estándar y Andys (CC BY-SA 3.0) (inserto). Enlace: <https://youtu.be/OXDbc7QfTXU> y <http://bit.ly/2Lndw2k> (inserto)

El vídeo está en inglés, pero si ves hasta el minuto 1:10 verás como con una linterna convencional y un recipiente transparente con agua demuestra como los colores del arco iris

se pueden apreciar si nos “movemos” esos 42° con respecto a la línea que va de la linterna al recipiente de agua. En la [Figura 47](#) se muestra una secuencia de fotogramas del vídeo, donde vemos al profesor Merrifield con la linterna y el recipiente de agua, la disposición de los mismos sobre la mesa, como se puede apreciar la luz blanca de la linterna reflejada en la parte posterior del recipiente (indicada por la flecha roja) y como, si nos desplazamos hacia la derecha 42° , podemos apreciar los colores del arco iris dispersados a la salida del recipiente.

Así pues, el arco iris se forma realmente por la luz sufriendo **refracción, reflexión y dispersión con múltiples gotas de agua**. El observador será capaz de ver los colores del arco iris siempre que éstos vengan aproximadamente con una desviación de 42° con respecto a los rayos de luz del Sol. En la [Figura 48](#) se representa esta situación. Es importante destacar que el ángulo varía ligeramente para cada color ya que el ángulo de refracción es también ligeramente distinto para cada uno. Esto puede apreciarse en la imagen superpuesta (parte superior derecha) en la [Figura 48](#). Como vemos, la componente roja de la luz, cuya longitud de onda es mayor, sufre una mayor refracción que la luz azul o violeta.

Ahora que conocemos cómo se forma el arco iris, podemos responder a otras preguntas como:

¿El arco iris que veo yo y una persona a 500 metros es el mismo? La respuesta es NO, ya que con toda seguridad cada observador verá un arco iris distinto formado por un grupo de gotas distinto que se generará en función de la posición del observador con respecto al Sol y las gotas. Esto nos lleva a una interesante conclusión: el arco iris que vemos no existe físicamente en una posición determinada del espacio; esto es, no hay una persona situada justo “debajo” del arco iris que vemos, sino que se trata más bien de un **efecto óptico**.

¿Por qué la parte interna del arco iris es más brillante? Este es un efecto interesante que quizás no conocieses, pero si te fijas en detalle en un arco iris, verás cómo la parte interna del mismo se aprecia más clara, más brillante que la parte externa. En la misma [Figura 45](#) se aprecia este efecto, por ejemplo al comparar el verde de las montañas en la parte inferior izquierda de la imagen (dentro y fuera del arco iris). Este fenómeno, que puedes comprobar con otras imágenes de arco iris en internet, se debe al proceso de formación que ya hemos analizado. En realidad está íntimamente relacionado con el fenómeno de **reflexión interna total**¹ que veremos más adelante en este curso, y que viene a decir que cuando la luz sufre el fenómeno de refracción al cambiar de medio (pasar de aire a agua, por ejemplo), hay un ángulo máximo para el haz de luz incidente a partir del cual la luz ya no se refracta, sino que sólo se refleja. Esto, que como decimos permite confinar y guiar la luz a través del vidrio de la fibra óptica, explica también el efecto comentado en el arco iris.

En la [Figura 49](#) se muestran dos imágenes² que tratan de explicar este fenómeno. En la parte izquierda vemos una representación de cómo la luz roja escapa de la gota de agua tras ser reflejada. Vemos como se ha indicado el ángulo máximo con el que la luz roja puede salir del agua: 42° . Para ángulos superiores no puede haber luz roja, mientras que para ángulos inferiores sí puede continuar “escapando”, pero cada vez con menor intensidad, ya que a medida que el ángulo disminuye menos luz es refractada y más reflejada (precisamente

¹El fenómeno de **reflexión interna total** es precisamente el que permite explicar la propagación de la luz dentro de una fibra óptica, clave para las telecomunicaciones de hoy en día, desde internet hasta la telefonía móvil.

²Las imágenes son fotogramas del vídeo “How rainbows form” (en inglés) que puedes encontrar en YouTube: <https://youtu.be/xkDhQGxqCM>.

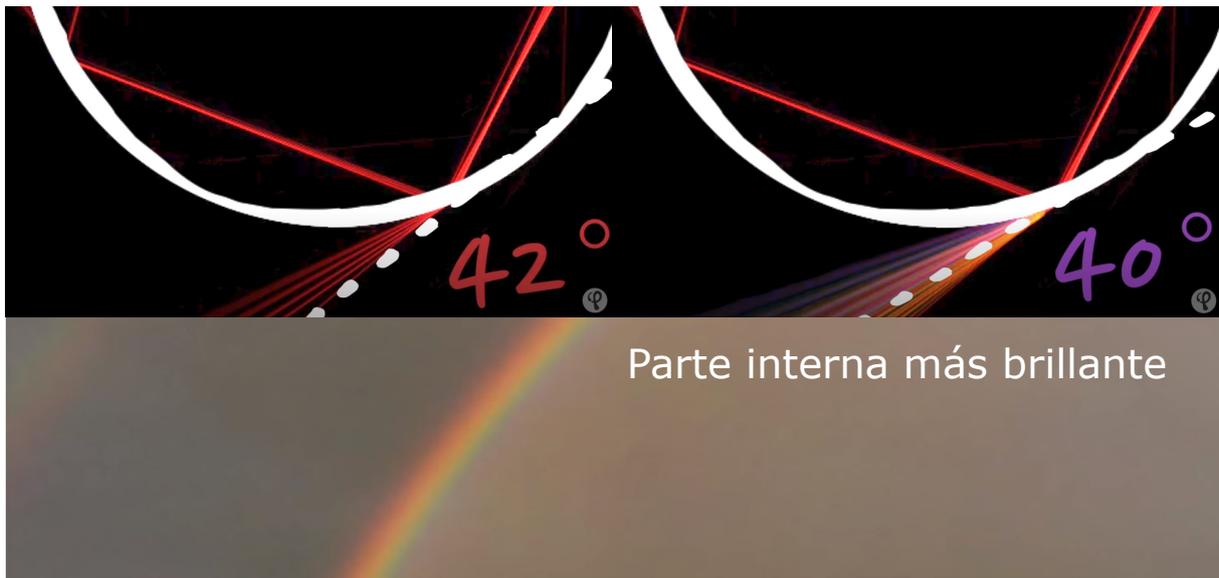


Figura 49. Formación del arco iris: ángulos máximos de salida de la luz roja y la luz violeta. Fuente: Physics Girl. Licencia: YouTube Standard. Enlace: <https://bit.ly/3qgdIiR>

siguiendo la ya conocida ley de Snell). En la parte derecha de la imagen se ha representado la misma situación, en este caso para la luz violeta. Como ya hemos comentado, el ángulo máximo de salida de cada color es ligeramente distinto, siendo en este caso de 40° .

Todo esto está muy bien pero, **¿por qué la parte interna del arco iris es más brillante?** Muy fácil, cada color tiene un ángulo máximo para el cual su intensidad es también máxima. Así, cada gota de agua contribuye con un color determinado en función de su posición con respecto al observador, mientras que el resto de colores que proviene de cada gota se suma, dando lugar a luz blanca (más brillante).

Otra curiosidad: en ocasiones la luz puede sufrir una **doble reflexión** en la gota de agua antes de escapar, lo que genera un doble arco iris, en el que el **arco iris secundario**, que aparece por encima del principal, presenta un orden de colores inverso, comenzando por el rojo en la parte interna del arco. Este efecto puede observarse claramente en la [Figura 50](#), donde, además, se aprecia también claramente cómo la parte interior es más clara que la exterior del arco iris principal. Esto ocurre al revés con el arco secundario “invertido”, quedando la franja entre los dos mucho más oscura: es la denominada “*franja oscura de Alexander*” (*Alexander's dark band*).

Una última curiosidad: ¿Sabías que en el arco iris también aparecen las contribuciones del **ultravioleta (UV)** y el **infrarrojo (IR)**? Lógicamente, nuestros ojos no están preparados para detectar esos “colores”¹, pero con las cámaras adecuadas sí podemos tomar fotografías, tal y como se muestra en la [Figura 51](#)².

Y para terminar (¡y es que podríamos dedicar todo un capítulo a entender mejor el arco iris!) un último dato: el arco iris es en realidad **¡un círculo completo!** ¿Por qué, entonces, lo

¹Hablaremos de ello más adelante en el capítulo dedicado a la visión humana y animal.

²NOTA: las contribuciones que aparecen en el UV (parte superior) y el IR (inferior) han sido coloreadas para dotarlas de un efecto artístico.



Figura 50. Formación de un arco iris secundario y franja oscura de Alexander. Fuente: Wikimedia Commons (Alexis Dworsky). Licencia: CC BY 2.0. Enlace: <http://bit.ly/35AFdvo>



Figura 51. Arco iris con contribuciones en el espectro visible (centro), ultravioleta (parte superior) e infrarrojo (inferior). Fuente: Andrew Steele (@stato (twitter)). Enlace: <https://bit.ly/3nCwpeN>

apreciamos generalmente como un arco? Sencillamente porque la línea del horizonte se interpone en su camino. Desde puntos elevados (aviones, edificios) pueden darse las condiciones para apreciar el círculo completo de un arco iris (ver [Figura 52](#)).



Figura 52. Formación de un arco iris circular completo. Fuente: Wikimedia Commons (Steve Kaufman). Licencia: CC BY SA. Enlace: <http://bit.ly/35DqYGj>

1.21.1. Entendiendo el arco iris: Conclusiones

La curiosidad del ser humano ha sido uno de los grandes motivadores para explicar el avance científico y tecnológico que en las últimas décadas ha ofrecido avances antes impensables: desde poner un pie en la luna a ser capaces de desarrollar una nueva vacuna en apenas meses. El ansia por entender fenómenos cotidianos, como el arco iris que de vez en cuando aparece en nuestros cielos, nos lleva siempre más allá, tratando de comprender desde lo que ocurre a un nivel más pequeño (física cuántica) hasta las mayores escalas posibles (¿cómo se originó el universo? ¿por qué se expande?).

Como has visto, la explicación de un fenómeno cotidiano y que damos por supuesto no resulta tan obvia como podíamos pensar y lo aprendido podremos relacionarlo con otros contenidos del curso, como el guiado de la luz por fibra óptica.