

# capítulo 1 la luz



## Introducción

Mucho tiempo y esfuerzo le llevó a la humanidad tratar de entender su naturaleza y buscar la respuesta a la gran interrogante: **¿qué es la luz?** Aunque sabemos bastante acerca de este fenómeno gracias a la labor de numerosos científicos a lo largo de la historia, todavía queda mucho por descubrir. En estos capítulos estudiaremos algunas propiedades de la luz, sus aplicaciones, y la evolución de las ideas científicas sobre ella.

Cuando enciendes el televisor, miles de puntos luminosos se combinan para formar una imagen, la que vemos gracias a nuestros maravillosos ojos. En un reproductor de CD o DVD un laser recorre los surcos "leyendo" la información almacenada. En el supermercado, un lector óptico de códigos de barras, relaciona velozmente el producto con su precio. Líneas de fibra óptica unen continentes llevando información de un lado a otro utilizando señales de luz. Podríamos seguir describiendo otras aplicaciones de la luz y la lista sería muy extensa. Nos gustaría que este fuera el puntapié inicial para tus estudios en un área tan fascinante como es la Óptica.



Fig. 1. Luz reflejada en un CD.

## La Física y los Modelos en la Historia

La rama de la Física que se dedica a estudiar el comportamiento de la luz, es la Óptica. Al igual que todas las demás ciencias, evolucionó lenta y progresivamente, hasta llegar a ser lo que es hoy en día. Para interpretar los fenómenos luminosos a lo largo de la Historia, los científicos han planteado diversas teorías, fundamentadas, organizadas y estructuradas de tal forma, que constituyen lo que llamamos un "modelo".

### Modelos Organicistas

Las primeras explicaciones científicas sobre la naturaleza del mundo físico, se basaban en analogías con el funcionamiento de los seres vivos, atribuyendo a los objetos propiedades de los mismos. Un ejemplo de explicación organicista en el fenómeno de la visión sería: "los objetos se tornan visibles al ser alcanzados por rayos luminosos emitidos desde los ojos, como si fueran tentáculos". Al conjunto de teorías elaboradas según esta idea, se les denomina Modelos Organicistas. Se destacan los aportes de **Demócrito** (Fig. 2), **Aristóteles** (Fig. 3), **Epicuro** (Fig. 4) y **Lucrecio** (Fig. 5),



Fig. 2. Demócrito. Grecia 470/460 al 370/360 a.C.

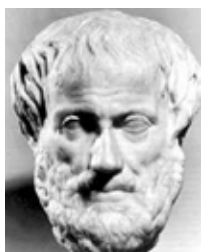


Fig. 3. Aristóteles. Grecia 384 a.C.-322 a.C.

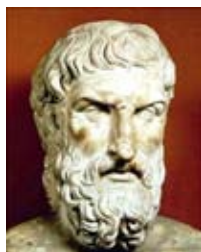


Fig. 4. Epicuro. Grecia 341 a.C. -270 a.C.



Fig. 5. Lucrecio. Roma 99 a.C. - 55 a.C.

quienes sostenían que los rayos de luz pasan del objeto al ojo, mientras **Euclides** (Fig. 6), **Empédocles** (Fig. 7) y **Tolomeo** afirmaban lo opuesto, que la propagación de los rayos de luz era desde el ojo hacia el objeto.

### Modelos Mecanicistas

En una etapa posterior de la Ciencia, los científicos dejan de asignar "voluntad" o "vida" a los objetos y se dedican a describir los fenómenos e interpretarlos en función de conceptos como masa, velocidad, y otras magnitudes medibles. Al conjunto de teorías que intentaban explicar la naturaleza de este modo, se les denomina Modelos Mecanicistas, siendo **Sir Isaac Newton** el gran responsable de los logros de esta concepción de la ciencia.

A modo de ejemplo, Lord Kelvin (Fig. 8) decía:

*"Nunca estoy satisfecho hasta que consigo el modelo mecánico de una cosa. Si puedo construir un modelo mecánico, entiendo el fenómeno".*

Una descripción mecanicista de los fenómenos luminosos sería, considerar la luz como partículas que se mueven con cierta velocidad, e interactúan con el medio, chocan, se desvían.

Esta concepción de la Física ha posibilitado enormes progresos, pero no siempre lleva a una explicación adecuada al estudiar fenómenos más complejos, donde se hacen necesarios conceptos más abstractos como la idea de "campo" y de "onda".

### Modelos conceptuales

En la actualidad la Física trata de dar explicaciones en base a esquemas conceptuales más o menos complejos, expresados en gran medida en términos matemáticos. Aparecen conceptos como "Relatividad", "Espacio-tiempo", "Cuantización", y ya no es tan sencilla su representación gráfica. La propagación de la luz pasa a ser explicada mediante campos eléctricos y magnéticos variables que viajan en forma de onda, incluso a través del vacío.

Al avanzar en el estudio de las propiedades de la luz, iremos viendo los argumentos sostenidos por los defensores de **las dos teorías** más importantes sobre su propagación:

- **la que considera a la luz como una partícula material**, denominado **Modelo Corpuscular**.
- **la que considera a la luz como una onda**, denominado **Modelo Ondulatorio**.

El debate entre estos dos modelos fue una de las discusiones más interesantes de la historia de la ciencia. Los defensores más importantes de la teoría ondulatoria fueron **Christian Huygens**, **Robert Hooke** (Fig. 9) y **Thomas Young** (Fig. 10), mientras que **Isaac Newton** (Fig. 11) fue el representante más destacado de la teoría corpuscular.



Fig. 6. Euclides, Grecia  
300 - 325 a.C - 265 a.C.



Fig. 7. Empédocles, Grecia  
495/490 - 435/430 a.C.



Fig. 8. William Thomson, Primer barón de Kelvin, Irlanda  
1824 -1907



Fig. 9. Robert Hooke,  
Inglaterra 1635 - 1703



Fig. 10. Thomas Young,  
Inglaterra 1773 - 1829



Fig. 11. Isaac Newton, Inglaterra 1643-1727



Fig. 12. Fogata en estufa a leña.

## Modelo Corpuscular versus Modelo Ondulatorio

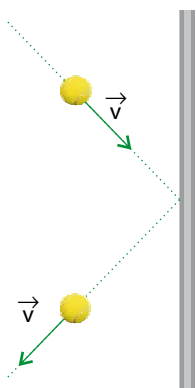
Estos modelos se han considerado antagónicos, sin embargo, en la actualidad se ha llegado a una situación que en ciertos aspectos engloba ambas concepciones. Las ideas que han surgido en este campo, además de interpretar todos los fenómenos luminosos, han abierto un nuevo panorama en la interpretación del mundo físico.

En este capítulo y en los próximos seguiremos haciendo referencia a este debate, a medida que estudiamos las propiedades de rayos de luz y ondas.

Hasta el siglo XVII, se creía que la luz estaba formada por corpúsculos que eran emitidos por los focos luminosos, tales como el sol o la llama de una hermosa fogata (Fig. 12). Estos corpúsculos viajaban en línea recta y atravesaban los objetos transparentes pero no los opacos, excitando el sentido de la vista al penetrar en el ojo. Esta idea era sostenida por Isaac Newton. Con ella pudo explicar las leyes de la reflexión y de la refracción (fenómenos que estudiaremos más adelante) aunque con algunas fallas.

A mediados de dicho siglo, empezó a abrirse paso una nueva teoría, la que sostenía que en realidad la luz se trataba de algún tipo de fenómeno ondulatorio. El padre de dicha teoría fue el físico holandés **Christian Huygens** (Fig. 13), que sostenía que la luz era una vibración (semejante al sonido Fig. 14) y que se propaga utilizando un soporte material que llamó éter (luego veremos que la luz, a diferencia del sonido, se propaga aún en el vacío).

Si bien logró explicar fácilmente la reflexión y refracción con esta teoría, no pudo hacerlo de la misma forma con la propagación rectilínea. El sonido "rodea" obstáculos mientras que la luz no. La gran reputación de Newton, también influyó para que las ideas de Huygens sobre la naturaleza ondulatoria de la luz, no fueron aceptadas por la mayoría de sus contemporáneos. Además un fenómeno característico de las ondas es la interferencia (Fig. 15), que no podía ser observada en la luz, con los medios de esa época, fortaleciendo de este modo la teoría corpuscular. De todas formas en 1678 publica "Traité de la lumière", primer intento de desarrollar una teoría ondulatoria de la luz.



La luz se refleja en un espejo como una pelotita de goma rebota en una pared



Fig. 13. Christiaan Huygens, Holanda. 1629 -1695

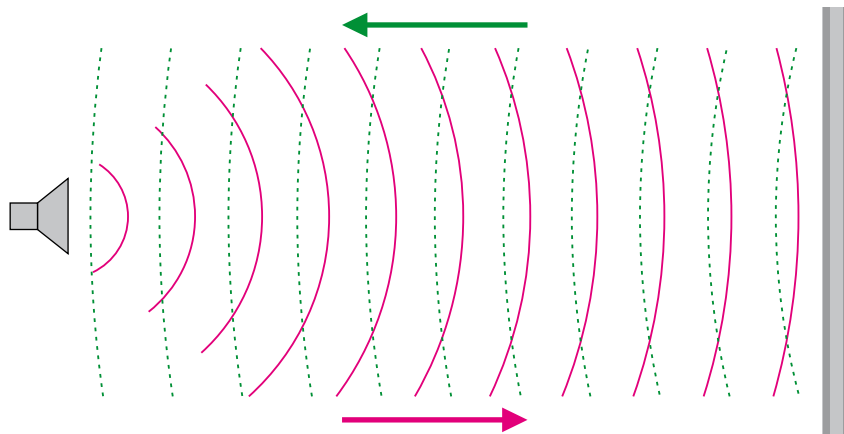


Fig. 14. La luz se refleja en un espejo como el sonido se refleja en una pared, originando un eco.



Fig. 15. Interferencia de ondas en el agua

Un siglo más adelante, un médico inglés, de nombre **Thomas Young** realizó una célebre experiencia que lleva su nombre. Encontró que si dejaba pasar luz de un solo color que procedía de una única fuente, a través de dos pequeñas rendijas muy próximas, se formaban unas bandas brillantes que alternaban con otras más oscuras. (Fig. 16). De esa forma demostró que el fenómeno de interferencia también ocurría para la luz. Basándose en este experimento (que hoy puedes realizar fácilmente en el laboratorio de tu centro de estudios), construyó un sólido argumento a favor de la **naturaleza ondulatoria de la luz**.

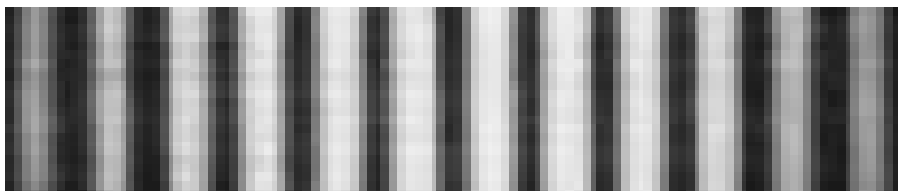
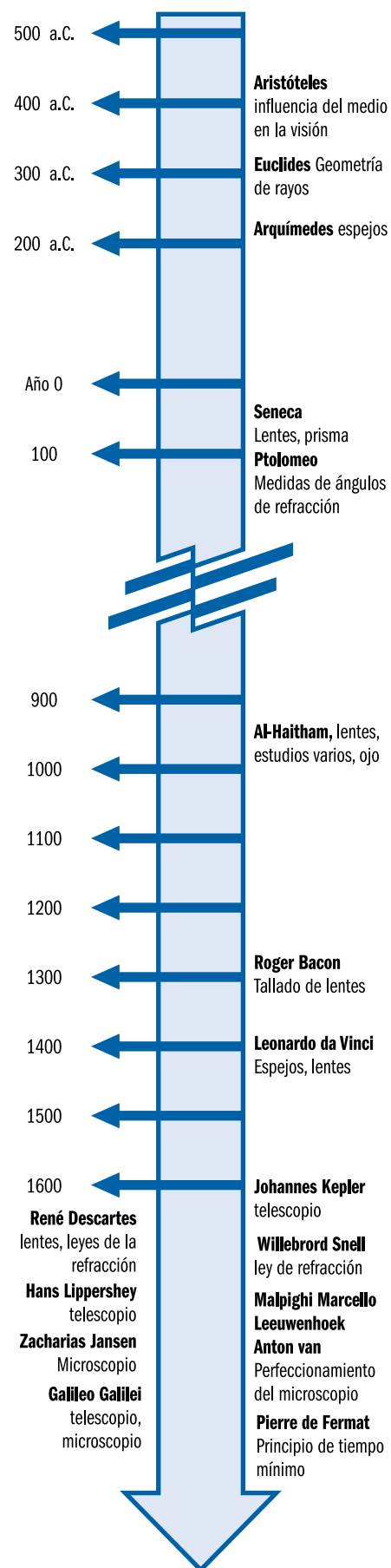


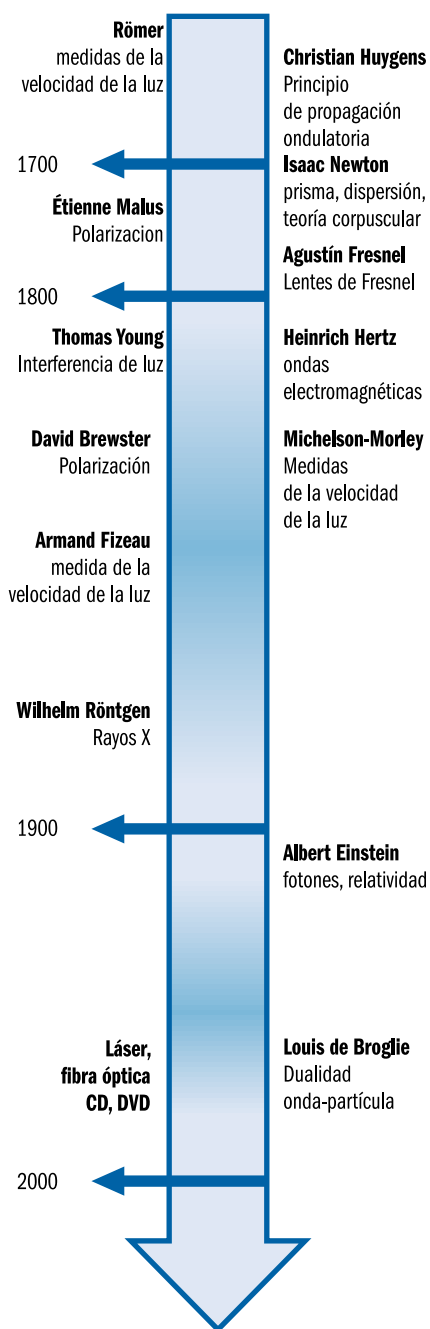
Fig. 16. Interferencia luminosa.

## Los aportes de los científicos en la antigüedad.

Para llegar a la elaboración de los modelos descritos anteriormente, fueron necesarios siglos de estudios e investigaciones por parte de grandes científicos. Trataremos de brindarte una apretada síntesis de los trabajos de algunos de ellos, para que tengas más elementos acerca de cómo fue la evolución del conocimiento en esta área.

Las nociones que se tenían de la Óptica en la antigüedad, no se conocen con mucha precisión. En los restos de antiguas civilizaciones, se encontraron objetos que nos dan una idea de los intereses de los hombres por los fenómenos ópticos.





En hallazgos arqueológicos, como en tumbas egipcias, se encontraron restos de espejos metálicos que probablemente servían para desviar los rayos del sol. Se utilizaban como objetos sagrados para encender el fuego. Las lentes convergentes, (que veremos más adelante) fueron usadas como lupas desde tiempos muy remotos, las utilizaron para hacer las pequeñas inscripciones en objetos hallados en las esfinges.

En el **siglo XV** antes de Cristo, aparecen los primeros objetos artísticos de vidrio, tecnología previa necesaria para el desarrollo de las lentes. En el **siglo V a. C.** los griegos, romanos, árabes... conocían las propiedades de los espejos y utilizaban lentes de vidrio o de agua para concentrar rayos de sol y encender fuego, como la construida por **Aristófanes** en el año 424 a. C. con un globo de vidrio soplado, lleno de agua.

En la antigua Grecia, **Euclides** (recuerda que lo mencionamos dentro de los modelos organicistas como uno de los autores que consideraban a la luz como un tentáculo lanzado desde el ojo hasta el objeto) realiza observaciones geométricas muy importantes relacionadas con la propagación rectilínea de la luz.

**Aristóteles** (Nace 384- Muere 322 a.C. Filósofo Griego) toma distancia de la discusión entre pitagóricos y platónicos sobre si la visión es originada por la emisión o la recepción de imágenes. Sostenía que el medio existente entre el objeto y el ojo desempeñaba un papel esencial, al activarse por la luminosidad del objeto, se vuelve transparente y permite a los distintos colores viajar hasta nuestros ojos.

**Arquímedes** (Nace 287 – Muere 212 a.C. Matemático e ingeniero Griego), según cuenta la tradición, defendió su ciudad natal, Siracusa, empleando espejos cóncavos de gran tamaño para concentrar los rayos del Sol en los barcos enemigos y quemar sus naves. La comunidad científica duda seriamente de la veracidad de esta leyenda.

**Herón** (siglo I a. C. Alejandría) mecánico y constructor de máquinas. Estudió ampliamente los espejos y planteó la idea de que el rayo de luz siempre sigue el camino más corto entre el objeto y el ojo. Esta idea fue recogida y reformulada por Fermat en el siglo XVIII.

**Séneca** (4 adC- 65 d.C.) fue el primero en mencionar la capacidad amplificadora de las lentes convergentes, al describir la imagen de los objetos vistos a través de un globo de vidrio lleno de agua. Además describe los colores que se ven a través de un prisma transparente, propiedad que volvió a estudiar Newton varios siglos más tarde.

**Claudio Tolomeo** (siglo II d.C. Alejandría), astrónomo griego que en su "Libro quinto de óptica" publicó medidas realizadas con mucha precisión de los ángulos de incidencia y refracción para diversos medios, aunque no logró formular las leyes correspondientes. Sostuvo que los rayos que llegan de las estrellas se desvían al ingresar al aire, por lo cual la posición observada difiere de la real.

## Fundación de la óptica moderna.

En la **Edad Media** los árabes hicieron amplios estudios sobre óptica, gracias al gran interés de la medicina islámica en el estudio de las enfermedades de los ojos. Basados en la forma del cristalino de nuestro aparato ocular construyeron y emplearon lentes de cristal o de vidrio para ampliar la imagen y facilitar la lectura. En las lentes tenemos la primera prolongación del aparato ocular humano.

El científico árabe **Al-Hasan-Ibn-Al-Haytham**, (nacido en Basra en el año 965 en lo hoy es Irak- muerto en el Cairo en el año 1039) conocido en occidente como **Alhazen** es considerado el padre de óptica moderna. Entre sus aportes más trascendentes podemos mencionar la precisa descripción de las partes del ojo, la explicación del proceso de la visión, considerando que son los rayos luminosos los que van de los objetos al ojo, fabricación de lentes, estudio de sombras y eclipses. Construyó una **cámara oscura** (Fig. 17), 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 y puedes utilizarlo para observar de manera indirecta un eclipse de sol, sin afectar tus ojos.

Anticipó que la luz viaja con una velocidad finita y a pesar de haber escrito muchos libros, solo sobrevivió "**Opticae**", obra que tuvo gran influencia sobre Roger Bacon, Leonardo Da Vinci y en Johann Kepler.

**Roger Bacon** (Fig. 18). Nació en Ilchester Inglaterra en el año 1214 y murió en Oxford en 1294. Fraile franciscano, notoriamente influido por la escuela árabe, logra tallar en 1266 lentes para mejorar la lectura de las personas con problemas de visión. Tenían forma similar a una lenteja, de donde proviene el nombre **lente**. En su libro "Opus maius", Bacon describe las propiedades de una lente para amplificar la letra escrita. Resalta a la óptica como indispensable para el estudio de la naturaleza, al permitir a todos, acceder al conocimiento escrito y obtener su propia experiencia visual de los fenómenos.

**Leonardo da Vinci** (Fig. 19). Artista italiano nacido en Vinci, Toscana en 1452 y muerto en Francia en el 1519. Estudió la estructura y el funcionamiento del ojo y formuló una teoría de la visión, en la que comparaba el ojo a una cámara oscura. Dentro de su impresionante obra creativa, diseñó máquinas para tallar grandes espejos y fue el precursor de los lentes de contacto para corregir defectos de visión.

En los siglos **XVI y XVII**, en el nacimiento de la moderna ciencia experimental, la óptica tuvo un papel fundamental, especialmente con la aparición del telescopio (el más probable inventor fue el óptico holandés **Hans Lippershey**, fabricante de anteojos) y el microscopio (probablemente inventado por **Zacharias Jansen** holandés, 1588-1632).

Estos instrumentos permitieron ampliar los límites de la percepción visual, obteniendo así imágenes de objetos muy lejanos y muy pequeños; y contraponer evidencia científica a las especulaciones filosóficas o religiosas.

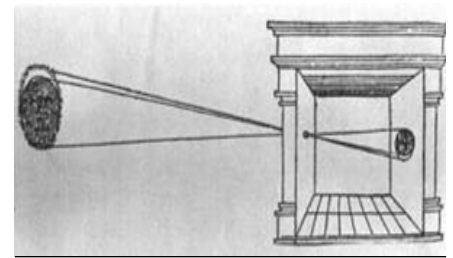


Fig. 17. Cámara oscura



Fig. 18. Estatua de Roger Bacon en el Museo de Historia Natural de Oxford



Fig. 19. Leonardo da Vinci



Fig. 20. Galileo Galilei.

**Galileo Galilei.** (Fig. 20). Astrónomo y Físico italiano nació en Pisa en el año 1564 y murió en Arcetri cerca de Florencia en el 1642. Fue quien realizó los primeros y revolucionarios estudios del cielo con un telescopio, construido de acuerdo al diseño de Lippershey, el cual perfeccionó llegando a 32 aumentos. El descubrimiento de los satélites de Júpiter y otras observaciones astronómicas, sirvieron de argumento en contra de la teoría geocéntrica. Esta ubicaba a la Tierra inmóvil en el centro del universo, mientras que el Sol, la Luna y demás cuerpos celestes giraban a su alrededor. El resultado de sus investigaciones lo llevó a ser enjuiciado por los tribunales de su época y ser condenado al aislamiento, además de obligarlo a retractarse públicamente.



Fig. 21. Johann Kepler

**Johann Kepler.** (Fig. 21). Astrónomo alemán, nació en Weil der Stadt en 1571 y murió en Ratisbona en el año 1630. Compiló y estudió minuciosas tablas de datos obtenidos por Tycho Brahe sobre el movimiento de los planetas, deduciendo a partir de ellas sus trascendentales leyes sobre el movimiento planetario. En el año 1611 publicó su obra "Dioptrice", texto fundamental para los estudiosos de la óptica durante muchos años. Kepler fue el primero que planteó que la imagen se forma en la retina, que esta imagen está invertida con relación al objeto y que el cerebro es el encargado de interpretarla adecuadamente.



Fig. 22. Willebrord Snell.

**Willebrord Snell** (Fig. 22). Matemático y astrónomo holandés, nació en Leiden en 1591 y falleció en 1626. Fue profesor en la universidad de su ciudad natal y se dedicó al estudio de la óptica geométrica. Repitiendo los experimentos de Tolomeo, Snell consiguió medir los ángulos de incidencia y de refracción para la superficie de separación de dos medios. A partir de tales mediciones, formuló la ley de la refracción, conocida hoy como **Ley de Snell**. La misma desempeñó un importantísimo papel en el desarrollo, tanto del cálculo para diseñar lentes e instrumentos ópticos, como de las teorías de propagación de la luz.



Fig. 23. René Descartes.

**René Descartes** (Fig. 23). Filósofo y matemático francés, nació en La Haye en 1596 y murió en Estocolmo, Suecia en el año 1650. Utilizando puntos de partida diferentes que Snell llegó a deducir la misma ley y la expresó de la manera que la conocemos en la actualidad. Construyó elementos ópticos y publicó un importante trabajo de nombre "La Dioptrique" donde aparece la idea de colocar una lente directamente en contacto con la córnea (lentes de contacto).



Fig. 24. Pierre de Fermat

**Pierre de Fermat** (Fig. 24). Matemático francés, nació en Beaumont de Lomagne en 1601 y falleció en Toulouse en 1665. A partir de un planteo similar al de Herón ("la luz se propaga siempre a lo largo de aquella trayectoria que le suponga el mínimo tiempo, incluso si para lograrlo tiene que desviarse del camino geoméricamente más corto") logró deducir la misma ley que Snell y Descartes. Este principio, en su forma más moderna es utilizado aún para estudiar fenómenos ópticos.

**Marcello Malpighi.** Médico italiano, nació en Crevalcore, cerca de Bolo-  
**gnia** en 1628 y murió en Roma en 1694 y **Leeuwenhoek Anton van,** Biólogo y microscopista holandés, nació en Delft en 1632 y falleció en la misma ciudad en 1723. Perfeccionaron el diseño y tallado de las lentes, logrando así observar microorganismos y glóbulos sanguíneos.

**Robert Hooke.** Físico inglés, nació en Freshwater en 1635 y murió en Londres en 1703. Construyó un microscopio compuesto en 1665, con él realizó cuidadosas observaciones que aparecen en su libro "Micrographia". Fue un gran defensor de la teoría ondulatoria de la luz, enfrentándose por ello a Isaac Newton.

**Isaac Newton.** Científico y matemático Inglés, nació en Woolsthorpe, Lincolnshire el 25 de diciembre de 1642 y murió en Londres el 20 de marzo de 1727. Además de sus contribuciones al modelo corpuscular, realizó un gran trabajo experimental sobre la descomposición de la luz al pasar por un prisma de cristal.

**Benjamín Franklin** (Fig. 25). Hombre de estado y científico americano, nació en Boston en 1706 y murió en Filadelfia en 1790. Se le atribuye la creación de las lentes bifocales, formadas por dos mitades de lentes: la de visión lejana y la de visión próxima montadas en un mismo aro.

**Agustín Fresnel.** Físico francés, nació en Broglie en 1788 y falleció en Ville-d'Ávray cerca de París en 1827. Realizó numerosos experimentos sobre interferencia y difracción y dio un gran avance a la teoría ondulatoria. Cortando una lente gruesa en anillos y montándolos como muestra el dibujo (Fig. 26) logró afinarla sensiblemente, disminuyendo su masa sin cambiar sus propiedades ópticas. Actualmente se utilizan para enfocar haces de luz potentes como las utilizadas en estudios cinematográficos o en faros (Fig. 27). La tecnología actual logró moldearlos en plástico llevando su espesor a 1mm.

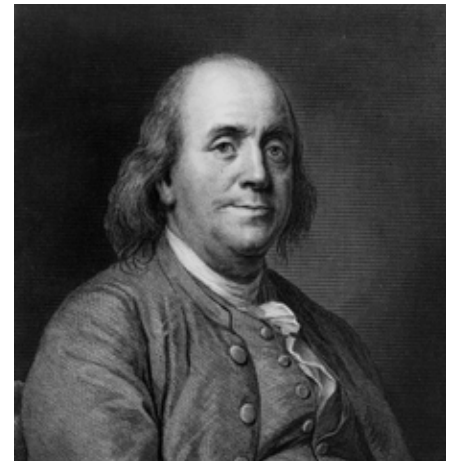


Fig. 25. Benjamín Franklin

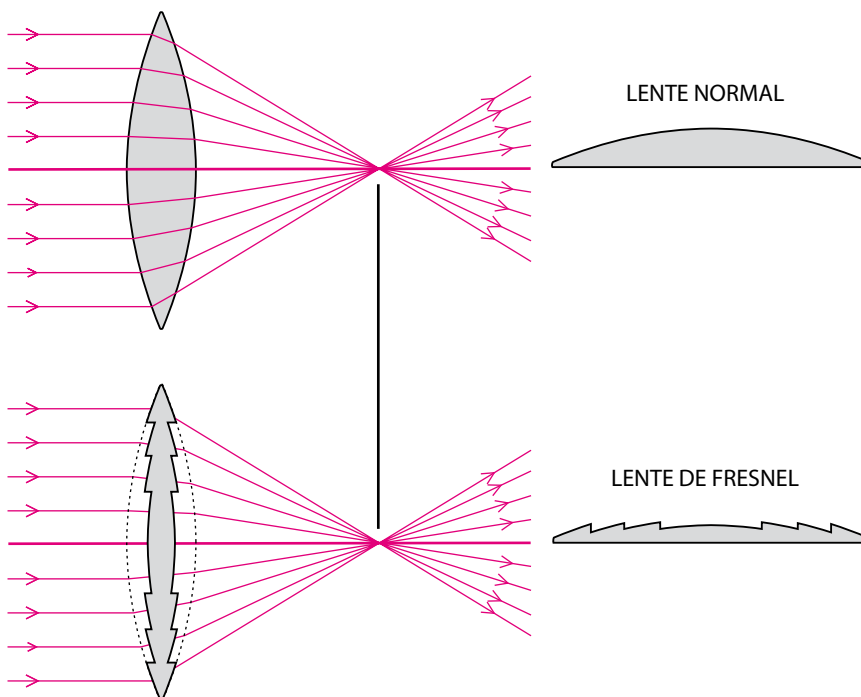


Fig. 26. Lentes de Fresnel. Un uso frecuente es en los retroproyectores.

Más adelante estudiaremos la obra relacionada con la luz de científicos más cercanos a nuestro tiempo.



Fig. 27. Lentes de Fresnel del faro de la Paloma. (Gentileza de la Prof. Gabriela Baccino).





Fig. 28. Fuentes de luz.

## Fuentes de luz

En nuestra experiencia cotidiana nos encontramos con elementos que emiten luz y otros que no tienen luz propia y se tornan visibles al ser iluminados. Pondremos nuestra atención en los primeros que se denominan **“fuentes de luz”**. (Fig. 28). En el interior de éstos se dan procesos que transforman algún tipo de energía en energía luminosa. En el sol y el resto de las estrellas la luz se emite como resultado de reacciones nucleares. Una lamparita incandescente emite luz al aumentar la temperatura del filamento metálico, como resultado del pasaje de corriente eléctrica por dicho filamento.

Algunos peces de las profundidades oceánicas emiten luz. ¿Debido a qué te parece que esto ocurre?

A un cuerpo que emite luz y lo percibimos como un punto luminoso lo denominaremos **“fuente puntual”**. En la práctica una fuente extensa situada a mucha distancia puede ser considerada como puntual, por ejemplo una vela a algunos metros de distancia o cualquier estrella que no sea el sol.

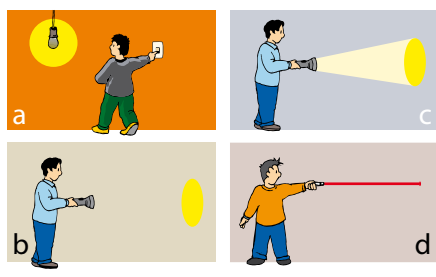


Fig. 29. Haces y rayos de luz

## Rayos de luz

Cuando entras a una habitación a oscuras y enciendes una lámpara, la luz que ella emite ilumina la habitación de forma aparentemente instantánea. (Fig. 29 a) ¿Cómo se produce este fenómeno? Imagina ahora que entras a la habitación con una linterna, al encenderla observas que la luz no ilumina toda la habitación, sino que sobre la pared se dibuja un círculo luminoso. (Fig. 29 b). Si en el aire hay partículas de polvo o mucha humedad puedes observar un cono trunco de luz al que le llamaremos **haz de luz**. (Fig. 29 c). Si cambiamos la linterna por un laser, el haz es más fino. (Fig. 29 d). Imaginemos que pudiéramos obtener un haz aún más fino, obtendremos una recta luminosa a la que llamaremos **rayo de luz**. Utilizaremos esta idea de rayo para intentar explicar la propagación de la luz y sus propiedades. Lo que nos permitirá utilizar la geometría desarrollada por Euclides en su estudio.

Volviendo a la lámpara en la habitación a oscuras podemos decir que al encenderla, ésta emite rayos de luz en todas direcciones.

### Propagación rectilínea

De las observaciones anteriores y de nuestra experiencia cotidiana parece bastante claro que la luz se propaga en línea recta. Esto solamente ocurre cuando el medio es **homogéneo**, es decir que todos sus puntos tienen idénticas propiedades (por ejemplo: presión, densidad, temperatura). La luz tampoco se mantiene en línea recta cuando pasa por un campo gravitatorio intenso, pero el estudio de este caso no será parte de nuestro curso.

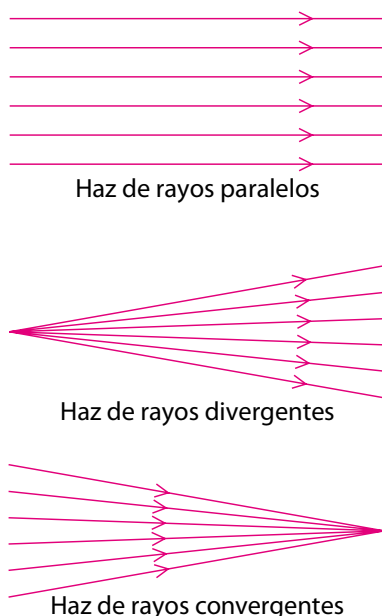
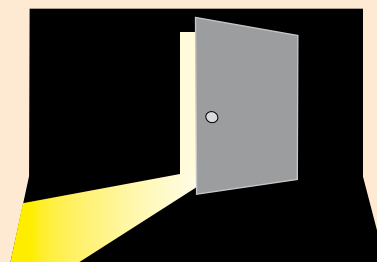


Fig. 30. Clasificación de rayos de acuerdo a su dirección.

## Ejemplo N° 1

Tenemos dos habitaciones comunicadas por una puerta. Una habitación se encuentra a oscuras, la otra iluminada y la puerta está cerrada. Posteriormente se abre la puerta hasta la mitad.

Observa el piso y la pared de la habitación enfrente a la puerta que se encontraba a oscuras. ¿Qué ocurre con la oscuridad y con la luz?



## Formación de sombras.

Cuando un haz de luz emitido por una fuente puntual ilumina un cuerpo opaco, detrás de él se observa una **sombra**. (Fig. 31)

**Sombra:** es una zona oscura a la que no llegan los rayos de luz.

Si colocamos una pantalla, en ella vemos la sombra, del cuerpo opaco.

**Cuerpo opaco:** es aquel que no es atravesado por un rayo de luz, como un trozo de madera.

Esta sombra queda delimitada por los rayos "límite", es decir aquellos que pasan por el borde del cuerpo. Trazando estos rayos podemos verificar que el tamaño de la sombra aumenta si alejamos la pantalla del cuerpo opaco. (Fig. 32). También logramos el mismo resultado si acercamos la fuente al cuerpo. (Fig. 33).

Si la fuente es extensa, se formará una zona de penumbra, a la que llegan algunos rayos de luz como muestra el dibujo.

**Penumbra,** zona donde la fuente lumínica sólo es bloqueada parcialmente y llegan algunos rayos de luz.

En los eclipses de sol se puede apreciar este fenómeno, donde la fuente extensa es el sol, el cuerpo opaco es la luna y la Tierra ocupa el lugar de la pantalla. (Fig. 35)

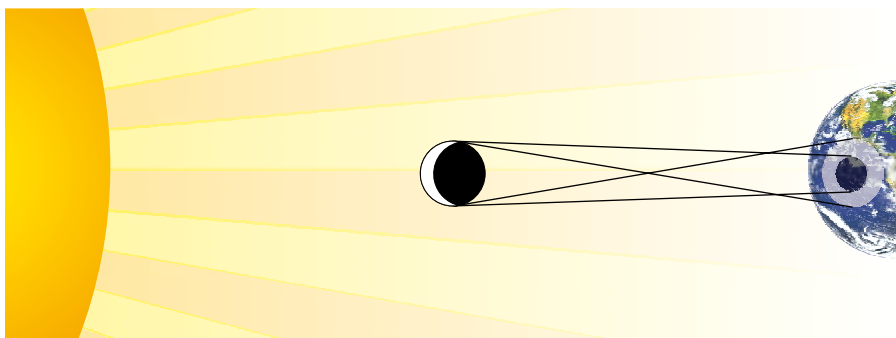


Fig. 35. Eclipse de Sol (el dibujo no está a escala).

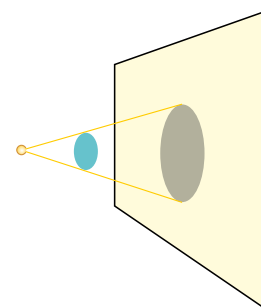


Fig. 31. Cuerpo opaco y su sombra.

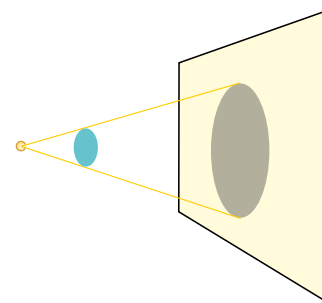


Fig. 32. Sombra aumentada por alejar la pantalla del cuerpo.

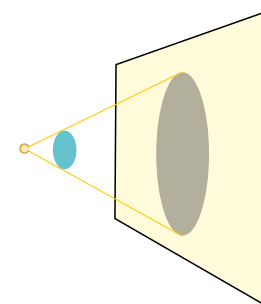


Fig. 33. Sombra aumentada por acercar la fuente al cuerpo.

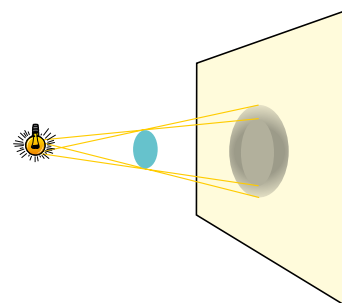


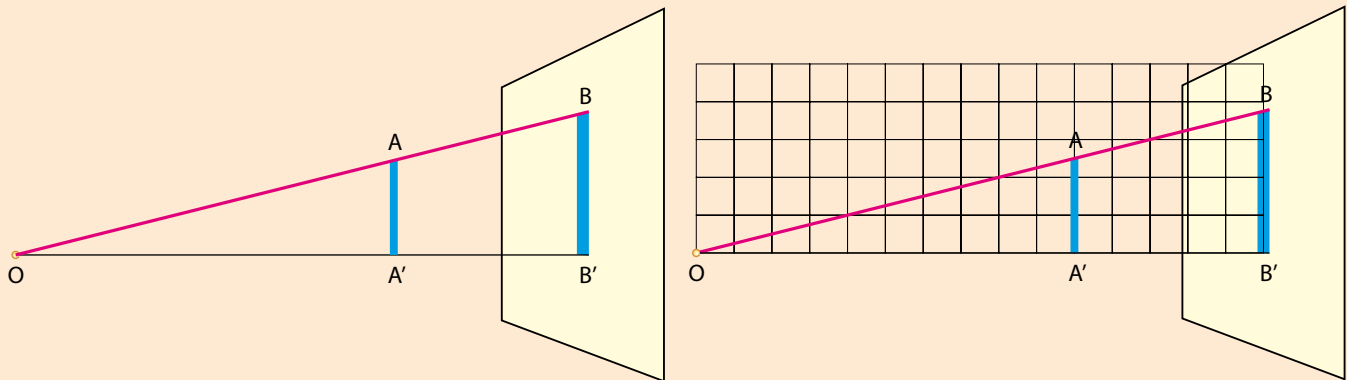
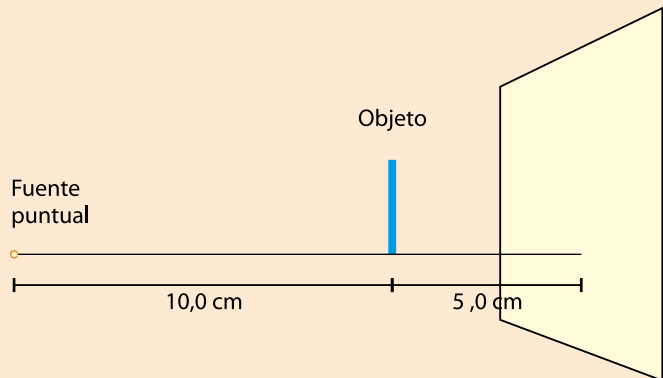
Fig. 34. Penumbra formada por una fuente extensa.

## Ejemplo N° 2

Un objeto opaco de 2,5cm de altura se coloca entre una fuente luminosa puntual y una pantalla como se muestra en el dibujo. Determina el tamaño de su sombra.

a) Método gráfico: Para determinar el tamaño de la sombra realizaremos un diagrama a escala de la situación, y trazando los rayos que pasan por los extremos del cuerpo opaco (rayos límites) lograremos determinar el tamaño de la sombra. El dibujo está realizado a escala  $\frac{1}{2}$ , es decir que 1cm del dibujo representa 2cm reales.

En nuestro esquema la sombra quedó de 1,9cm de altura. Como el dibujo está a escala  $\frac{1}{2}$ , la sombra real mide el doble, 3,8cm.



b) Método analítico:

Los triángulos OAA' y OBB' son semejantes, por lo que se cumple la siguiente relación:  $\frac{AA'}{OA'} = \frac{BB'}{OB'}$

Sustituyendo queda  $\frac{2,5\text{cm}}{10,0\text{cm}} = \frac{BB'}{15,0\text{cm}}$  Despejamos BB'  $\frac{15,0\text{cm} \times 2,5\text{cm}}{10,0\text{cm}} = BB'$  3,75 cm = BB'

Expresado con el adecuado número de cifras significativas

$$\mathbf{BB' = 3,8 \text{ cm}}$$

### Velocidad de la luz.

Es bien notorio que la luz de un rayo (relámpago) llega a nosotros antes que su sonido (trueno). Esta diferencia es menor cuanto más cerca de nosotros caiga el rayo. Esto pone de manifiesto que el sonido viaja a una velocidad "finita" más lenta que la de la luz y que puede ser medida. Enciende una linterna e intenta medir el tiempo que demora el haz de luz en llegar a la pared. Parece llegar en forma instantánea. ¿Es así o la luz se propaga a una velocidad tan grande que es necesario utilizar distancias mayores para medirla? Esto fue objeto de investigaciones y de muchos experimentos por parte de grandes físicos.

## El intento de Galileo

Galileo Galilei propuso en 1638 un método para determinar experimentalmente la velocidad de la luz. El mismo consistía en dos personas separadas cerca de 1,0 milla (1,6km), el primero destapaba una linterna a la vez que activaba un reloj. El segundo, al ver la luz del primero, destapaba su linterna. El primero, al ver la luz emitida por el segundo, detenía el reloj. (Fig. 36). De esta manera pretendía calcular la velocidad de la luz como el cociente entre dos veces la distancia entre las personas y el tiempo registrado por el reloj. Años más tarde, cuando se puso en práctica su idea, no se obtuvieron buenos resultados. Quedó claro que si la luz no se propagaba con velocidad infinita, se propagaba con una velocidad muy grande, que sólo podía medirse utilizando distancias de orden astronómico.



Fig. 36 Experimento propuesto por Galileo para medir la velocidad de la luz.

## El aporte de Römer

Olaus Römer, astrónomo danés, nacido en Aarhus en 1644 y fallecido en Copenhague en 1710, logró demostrar que la velocidad de la luz era finita. Midió cuidadosamente el tiempo que transcurría entre dos eclipses consecutivos de la luna más brillante de Júpiter "Io". Encontró pequeñas variaciones en esta medida. Si la distancia Tierra-Júpiter estaba aumentando, este tiempo era más grande que si esta distancia estaba disminuyendo. En la figura 37 podemos ver una línea de tiempo en la cual aparecen marcados en negro los instantes en que lo debería comenzar a esconderse detrás de Júpiter y en color los instantes en que efectivamente se observó. Las diferencias se deben a que la luz emitida por "Io" demora más en llegar a la Tierra cuando ésta se encuentra más alejada de Júpiter.

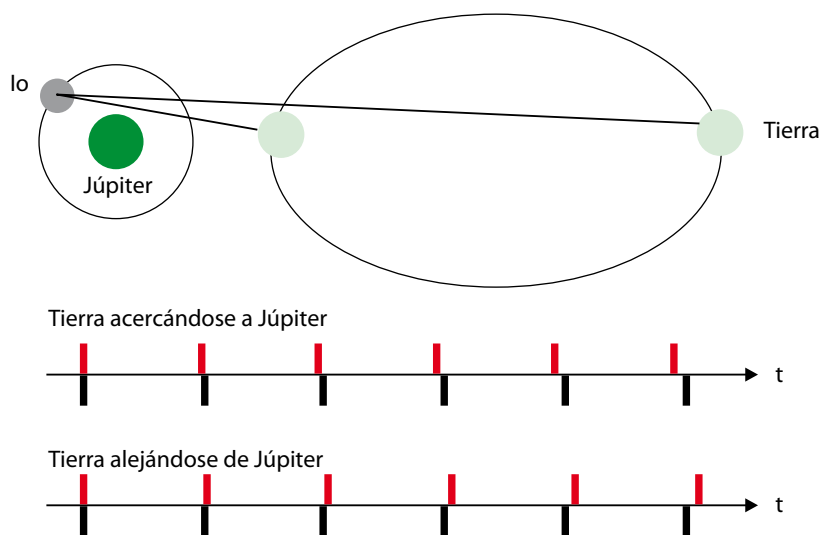


Fig. 37. La luz emitida por "Io" demora más en llegar a la Tierra cuando ésta se encuentra más alejada de Júpiter.

Cálculos posteriores basados en su planteo dieron un valor cercano a los  $220.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  para la velocidad de la luz, un valor próximo al actualmente aceptado.

### Primeras medidas en distancias “cortas”.

Fizeau Armand Hippolyte Louis, físico francés, nacido en París en 1819 y fallecido en Venteuil en 1896. Fue el primero en obtener medidas confiables de la velocidad de la luz realizando experimentos en distancias “cortas” (cerca de 16km) en el año 1849. La parte esencial de su dispositivo era una rueda dentada giratoria (Fig. 38). La luz pasaba por una de las rendijas, se reflejaba en el espejo y en su viaje de vuelta debía pasar por la rendija

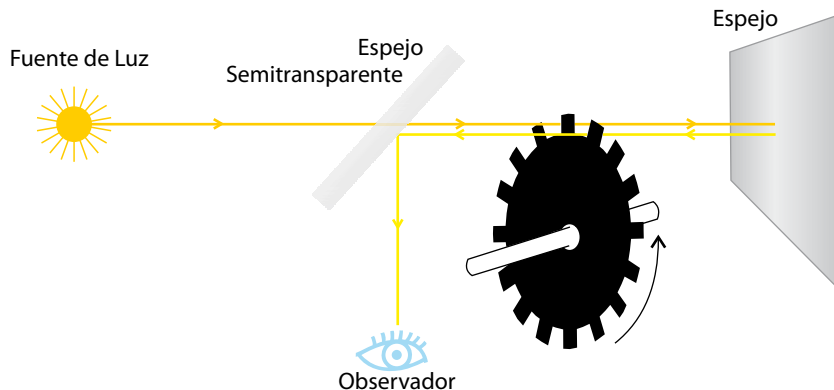


Fig. 38. Rueda dentada de Fizeau.

**La luz recorre  
300.000 Km  
en 1 segundo**

$$c = 3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Si redondeamos la distancia de Montevideo a Rivera en 500 km. La luz realiza **300 viajes de ida y vuelta en 1 segundo.** ¡Qué maravilla!

siguiente para ser observada. Para que esto suceda la rueda dentada debía girar a cierta velocidad (bastante grande, por cierto). Con la distancia de la rueda dentada al espejo y sabiendo la velocidad de giro y la cantidad de rendijas de la rueda, Fizeau obtuvo el valor  $313.000 \frac{Km}{s}$ . El método de Fizeau fue perfeccionado por Cornu, también francés. Posteriormente Jean Bernard Foucault, físico francés nacido en París en 1819 y muerto en 1868, reemplazó el disco dentado por un espejo giratorio obteniendo medidas muy precisas. Michelson Albert Abraham, polaco-americano nacido en Strelno en 1852, muerto en California en 1931, mejoró aún más las medidas, obteniendo en 1932 el resultado de  $2,9977 \times 10^8 \frac{m}{s}$ . El valor aceptado hoy en día es de  $2,997925 \times 10^8 \frac{m}{s}$ .

En nuestro curso utilizaremos  $3,0 \times 10^8 \frac{m}{s}$  si trabajamos con dos cifras significativas o  $3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}$  si trabajamos con tres.

La velocidad de la luz por ser un valor constante y tan importante para la Física, se representa con la letra “c” minúscula.

$$v_{Luz} = c$$

## PREGUNTAS

- 1) Explica con tus palabras qué es un modelo para la ciencia.
- 2) La frase: “La luz se propaga como pequeñas esferitas de goma moviéndose en conjunto cuya velocidad depende del medio en el que se mueven” ¿a qué tipo de modelo corresponde?
- 3) De acuerdo a lo que hemos visto hasta ahora: ¿qué fenómeno relacionado con la luz no puede explicar satisfactoriamente el modelo ondulatorio?

- 4) ¿Qué nacionalidades predominan entre los científicos mencionados en el desarrollo histórico de las teorías sobre la luz? ¿Hay muchos americanos? ¿Por qué te parece que ocurre esto?
- 5) Observaste que todas las imágenes de los científicos son reproducciones de pinturas o esculturas y no fotografías.  
¿A qué atribuyes esto?
- 6) Describe un experimento exitoso para medir la velocidad de propagación de la luz.
- 7) ¿La Tierra es una fuente de luz? Argumenta tu respuesta.
- 8) ¿El sol es una fuente de luz puntual? Argumenta tu respuesta
- 9) Algunos astrónomos dicen que mirando las estrellas lejanas están mirando el pasado del universo, ¿por qué?
- 10) ¿Qué es una zona de sombra? ¿Y de penumbra?
- 11) ¿Por qué la existencia de los eclipses verifica la propagación rectilínea de la luz?. Piensa en otras situaciones cotidianas donde también se verifique.

## PROBLEMAS

- 1) Determina utilizando un diagrama de rayos, la altura de la sombra del cuerpo opaco cuya altura es 20cm (Fig. 39). Considera puntual la fuente de luz. Verifica tus resultados haciendo cálculos.
- 2) Si colocamos un cuadrado opaco entre una lámpara y una pantalla como muestra el dibujo de la figura 40, en esta última aparece la sombra del cuadrado. Explica para cada uno de los siguientes casos qué cambio sufre la sombra.  
Justifica realizando un diagrama de rayos.
  - a. acerco el cuadrado a la lámpara
  - b. alejo el cuadrado de la lámpara
  - c. giro  $60^\circ$  el cuadrado
  - d. giro  $90^\circ$  el cuadrado
  - e. acerco la pantalla al cuadrado
  - f. alejo la pantalla del cuadrado
- 3) Un foco azul y uno rojo iluminan un rectángulo opaco, y la luz se recoge en una pantalla como muestra el dibujo de la figura 41. Determina gráficamente:
  - a) La zona a la que no llegan rayos de luz
  - b) La zona a la que sólo llegan rayos de luz roja
  - c) La zona a la que sólo llegan rayos de luz azul
  - d) La zona a la que llegan rayos de ambos colores.
- 4) Un año luz es una medida de distancia utilizada en Astronomía, y corresponde al recorrido de la luz en un año.  
¿A cuántos metros equivale un año luz?
- 5) Suponiendo que las dos personas en el experimento de Galileo estuvieran ubicadas a 1,60km de distancia. ¿Cuánto demoraría la luz en realizar el viaje de ida y vuelta?

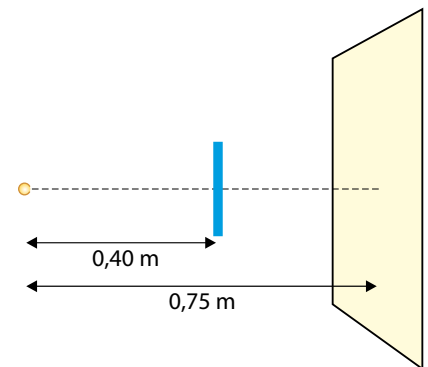


Fig. 39. Problema N° 1.

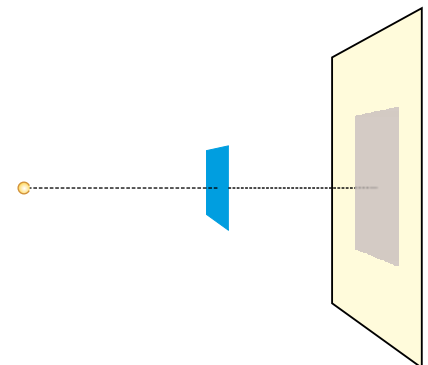


Fig. 40. Problema N° 2.

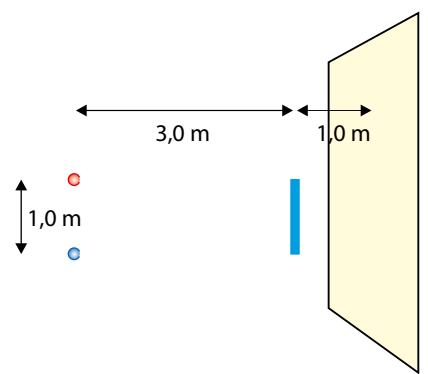


Fig. 41. Problema N° 3.