

Rubén G. Barrera

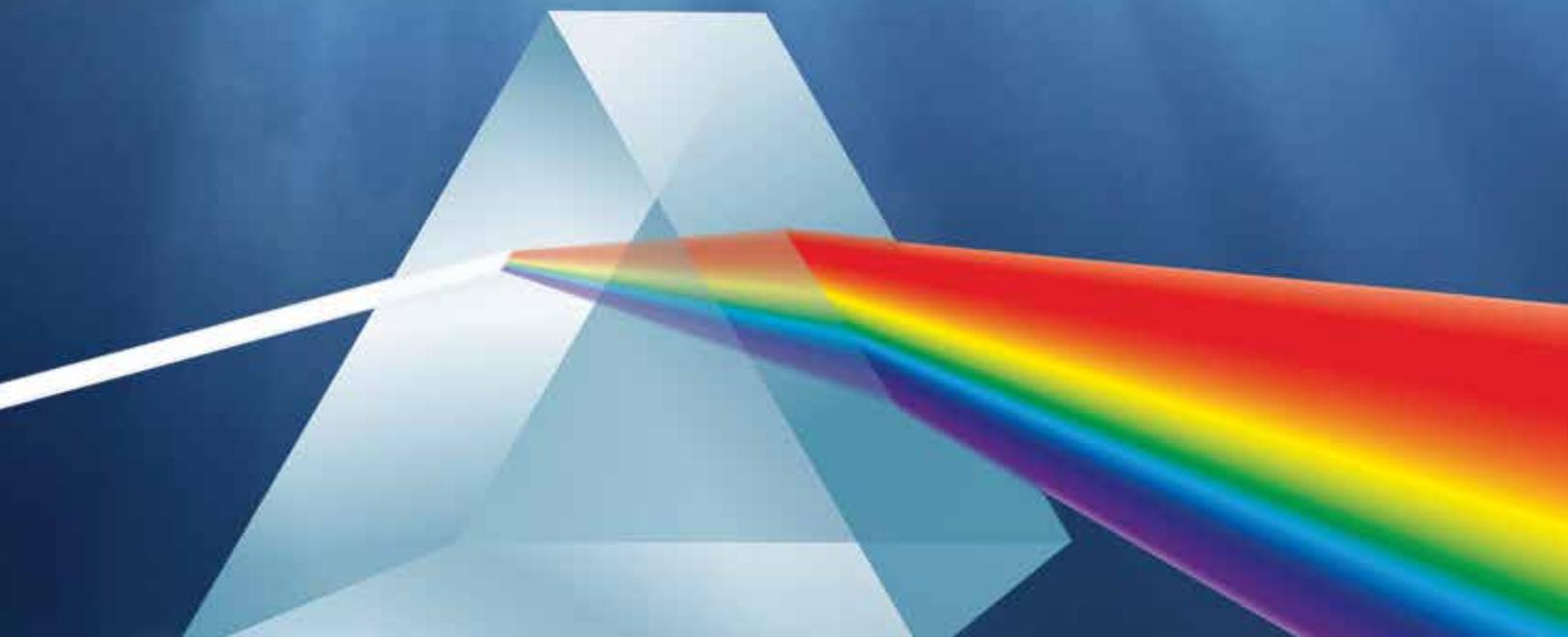


# Los diferentes caminos de la luz

¿Por qué 2015 fue establecido como el Año Internacional de la Luz? ¿Por qué y por quién? Para contestar a estas preguntas haremos primero un breve recorrido histórico por las ideas que se han desarrollado acerca de la naturaleza de la luz y las leyes de la refracción, con el fin de situar en contexto los hechos que han dado lugar a tal celebración.

**S**in duda, uno de los fenómenos físicos más fascinantes y más alusivos es el de la luz y, por consiguiente, una de las preguntas más recurrentes en la historia de la física es: ¿qué es la luz?

Sin embargo, la respuesta a esta pregunta ha trascendido no sólo a la física, sino a la historia misma del conocimiento, y a la luz se le ha adjudicado, en muchas culturas, un origen divino. En la tradición cristiana, la luz aparece en el primer capítulo del Génesis como la primera obra de la creación divina: “Entonces dijo Dios: sea la luz, y la luz se hizo.” Entre los antiguos egipcios, el dios Ra decía: “Yo soy aquel que cuando abro los ojos, hay luz, y cuando los cierro, las







tinieblas caen.” En relación con este origen divino, la luz se identifica también con el orden y la vida, en contraposición a las tinieblas, que simbolizan el caos y la muerte. Pero, a fin de cuentas, ¿qué es la luz?

### ● **Primeras ideas sobre la luz**

Al abrir cualquier libro de historia de la física o cualquier buscador de Internet encontraremos, después de varias referencias a las visiones mitológicas sobre el poder del rayo, sobre la luminosidad del Sol y los astros o sobre el origen de la visión, que los primeros pensamientos acerca de la naturaleza de la luz –dentro de la tradición racional de nuestra cultura– aparecen con los griegos. Esto no es de sorprendernos, ya que la cultura helénica está en la base de toda la tradición filosófica de Occidente.

Así, encontramos, alrededor del año 300 a.n.e., un libro adjudicado a Euclides, titulado, ni más ni menos, *Óptica*. En este libro se hace referencia a la idea de que la luz viaja en línea recta (rayos) y se formulan matemáticamente las leyes de la reflexión de la luz por medio de espejos. Es también muy conocida la leyenda de que el gran Arquímedes, durante el sitio de Siracusa (214-212 a.n.e.), su ciudad natal, utilizó espejos ustorios para quemar las velas de las embarcaciones romanas. Es claro que se requiere un conocimiento certero, tanto de geometría como de las leyes de la reflexión, para diseñar espejos que concentren la luz solar con gran eficiencia. No sabemos si es o no verdad que

estos espejos ustorios fueron capaces de incendiar las velas de las naves enemigas a kilómetros de distancia, pero de lo que sí estamos seguros es de que los fundamentos del fenómeno de reflexión de la luz eran muy bien conocidos.

Ya en el siglo I de nuestra era, Herón de Alejandría fue capaz de deducir las leyes de la reflexión de la luz (la *catóptrica*) imponiendo un principio muy general: la luz viaja siempre en línea recta y para llegar de un punto a otro después de ser reflejada por un espejo, utiliza el camino más corto posible. Este tipo de razonamiento es lo que ahora llamamos una deducción basada en un principio variacional; esto es, algo que va más allá de la observación acuciosa de un fenómeno y enuncia un principio más general, del cual se puede deducir el comportamiento particular de los fenómenos (en este caso, de la reflexión de la luz).

Pero, aparte de su comportamiento frente a los espejos, ¿qué se ha pensado sobre la naturaleza misma de la luz?, ¿de qué “está hecha”?

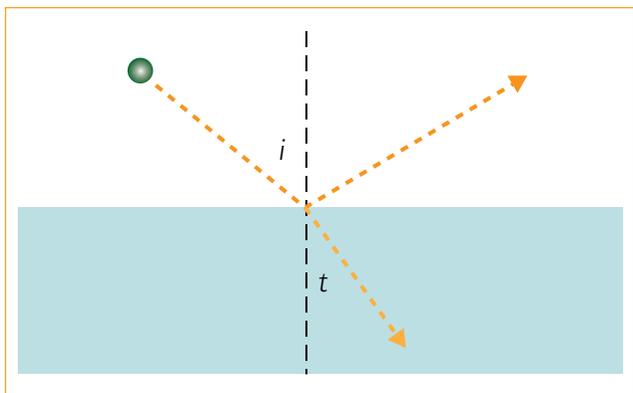
A este respecto, las primeras ideas contemplaban que la luz estaba hecha de algún tipo de partículas que viajaban a gran velocidad y en línea recta. Para Lucrecio, romano del siglo I, eran átomos diminutos; para los filósofos hindúes de los primeros siglos de nuestra era, eran átomos de fuego (*teyas*) capaces de formar moléculas con diferentes arreglos; para los filósofos budistas, eran destellos de “energía”.

### ● **Las leyes de la refracción y el Año Internacional de la Luz**

En el siglo II, Claudio Ptolomeo de Alejandría escribe un libro también intitulado *Óptica*, que trata sobre las leyes de reflexión y refracción de la luz, así como sobre la sensación del color. Ya en el pensamiento helénico la realización sistemática de mediciones y experimentos tiene un lugar importante, y es precisamente Ptolomeo quien hace las primeras mediciones sistemáticas para explicar las leyes de la refracción (la *dióptrica*).

La refracción es el fenómeno por el cual un rayo de luz cambia de dirección cuando atraviesa la interfaz entre dos medios transparentes pero distintos; ejemplos típicos son las interfaces aire-agua, aire-vidrio y vidrio-agua. En la Figura 1 se muestra el arreglo expe-





**Figura 1.** Diagrama que muestra los ángulos de incidencia ( $i$ ) y de refracción o transmisión ( $t$ ) en una interfaz plana aire-agua (azul).

rimental (muy simple) en donde se miden, en grados, los ángulos de incidencia ( $i$ ) y de refracción o transmisión ( $t$ ) para una interfaz plana entre aire y agua. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos por Ptolomeo para  $i$  y para  $t$ , y en la tercera columna, la diferencia entre ellos.

La diferencia entre los resultados obtenidos por Ptolomeo y los valores modernos, aunque cercanos, no se ha atribuido a un error de medición, sino más bien a un error “filosófico”. Como se ve en la tercera columna de la Tabla 1, la diferencia entre  $i$  y  $t$  sigue una serie aritmética, con un valor estético indudable. Se cree que posiblemente los resultados de las mediciones fueron “forzados” para que las diferencias siguieran dicha serie aritmética, bajo el supuesto de que los griegos creían que las leyes de la naturaleza debían seguir a la belleza y armonía de las leyes matemáticas. Si esto es o no cierto, nunca sabremos. Lo que sí sabemos es que, exactas o no, éstas fueron las primeras mediciones de las leyes de la refracción.

En los libros de historia de la ciencia comúnmente se pasa de los logros del pensamiento helénico a los logros del pensamiento europeo posterior a la Edad Media, dominada ésta por una concepción cristiana del mundo. En particular, con relación a las leyes de la refracción, la siguiente referencia usual es el primer discurso sobre la luz, llamado precisamente *Dióptrica*, en el conocido libro de René Descartes *El discurso del método*, publicado en 1637; y la otra mención es sobre los experimentos de Willebrord Snel van Royen, quien en 1621 reproduce las mediciones de Ptolomeo con

**Tabla 1.** Valores obtenidos por Claudio Ptolomeo. Los ángulos están en grados.

| Aire<br>$\angle i$ | Agua<br>$\angle t$ | Diferencias    |
|--------------------|--------------------|----------------|
| 10                 | 8                  | $7\frac{1}{2}$ |
| 20                 | $15\frac{1}{2}$    | 7              |
| 30                 | $22\frac{1}{2}$    | $6\frac{1}{2}$ |
| 40                 | 29                 | 6              |
| 50                 | 35                 | $5\frac{1}{2}$ |
| 60                 | $40\frac{1}{2}$    | 5              |
| 70                 | $45\frac{1}{2}$    | $4\frac{1}{2}$ |
| 80                 | 50                 |                |

mucha más precisión, y con sus resultados formula una ley experimental.

Considerando que la luz se comporta como partículas que rebotan del –y atraviesan el– medio transparente, pero que éstas conservan su “cantidad de movimiento”, Descartes deduce una fórmula matemática en términos de la función trigonométrica seno. Establece que el cociente del seno del ángulo  $i$  entre el seno del ángulo  $t$ , es igual al cociente de la refrangibilidad de los dos medios que componen la interfaz. Sobre los conceptos de *cantidad de movimiento* y *refrangibilidad* utilizados en el siglo XVII no voy a profundizar, sino que simplemente referiré que a esta ley de la refracción también se le llama ley de los senos, y es la misma que usamos actualmente, sólo que en lugar de la refrangibilidad está formulada en términos de otro concepto llamado índice de refracción.

Aunque las mediciones de Snell fueron realizadas en 1621 y se anticiparon a las predicciones de la ley de los senos formulada por Descartes, éstas no fueron publicadas sino hasta 1678 en el *Traité de la lumière*, de Christiaan Huygens. En la actualidad, a ésta se le conoce como la ley de Snell (con dos eles); sin embargo, cuando uno imparte un seminario en Francia y se refiere a la ley de Snell, enseguida alguien lo corrige diciendo que ahí a esa ley la conocen con el nombre de Snell-Descartes...; y uno, respetuoso de las costumbres locales, continúa con el seminario refiriéndose entonces a la ley de Snell-Descartes.

Es en este punto donde la Unesco ha querido resarcir a científicos olvidados, o tal vez ignorados, en la



historia de la óptica. Simplemente no se puede pasar de Ptolomeo a Descartes así como así. Existe en el periodo entre estos dos reconocidos personajes toda una pléyade de científicos y pensadores, y en especial de científicos dedicados a la óptica, cuyos logros florecieron en el seno de una cultura diferente a la europea, y quienes realizaron contribuciones tan importantes y tan sólidas que muchos de sus escritos fueron traducidos al latín y se publicaron y leyeron en la Europa posrenacentista. Sin embargo, estas contribuciones han pasado inadvertidas en nuestra “historia de la ciencia” y la Unesco ha creído –como nosotros lo creemos también– que es conveniente celebrar el primer milenio

de la aparición del primer gran tratado sobre óptica, publicado alrededor del año 1015: un libro en siete volúmenes, escrito durante la llamada Edad de Oro de la civilización musulmana (véase Recuadro 1). Es esta celebración la que ha dado lugar al Año Internacional de la Luz (2015), que en su presentación (en traducción mía) dice lo siguiente:

El año 2015 marca el milésimo aniversario de la aparición del notable tratado de óptica en siete volúmenes *Kitāb al Manāẓir*, escrito por el hombre de ciencia árabe Ibn al Hayzam, nacido hace unos mil años en lo que hoy es Irak. Al Hayzam (conocido en Occidente por la forma

### Recuadro 1. La Edad de Oro de la civilización musulmana

Ala muerte del profeta Mahoma, acaecida en el 632, el destino del mundo islámico queda en manos de los llamados Califas Ortodoxos o Perfectos: Abu Bakr, Umar Ibn alJattab, Uzmán Ibn Affan y Ali Ibn Talib. En realidad, después de la muerte de Mahoma se desata una cruenta lucha por el poder, como lo muestra el hecho de que estos cuatro califas fueron asesinados. Sin embargo, habían logrado controlar toda la Península Arábiga, Persia y Medio Oriente.

Alrededor del año 661 se establece en Damasco la dinastía de los Omeya, quienes extienden el imperio por el Oriente hasta la frontera con la India, y por el Occidente hasta España. Su avance por Europa es detenido por la derrota en la batalla de Poitiers en 732, y su hegemonía termina alrededor del año 750, cuando el control pasa a la llamada dinastía de los Abasí, con residencia en Bagdad. Pero ya para el 830 el imperio se encuentra fragmentado en varios califatos con diversos grados de independencia, y así, en 930, con los Abasí en el poder, el último Omeya se traslada a al Ándalus, donde se arroga el título de emir. Sus descendientes se separan de Bagdad y crean un califato independiente, con residencia en Córdoba.

A principios de 946 los Buyida, provenientes del norte de Irán, conquistan Bagdad, y no es sino hasta 1055 que los turcos selyúcidas expulsan a los Buyida y se alían con los Abasí para compartir el poder sobre la región. Finalmente, en 1157 los Abasí expulsan a los turcos selyúcidas y recuperan el control total del califato de Bagdad. Un par de hechos relevantes suceden en este periodo: el inicio de las cruzadas en 1095 y la

destrucción de Bagdad por parte de los mongoles en 1258, lo que tradicionalmente se considera como el final de la Edad de Oro.

La dinastía Abasí se desarrolla en un periodo de colonización y expansión, durante el cual se crea una brillante civilización con un comercio próspero y florecen la arquitectura y las artes. Sólo nos basta recordar las narraciones sobre el esplendor de Bagdad en el clásico libro *Las mil y una noches*. Hay también una gran actividad en la vida intelectual de la comunidad, preferentemente en historia, literatura, geografía, medicina, y muy especialmente en matemáticas. Existe un gran interés por traducir a los clásicos griegos e hindúes. Muchas de estas traducciones las realizan nestorianos y cristianos jacobitas, del griego o del sánscrito al sirio, y después del sirio al árabe. El apoyo cabal a la actividad intelectual se puede apreciar por un par de hechos aislados: el califa al Mansur (754-775) funda la gran Biblioteca Persa en Bagdad, y el califa al Mamun (813-833) funda la Bayt al Hikma (casa del saber), que cobijaba a los grandes maestros musulmanes y tenía como parte de su misión la traducción de textos clásicos y la preservación de los libros traducidos. Se tenían traducciones al persa y al árabe de los textos de Pitágoras y Euclides, de Platón y Aristóteles, así como de los clásicos hindúes Aryabhata y Brahmagupta, entre muchos más. Con relación al cultivo de las matemáticas, en esta disciplina se dieron importantes avances en álgebra, geometría y trigonometría.

latinizada de su nombre “Alahzen”) fue un pionero del pensamiento científico que hizo contribuciones importantes al entendimiento de la visión, la óptica y la luz.

Su metodología de investigación, en particular mediante el uso del experimento para verificar la teoría, muestra ciertas similitudes con lo que más tarde se ha dado por llamar el moderno método científico. A través de su *Libro de óptica* (*Kitāb al Manāẓir*) y su traducción latina (*De Aspectibus*), sus ideas influenciaron a los eruditos europeos, incluidos los del Renacimiento en Europa. Actualmente, muchos lo consideran una figura esencial en la historia de la óptica y “el padre de la óptica moderna”.

Ibn al Hayzam nació durante el periodo creativo conocido como la Edad de Oro de la civilización musulmana, que proveyó muchos avances fascinantes en ciencia, tecnología y medicina. En una región que se extendía desde España hasta China, hombres y mujeres de pensamiento original, de diferentes creencias y culturas, apoyados en los conocimientos de grandes civilizaciones antiguas, hicieron descubrimientos que tuvieron un enorme, y muchas veces no apreciado, impacto en nuestro mundo.

Así, uno de los objetivos es revalorar y poner en un contexto actual las importantes contribuciones a la óptica realizadas por los pensadores musulmanes en un periodo que para muchos comprende del siglo VIII al XIII.

El programa del Año Internacional de la Luz (2015) se inaugura en París el 19 de enero de 2015, con la asistencia de personalidades del mundo de la ciencia, la política y la cultura. Su propuesta:

[...] un conjunto de actividades, tanto a nivel regional y nacional como internacional, planeadas para que la gente de todas las edades y preparaciones pueda apreciar el papel central de la luz en la ciencia y la cultura, y también el estudio de la luz como una transdisciplina que puede ayudar en el avance hacia un desarrollo sustentable.

### ¿Quién fue Alahzen?

El personaje detrás del Año Internacional de la Luz, Ibn al Hayzam (محيي الدين) o Alahzen (en su forma latinizada), aparece en el billete de 10 dinares de Irak y en otras imágenes parecidas en los timbres postales

de algunos países árabes (véase la Figura 2). Es claro que Alahzen es una figura central en el Islam por sus aportaciones a la ciencia. Es más, se podría decir que es el primero que utiliza la metodología de la ciencia moderna, en relación con el diseño de experimentos para validar los modelos de la naturaleza expresados en lenguaje matemático. En cierto sentido, él introduce la concepción y la metodología de la ciencia moderna varios siglos antes que Galileo, considerado por nosotros (los occidentales) como el padre de la ciencia.

Pero, bien a bien, ¿quién fue Alahzen y cuáles fueron sus aportaciones al conocimiento universal? Para los lectores ávidos de mayor información, al final de este artículo referiremos a algunos libros que abordan su obra científica con mayor amplitud.

Alahzen nace en 965 en el emirato de Buyid (Irak) y llega a El Cairo durante el mando del califa fatimida al Hakim. Alahzen, quien gozaba ya de un prestigio de hombre sabio, le propone al califa un gran proyecto hidráulico para controlar las crecidas del río Nilo.

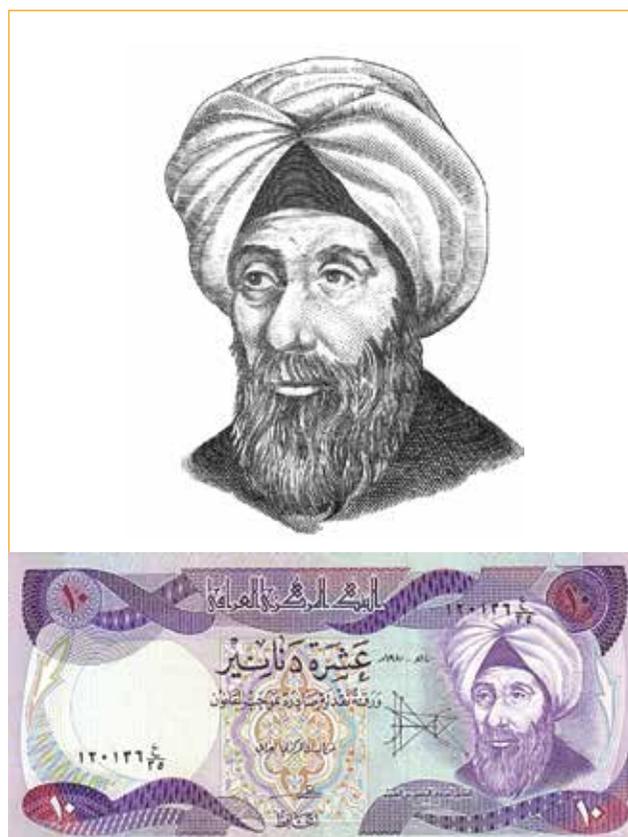


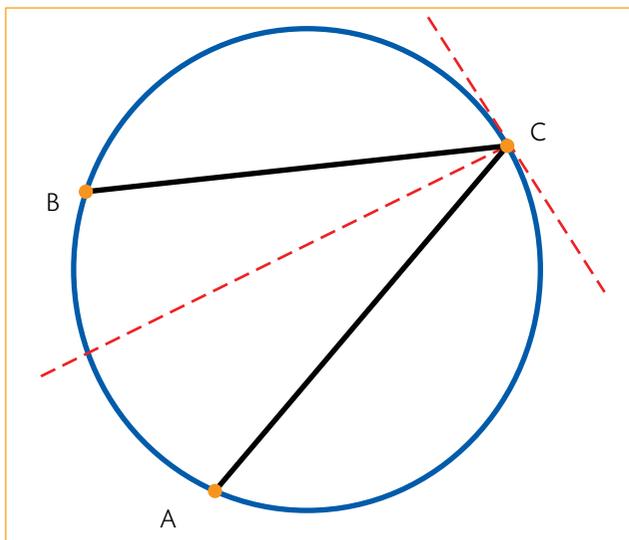
Figura 2. Un dibujo del rostro de Alahzen aparece en los billetes de 10 dinares en Irak.



Cuando finalmente obtiene la aprobación, Alahzen examina con más cuidado el proyecto, en exploraciones de campo, y se da cuenta de las grandes dificultades que conlleva la construcción de una presa en el lugar donde actualmente se encuentra la presa de Aswan. Concluye que es imposible llevarla a cabo; pero teme comunicarle esto al califa y provocar su ira, ya que al Hakim gozaba de una bien ganada fama de ser cruel y desalmado. Cuenta la leyenda que ante tal situación, Alahzen decide aparentar un desequilibrio mental y es puesto bajo custodia domiciliaria (1011-1021) hasta la muerte del califa. En este periodo escribe su connotado *Libro de óptica* (~1015), así como otros tratados sobre astronomía, geometría, teoría de números y filosofía natural. Continúa viviendo en El Cairo, cerca de la famosa Universidad de Al Azhar, hasta su muerte en 1040.

### El problema de Alahzen

Es difícil mostrar en unas cuantas líneas la profundidad del pensamiento de Alahzen, por lo que presentaremos sólo un problema propuesto y resuelto por él. “El problema de Alahzen” aparece, junto a los seis lemas que él mismo expuso para resolverlo en toda su generalidad, en el volumen V de su *Libro de óptica*. Su obra contiene una larga serie de investigaciones acerca de la formación de imágenes especulares.

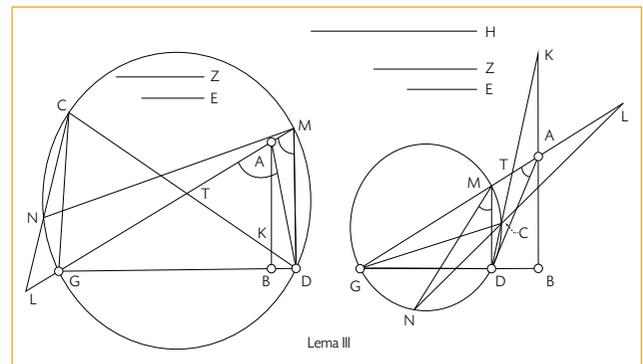


**Figura 3.** “El problema de Alahzen”. Dados el punto A (objeto) y B (observador) encontrar el punto C correspondiente al punto de reflexión de un rayo de luz que saliera de A para llegar a B después de reflejarse en C.

El problema se plantea en cómo encontrar el punto de reflexión sobre la superficie de un espejo esférico, cóncavo o convexo, dados dos puntos relacionados como observador y objeto. Para ilustrarlo, hacemos referencia a la Figura 3, en donde se muestra el corte de una esfera (espejo cóncavo), y los puntos A (objeto) y B (observador). El problema consiste en encontrar el punto C, correspondiente al punto de reflexión de un rayo de luz que saliera de A para llegar a B después de reflejarse en C.

La solución dada por Alahzen está tratada con todo detalle en el artículo “Ibn al-Haytham’s lemmas for solving ‘Alahzen’s problem’” (Sabra, 1982) (Figura 4). Es pertinente apuntar que existe una traducción anónima al latín de los siete volúmenes del *Libro de óptica* de Alahzen, intitulada *De Aspectibus*, que probablemente fue realizada a finales del siglo XII o a principios del XIII. Posteriormente, en 1572, Friederich Richner imprime y publica en Basilea: *Opticae Thesaurus: Alhazeni Arabis libri septem, nunc primum editi. Eiusdem liber De Crepusculis et nubium ascensionibus*; que traducido al español sería: *Tesoro en óptica: los siete libros del árabe Alahzen publicados por primera vez. El libro de los atardeceres, las nubes y las ascensiones*.

Cuando este libro cae en manos del célebre físico holandés Christiaan Huygens, creador e impulsor de la teoría ondulatoria de la luz, analiza con cuidado tanto el problema como su solución, y encuentra que la propuesta de Alahzen le resulta “demasiado larga y tediosa” (*longa admodum ac tediosa*). Huygens toma como reto encontrar una solución más compacta utilizando todas las herramientas que le brindaban sus sólidos conoci-



**Figura 4.** Dibujo que aparece en el lema III, en la solución al “problema de Alahzen”. A partir de Sabra, 1982.



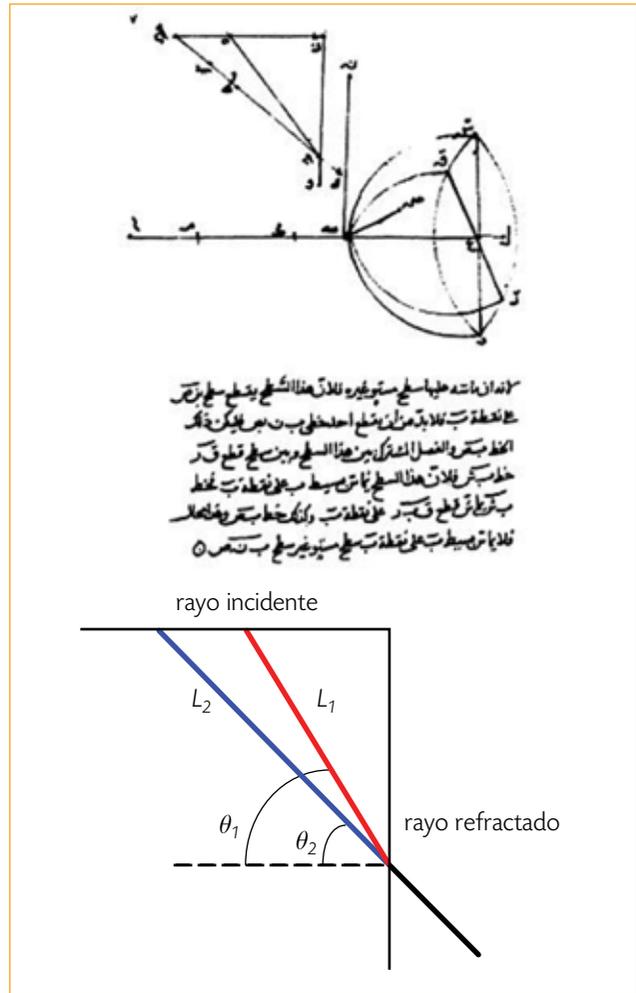
Portada del *Opticae Thesaurus*.

mientos de álgebra moderna y de geometría analítica. En 1669 propone una solución que no le satisface por completo pero, finalmente, tres años después, produce una solución elegante y compacta que lo deja enteramente satisfecho.

Aunque “demasiado larga y tediosa”, es indudable que la solución encontrada por Alahzen representa uno de los logros más significativos de la geometría árabe. Por otro lado, es importante hacer notar que la solución encontrada por Huygens, aunque más compacta y elegante, está basada en la misma idea que siguió Alahzen 600 años antes: la intersección de un círculo con una hipérbola.

### Ibn Sahal

Pero volviendo a la ley de la refracción –la ley de Snell-Descartes–, podríamos pensar que con todos los avances en los fundamentos y las aplicaciones de la óptica en la Edad de Oro musulmana, los principios de esta ley ya debieron, en ese entonces, de haber sido establecidos. Y así fue. En el libro *Kitāb al Harraqāt*, *El libro sobre los instrumentos incendiarios* (sobre espejos ustorios y lentes), escrito por Ibn Sahal en el año 984,



**Figura 5.** Copia de una página de *Kitāb al Harraqāt*. A la derecha: diagrama de una lente parabólica; a la izquierda: un triángulo con dos líneas, que representan el rayo incidente y el rayo refractado.

aparece ya la ley de la refracción, aunque no explícitamente ni en términos de la función trigonométrica seno (en árabe, *jiab*).

En la Figura 5 se muestra una página de este libro donde aparece, arriba del texto en árabe, del lado derecho, un diagrama de una lente parabólica, y del lado izquierdo un triángulo con dos líneas, que representan el rayo incidente ( $L_1$ ) y el rayo refractado ( $L_2$ ). El cociente de  $L_1/L_2$  corresponde al cociente del seno del ángulo de refracción  $\theta_2$  sobre el seno del ángulo de incidencia  $\theta_1$ , que es la forma de la ley de la refracción tal y como la conocemos ahora.

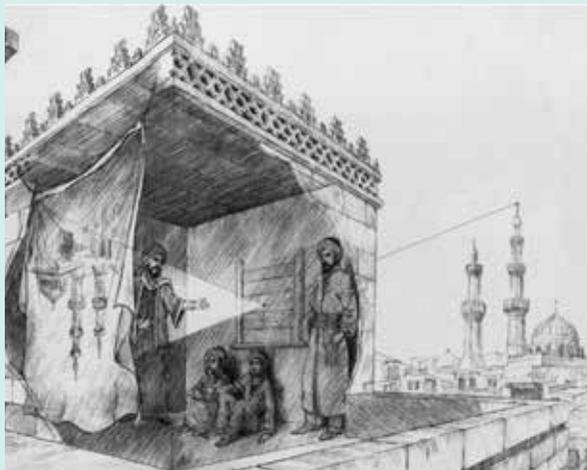
El libro de Ibn Sahal trata sobre espejos ustorios –espejos quemantes– y sobre lentes gruesas. En especial, sobre el diseño de lentes sin aberraciones esféricas.



## Recuadro 2. El principio de la visión

Otro de los muchos logros de Alahzen fue el descubrimiento de la *camera oscura*. Este fenómeno se produce cuando al interior de un cuarto oscuro, la luz penetra por un pequeño orificio o rendija y en la pared se proyecta la imagen invertida de lo que está afuera. Éste es el principio de la cámara fotográfica. Algunos de nosotros todavía recordamos las llamadas “cámaras de cajón” que no eran otra cosa que una *camera oscura* con una lente muy simple y un rollo de papel fotográfico.

Sin embargo, aunque en El Cairo del siglo x esto no inspiró el desarrollo de la fotografía, sí dio lugar a una mejor comprensión del fenómeno de la visión: se reconoció que el ojo humano era una especie de *camera oscura* y que la visión se producía cuando la luz que entraba por la pupila se proyectaba en el fondo del ojo, y esta imagen era interpretada “de algún modo” por el cerebro.



Cabe señalar que este modelo de la visión se contraponía a la creencia, ya desde la antigua Grecia, que de los ojos salían rayos que al interferir con las cosas daban la impresión de “ver”. Algo parecido a la visión de rayos x de Superman, cuando de sus ojos salían unos “rayos” que le permitían ver a través de los objetos. En cambio, el efecto de *camera oscura*, descubierto por Alahzen, dio pie a la elaboración de un modelo más realista de la visión.

cas. En una lente esférica sólo los rayos que pasan muy cercanos al centro de la lente (rayos paraxiales) se enfocan en un punto (el foco); los que pasan más alejados del centro ya no se enfocan ahí, sino en toda una región alrededor. Esto provoca que las imágenes que se forman, al pasar la luz por la lente, ya no se vean del todo nítidas, y a esto se le llama aberración esférica. El efecto se puede eliminar, en cierta medida, con lentes de forma no esférica, como las lentes parabólicas. Basta con ver los diagramas de rayos a través de complejos sistemas de lentes que aparecen en este libro de Ibn Sahal (véase la Figura 6) para convencerse de que esto sería prácticamente imposible si no se tuviera un conocimiento vasto y un manejo hábil de la ley de la refracción.

Si algún día nos invitan a Bagdad o a El Cairo para impartir un seminario de óptica, hay que estar preparados para en vez de decir la ley de Snell-Descartes, referirnos a la ley de Ibn Sahal-Snell-Descartes; y aun si no nos invitan, referirnos a ella en nuestras clases con esos tres nombres..., aunque resulte un poco largo.

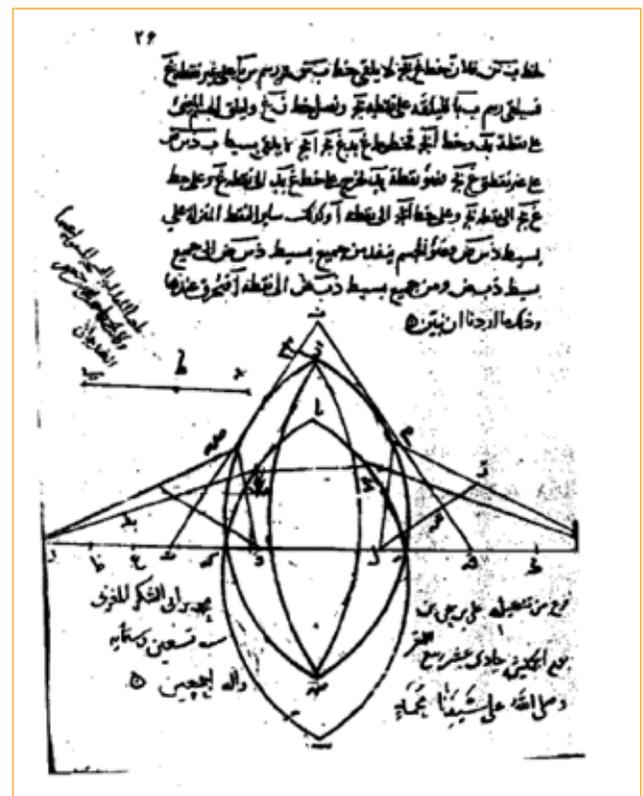


Figura 6. Otra página de *Kitāb al Harraqāt* en donde aparece un diagrama de rayos de un complejo sistema de lentes.

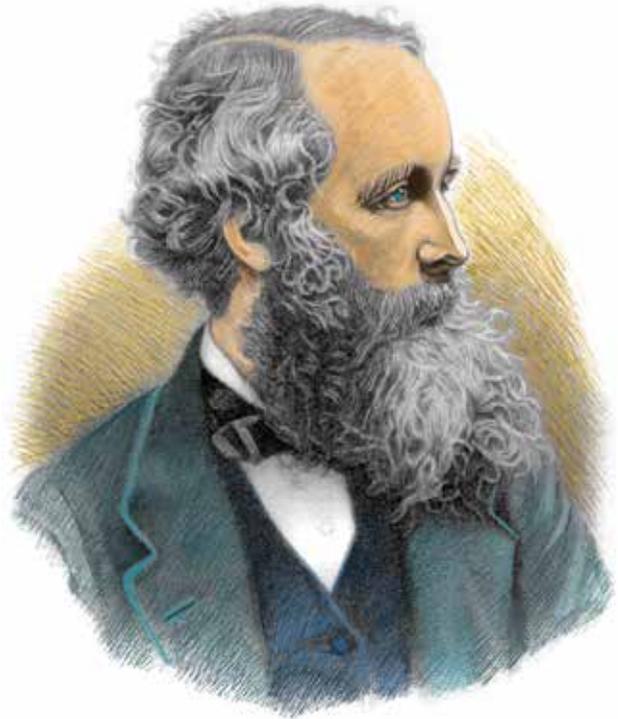
## El índice de refracción

A continuación dejaremos el mundo islámico y presentaremos la forma moderna que toma la ley de la refracción, en términos de un concepto que resulta fundamental y central en el estudio de la interacción de la luz con la materia: el índice de refracción. Antes de que se introdujera este concepto, el poder refractor de una sustancia era dado en términos comparativos con el de otra sustancia –refiriéndose a la razón del seno del ángulo de incidencia sobre el seno del ángulo de refracción–. Así, Isaac Newton se refería al poder refractor del agua con relación al del aire como 529 a 396, mientras que James Hutton lo expresaba como 1.3358 a 1. Fue Thomas Young, alrededor del año 1807, quien introdujo el índice de refracción como un sólo número que expresaba el cociente de la velocidad de la luz en el vacío sobre la velocidad de la luz en el medio correspondiente (por tradición, éste se denota con la letra  $n$ ). Para el agua, este cociente resulta ser 1.3358, aproximadamente.

Con esta definición, la ley de refracción del medio 1 al medio 2 se puede expresar matemáticamente:  $n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$ , en donde  $n_1$  y  $n_2$  denotan los índices de refracción del medio 1 y 2, respectivamente, mientras que  $\theta_1$  y  $\theta_2$  corresponden a los ángulos de incidencia y de refracción. Ésta es la forma como se maneja la ley de refracción en la actualidad. Cabe mencionar que Pierre Fermat también hizo una deducción de esta ley en 1657, pero de una manera muy diferente, pues introdujo un principio muy general sobre el comportamiento de la luz: para llegar de un punto a otro, la luz toma el camino que le lleve el menor tiempo posible (nótese que no es el camino más corto, sino el más rápido).

Aquí terminaríamos nuestro relato sobre la ley de la refracción; sin embargo, el significado físico del índice de refracción toma un cariz extremadamente interesante cuando se le mira, como lo vio James Clerk Maxwell, desde la cumbre conceptual del electromagnetismo clásico.

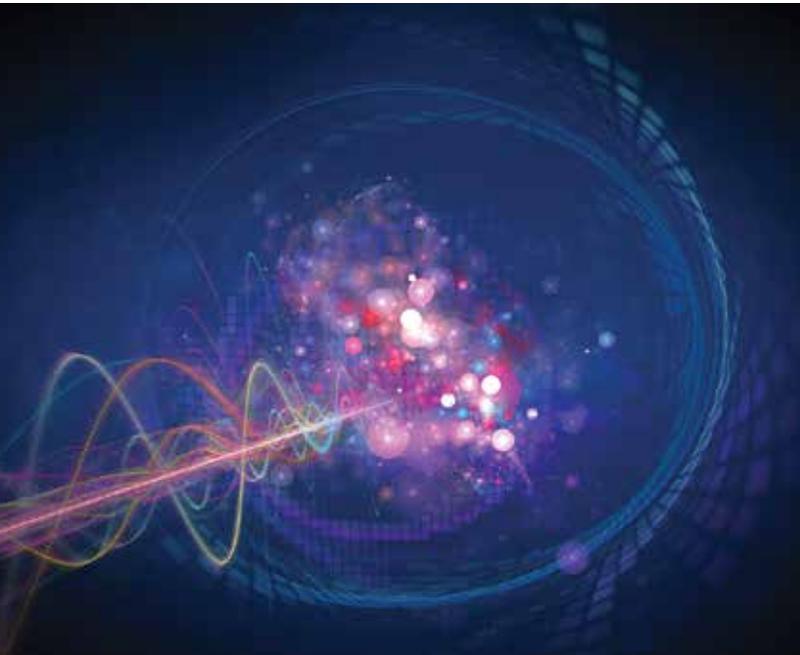
Inspirado en las ideas de Michael Faraday, el físico escocés James Clerk Maxwell construyó una teoría matemática acerca de las fuerzas eléctricas y magnéticas entre cargas y corrientes eléctricas. Faraday pensaba que estas fuerzas se transmitían a través del espacio, “llenando” todo el espacio y con una dinámica pro-



James Clerk Maxwell.

pia. A esto fue lo que llamó el “campo”, y así el campo eléctrico y el campo magnético eran los portadores de las fuerzas que se transmitían a través del espacio; la dirección que las fuerzas trazaban en el espacio eran llamadas líneas de campo (las líneas del campo eléctrico y las líneas del campo magnético). El medio a través del cual se transmitían los campos eléctrico y magnético era un medio material que llenaba todo el espacio y tenía propiedades tan extrañas que no correspondían a ningún material conocido; fue llamado el éter electromagnético y debía ser, a la vez, lo suficientemente sutil para que los cuerpos materiales pasaran a través de él sin encontrar resistencia alguna.

La existencia de medios hipotéticos con propiedades especiales no encontradas en la materia conocida ha sido algunas veces propuesta para “explicar” el comportamiento de un cierto fenómeno físico. Esto no debe extrañarnos; por ejemplo, recordemos al calórico, propuesto como un fluido especial para explicar la transmisión del calor; y para no llegar más lejos, actualmente tenemos a la materia oscura como una propuesta de materia intrínsecamente neutra, necesaria para explicar la dinámica de las galaxias.



Pues bien, desde el punto de vista de la teoría electromagnética, tal y como era concebida por el propio Maxwell, la luz no es otra cosa que una onda electromagnética, es decir, un onda compuesta por campos eléctricos y magnéticos, misma que está oscilando en sincronía y viajando a través del éter electromagnético (o éter luminífero, nombre adscrito al medio a través del cual viajaba la luz). Estos campos de fuerzas, al viajar a través de la materia, interaccionaban con ella: el campo eléctrico iba “polarizando” la materia, es decir, separando las cargas positivas de las negativas; el campo magnético iba “magnetizando” la materia; esto es, alineando –entre otras cosas– la orientación de las corrientes moleculares. Como consecuencia, la velocidad de la luz dependía de la capacidad de polarización o magnetización de la materia en cuestión; a mayor capacidad menor velocidad. Ahora bien, dado que el éter era considerado una sustancia material, estos efectos de polarización y magnetización deberían también existir en él, lo que implicaba que la luz tuviera una velocidad finita de propagación. Por otro lado, cuando la luz atravesaba la materia, estos efectos de polarización y magnetización resultaban ser mucho más pronunciados que en el éter y, en consecuencia, su velocidad de propagación era menor. Dado que el índice de refracción fue definido como el cociente de la velocidad

de la luz en el vacío (en el éter) sobre la velocidad de la luz en el medio material, Maxwell pudo demostrar que el índice de refracción estaba relacionado con la capacidad de polarización y de magnetización de la materia. Con  $\epsilon_r$  denotó la capacidad de polarización de un material dado relativa a la del vacío, y con  $\mu_r$ , la correspondiente capacidad relativa de magnetización. Maxwell mostró que existía una relación entre el índice de refracción ( $n$ ) y las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia. Esa relación podía expresarse matemáticamente como:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Según un amigo mío (Peter Halevi), esta ecuación es la más importante de toda la física, porque en una simple relación entre tres letras –dos griegas y una latina– se encuentra encerrada la unificación conceptual entre la óptica (la  $n$ ), la electricidad (la  $\epsilon_r$ ) y el magnetismo (la  $\mu_r$ )... ni más ni menos.

Con esta relación entre la velocidad de propagación de la luz y las propiedades eléctricas y magnéticas del medio en que se propaga, cuando se aplica al éter se puede predecir la velocidad de la luz en el vacío; y fue esta predicción –que resultaba ser asombrosamente cercana a las mediciones conocidas de la velocidad de la luz– la que llevó a Maxwell a afirmar, sin lugar a duda, que la luz era una onda electromagnética. Este descubrimiento es, también sin lugar a duda, uno de los más importantes y más profundos en toda la historia de la física; y con esta relación entre el índice de refracción y las propiedades electromagnéticas de la materia terminamos nuestra excursión a lo largo de las ideas que han explicado uno de los conceptos fundamentales en la interacción luz-materia: el índice de refracción.

Tal vez sea pertinente agregar que tuvieron que pasar más de 20 años para que la teoría electromagnética concebida por Maxwell fuera comprendida y utilizada por la comunidad de físicos de la época. Esto se debió esencialmente a la labor consistente, imaginativa e insistente de los llamados maxwellianos: Oliver Heaviside, Oliver Lodge, George F. Fitzgerald y Heinrich Hertz. El último diseñó un ingenioso experimento que le permitió detectar, por primera vez, las ondas electromagnéticas; mientras que el primero inventó el cálculo

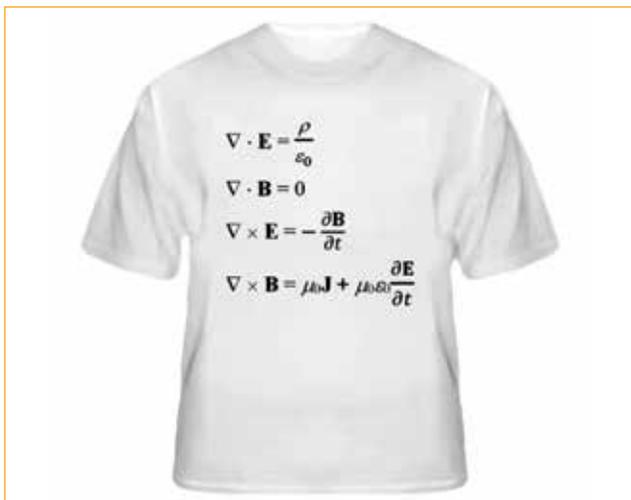


Figura 7. Playera con las ecuaciones de Maxwell.

vectorial, con lo que escribió, por primera vez, las 20 ecuaciones de Maxwell en forma compacta como las cuatro ecuaciones que conocemos ahora, y que son tan populares que aparecen incluso hasta en las playeras de los estudiantes (véase la Figura 7).

**Rubén G. Barrera** es investigador emérito del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y del Sistema Nacional de Investigadores. Estudió física en la Facultad de Ciencias de la UNAM y obtuvo su maestría y doctorado en física en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Después de realizar una estancia posdoctoral en Alemania, se incorporó al Instituto de Física, en donde ha realizado investigación de manera continua en el tema de propiedades ópticas de la materia. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Su trabajo de investigación ha sido reconocido en múltiples ocasiones. Entre otros, recibió el Premio Nacional de Ciencias y Artes otorgado por la presidencia de la República y el Premio Universidad Nacional otorgado por la UNAM. Es *Fellow* de la American Physical Society (Estados Unidos) y del Physics Institute (Reino Unido).

rbarrera@fisica.unam.mx



### Para saber más

- El relato sobre “la vida y el trabajo de un devoto musulmán, que estableció la primera ley del movimiento –muchos años antes que Galileo– y cuyos experimentos con luz fueron examinados, más tarde, por Newton”, según reseña la casa editorial, se encuentra en el libro: Steffens, Bradley (2006), *Ibn Al-haytham: First Scientist*, Greensboro, Morgan Reynolds Publishing (*Profiles in Science*).
- George Saliba asevera que, contrario a la visión generalmente aceptada, los fundamentos del pensamiento científico islámico fueron fincados mucho antes de que las fuentes del pensamiento griego fueran formalmente traducidas al árabe en el siglo IX. A este respecto, podemos leer: Saliba, George (2011), *Islamic Science and the Making of the European Renaissance*, Cambridge, MIT Press (*Transformations: Studies in the History of Science and Technology*).
- Un texto más ligero y de carácter mucho más general es: Al-Khalili, Jim (2012), *The Pathfinders. The Golden Age of Arabic Science*, Londres, Penguin Books Ltd. Sobre este libro, en el periódico inglés *The Guardian* aparece el siguiente comentario: “vuelven a la vida las efervescentes invenciones y la deliciosa curiosidad del mundo islámico”.
- La solución dada por Alahzen al problema propuesto por él está tratada con todo detalle en: Sabra, A. I. (1982), “Ibn al-Haytham’s lemmas for solving ‘Alahzen’s problem’”, *Archive for History of Exact Sciences*, 26(4):299-324.s