

UNA PROPUESTA DE UTILIZACIÓN DE LA HISTORIA DE LA CIENCIA EN LA ENSEÑANZA DE UN TEMA DE FÍSICA

IPARRAGUIRRE, LORENZO MARCOS

Facultad de Matemática Astronomía y Física (FaMAF). Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. Argentina.
ipa@famaf.unc.edu.ar

Resumen. Este artículo describe el proceso para elaborar una propuesta orientada a mejorar la enseñanza de temas de óptica en nivel medio, basada en la creencia de que es necesario desarrollar una metodología esencialmente activa en la cual se introduzcan problematizaciones y cuestionamientos, y de que la historia puede brindar muchos elementos útiles para ello. El proceso conduce al desarrollo de una propuesta de esas características metodológicas que adopta la historia como hilo conductor.

A lo largo del trabajo se comentan e ilustran los problemas más graves de la enseñanza tradicional de la óptica, algunos caminos para superarlos, y la forma en que puede utilizarse la historia para ello.

Palabras clave. Historia de la óptica, refracción, Snell, enseñanza de la física, luz.

A proposal to teach a physics subject using the history of science

Summary. This article describes the analysis of the possibilities to improve the teaching of optics subjects at middle school, based upon the belief in the need to develop an essentially active methodology which includes problematizations and questionings, and in the fact that history may provide very useful elements for this. The process points to the development of a proposal with these characteristics and with history as a central thread.

Throughout the work, the most serious problems of the traditional teaching of optics, some ways of overcoming them, and the way that history may be used are pointed out and illustrated.

Keywords. History of optics, refraction, Snell, physics teaching, light.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la historia de la ciencia puede ser un instrumento importante para mejorar la enseñanza de la ciencia, aunque existen distintas opiniones no sólo acerca de cómo se debe utilizar, sino aun si es que debe hacerse (Matthews, 1994; Solbes y Traver, 1996 y 2001). A pesar de las posibles controversias, es claro que en tanto se considere positivo plantear cierto grado de problematización de los temas para su

enseñanza, la historia de la ciencia constituye una especie de sitio ideal en el que es posible encontrar directamente los conceptos surgiendo de los problemas que les dieron origen. Es interesante destacar que, por ejemplo, Matthews (op. cit.) cita que Mach (Ernest Mach, físico y filósofo, 1838-1916) sostenía que para comprender un concepto teórico es necesario comprender su desarrollo histórico.

Sin embargo, aunque es común que los textos agreguen un párrafo biográfico referido a los autores correspondientes cada vez que llegan a leyes o cuestiones importantes, eso en general está muy lejos de lo necesario para comprender el desarrollo histórico de los conceptos involucrados, y puede decirse que los materiales necesarios para que un profesor de nivel medio apoye de manera no trivial sus clases de física con elementos de historia prácticamente no existen.

Este trabajo esencialmente está basado sobre la suposición de que es bueno que los alumnos se acostumbren a ver surgir los conocimientos del proceso de tratar de dar solución a problemas, y no es bueno lo opuesto: que se acostumbren a aprender objetos aislados, desprendidos de las cuestiones que los hicieron surgir, o a las que podrían aplicarse. Siguiendo estas ideas se encontró que, para el caso particular de la óptica, la introducción de elementos históricos no sólo sería útil por sus réditos directos, en función de las características de los temas que se describirán, sino que además podría servir para guiar la evolución de los conceptos en el estudio escolar atendiendo al curso seguido por dicha evolución a lo largo de la historia.

2. FUNDAMENTACIÓN

Los problemas para introducir adecuadamente la historia en la enseñanza de las ciencias son muchos y de muy diferentes clases (Whitaker, 1979; Matthews, 1994; Solbes y Traver, 1996 y 2001), pero no son suficientes como para anular todos los beneficios que esa introducción podría tener, por lo cual es importante realizar esfuerzos tendientes a desarrollar propuestas que exploren las posibilidades, y muestren aspectos favorables y desfavorables.

En el desarrollo de esta propuesta se tuvieron en cuenta una serie de objetivos generales, muy deseables, que diferentes autores (por ejemplo Campanario, 1998; Boido, 1985; Solbes y Traver, 1996) consideran que se pueden favorecer con el uso adecuado de la historia, que de otra manera quedarían relegados, y que son los siguientes:

- Que los alumnos exploren posibilidades y se planteen cuestionamientos acerca de la forma y la razón de ser de la ley, y que puedan advertir cierto paralelismo o identificación entre sus ideas y dificultades, y las de algunas etapas seguidas por el pensamiento científico.
- Que los alumnos capten más fácilmente la necesidad o conveniencia de formular modelos para la luz, en el marco del problema planteado por el ajuste de los resultados de las experiencias sobre la refracción.
- Que los alumnos adquieran conocimientos específicos de la historia de la ciencia, tanto por su valor intrínseco y motivacional, como por su valor para transmitir algo de la dimensión vital y fascinante del pensamiento científico.

– Que a través de estos procesos los alumnos se acerquen mejor a la comprensión del pensamiento científico y de los procesos de la ciencia. Es decir, siguiendo a Matthews (1994), facilitar que aprendan algo sobre la *naturaleza de la ciencia*, además de hacerlo sobre su contenido.

Es claro que no hay un procedimiento único para introducir la historia en la enseñanza de la física de manera de favorecer estos objetivos, aunque en la literatura específica citada hay un consenso generalizado en que no hay que relegar los contenidos específicos y sus aspectos conceptuales para dedicarse a los aspectos históricos, ni limitarse simplemente a agregar anécdotas a dichos contenidos.

También es claro que la historia tampoco debe ser tratada superficialmente. Hay que evitar cometer el error de rellenar los huecos en el conocimiento de la historia verdadera inventando una historia ficticia o «cuasi-historia» (Whitaker, 1979), en el afán de dar un barniz de coherencia a episodios antiguos interpretados con ideas actuales.

De manera que para poder tener cierta expectativa de lograr los objetivos propuestos y evitar los errores mencionados, se debe proceder en cada caso concreto a una revisión conjunta de los conceptos específicos del tema que se trate y de los elementos históricos relacionados. En los siguientes párrafos se describen resumidamente los puntos salientes de la revisión que constituye el fundamento de este trabajo.

Para el caso específico de la enseñanza de la óptica en el nivel medio, el proceso comienza con las nociones básicas sobre la luz y el proceso de la visión, nociones sobre las cuales el pensamiento griego de la antigüedad aún sirve de referente para las ideas básicas de los alumnos. Así resulta que al tratar estas nociones es importante poner en cuestión las ideas de las antiguas escuelas griegas sobre si la visión implica una emanación desde los ojos hacia los objetos, o de los objetos hacia los ojos.

Asociada con las primeras cuestiones básicas sobre la naturaleza de la luz aparece también el asunto del modelo ondulatorio para la luz. Y aquí es útil notar que la historia nos muestra que el tratamiento de ese asunto no fue fructífero hasta el siglo XVII, en el que hubo la posibilidad de considerar otros elementos en la discusión.

Estas indicaciones de la historia, en concordancia con experiencias que anteceden a este trabajo, indican que para poder incursionar razonablemente en la óptica física, es decir en explicaciones basadas en el comportamiento de las ondas, es necesario desarrollar antes la óptica geométrica, trazando muchos rayos rectilíneos hasta lograr familiaridad con situaciones típicas.

De esta manera, las discusiones sobre la naturaleza de la luz, que son necesarias, deben limitarse con cuidado; al llegar al estudio de la refracción es cuando la historia muestra la necesidad de un modelo teórico para obtener una ley, y entonces aparece en el aula la oportunidad de

profundizar las discusiones y de llegar a desarrollar un ejemplo concreto de tratamiento de modelos.

En particular se encontró conveniente cambiar totalmente el espíritu de las experiencias que a veces se realizan para verificar la ley de la refracción denominada «de Snell», tema sobre el cual nos extenderemos más adelante. Realizadas de la manera tradicional estas experiencias pueden dejar bastantes réditos positivos, pero también suelen dejar cierta sensación de que se ha re-descubierto esta ley, y de que eso era una consecuencia casi inevitable del experimento. Pero la historia muestra claramente que durante casi quince siglos los datos llevaron simplemente a la relación lineal entre los ángulos, que fue la hallada originalmente por Ptolomeo de Alejandría en el siglo II d.C.

De esta manera, sin desconocer el avance que significó la ley de Snell, y lo satisfactorio que puede ser realizar una experiencia en la cual es posible verificar esta ley con tanta precisión, en consonancia con autores que destacan aspectos criticables de este tipo de experiencias (por ejemplo, González, 1992), se rescata en este trabajo un planteo distinto, en el cual se pone a los alumnos frente al «problema de Ptolomeo», es decir, el problema de encontrar una relación entre los ángulos de incidencia y refracción, para luego avanzar en la conceptualización. El planteo además permite un interesante trabajo escolar sobre los modelos para la luz.

De esta manera, como se verá, la propuesta que se presenta utiliza el hilo de la evolución histórica de los conceptos como guía de la secuencia de temas a tratar, logrando estructurar un tratamiento superador de muchos de los problemas de la enseñanza tradicional.

2.1. El caso de la evolución histórica de las leyes de la refracción

La refracción de la luz es un fenómeno conocido desde la más remota antigüedad. Ya Arquímedes (287-212 a.C.) lo estudió cualitativamente con elementos simples muy parecidos a los que se utilizan actualmente en los trabajos escolares.

Claudio Ptolomeo de Alejandría (100?-170 d.C.) realizó el estudio más completo y profundo del tema por mucho tiempo. Elaboró una tabla muy precisa con valores de los ángulos de incidencia y refracción en diferentes medios, y aplicó sus ideas a la corrección de las posiciones de los astros, alteradas por la refracción atmosférica. Ptolomeo llegó a la conclusión de que la ley que relaciona el ángulo de incidencia, θ_1 , con el ángulo de refracción, θ_2 , cuando un haz de luz cruza la superficie (lisa) de separación entre dos medios transparentes, es lineal (Cernuschi, 1969), es decir:

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \text{constante que depende del par de medios [1]}$$

Luego de Ptolomeo la óptica no tuvo gran desarrollo hasta cerca del año 1000, con Ibn al Haytham (965?-1038), conocido en Europa como Al Hazim o Al Hazen, uno de

los principales científicos de la civilización islámica. Al Hazen fue quien rebatió definitivamente las ideas pitagóricas sobre la visión explicada en términos de «rayos táctiles» que partían del ojo para explorar los objetos. Y también repitió las mediciones de Ptolomeo sobre refracción, constatando que su ley era exacta para ángulos pequeños, y mostraba una desviación sistemática respecto de los valores medidos cuando los ángulos crecían; pero no pudo determinar cuál era la relación correcta (Cernuschi, 1969). Esto es importante porque nos alerta sobre la imposibilidad de que los alumnos obtengan determinadas leyes, en este caso la de Snell, en un contexto de descubrimiento puro.

Después de esta época hubo avances más o menos irregulares que no interesan aquí, entre los que podemos destacar el que se atribuye a Roger Bacon (1215-1294): la fabricación de lentes para leer (anteojos), culminando con un torbellino de logros en el siglo XVII. El tema específico de la refracción permaneció sin que hubiese algún cambio conceptual hasta la aparición de la ley de Snell, como se describe a continuación.

La relación aceptada actualmente entre los ángulos de incidencia y refracción fue descubierta empíricamente en 1621 por Willebrord Snell (1591-1626), profesor de Leyden, a partir de una construcción geométrica que requiere que la relación entre las cosecantes de los ángulos se mantenga constante (Jenkins y White, 1964), es decir que esencialmente esta ley se puede expresar como sigue:

$$\frac{\text{consec}\theta_2}{\text{consec}\theta_1} = \text{constante} \quad [2]$$

Al parecer esta ley prácticamente no se divulgó hasta mucho después, con la publicación en 1703, de la obra *Dioptrica*, del físico, también holandés, Christian Huygens (1629-1695). En el intervalo la misma ley fue deducida por René Descartes (1596-1650) a partir de un modelo en el cual la luz se visualizaba como una cierta presión transmitida en un medio elástico. Descartes formuló por primera vez la ley en su forma actual en términos de senos de los ángulos (en Francia esta ley es conocida como «de Descartes»):

$$\frac{\text{sen}\theta_2}{\text{sen}\theta_1} = \text{constante} \quad [3]$$

(La constante se denomina índice de refracción del medio 2 con respecto al 1, n_{21}).

Luego esta ley fue deducida independientemente por Pierre de Fermat (1601-1665) en 1657, a partir de su propio «Principio del tiempo mínimo», que establece que la luz viaja de un punto a otro a lo largo del camino que le insume el mínimo tiempo, suponiendo que viaja con distinta velocidad en cada medio (este principio reconoce un antecedente en el de Herón de Alejandría - siglo I a.C.?, que establece algo equivalente para el caso de la reflexión). Puede mostrarse (Anexo 2) que esto equivale a la aceptación de la relación (3), con la constante (índice de refracción) igual a la relación entre las velocidades de la luz en cada medio:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad [4]$$

Luego las concepciones corpuscular y ondulatoria de la luz, impulsadas por, entre otros, Isaac Newton (1642-1727) y Christian Huygens respectivamente, muestran cómo la expresión (3) corresponde, en cada modelo, a una diferente relación entre las velocidades de la luz en cada medio. La hipótesis ondulatoria, de Huygens, llega a la misma relación (4) que el principio de Fermat, aunque a partir de un razonamiento físico totalmente distinto, de mucho interés para la comprensión del fenómeno (hay muchos más nombres, que los de Huygens y Newton, involucrados en el desarrollo de estos modelos, y allí hay un interesante espacio para anécdotas de interés).

Los razonamientos y construcciones necesarios para relacionar la ley de Snell con los diferentes modelos son importantes en esta propuesta, por lo cual se presentan esquemáticamente en los anexos 3, 4 y 5.

Para terminar esta síntesis vale destacar que el hecho de que Ptolomeo no haya llegado a la ley actual no puede atribuirse a un desconocimiento de la trigonometría, ya que en su célebre obra *Almagesto*, presentó completas, expuestas y aplicadas por primera vez las trigonometrías plana y esférica. Este hecho es una muestra más de la necesidad de contar con un modelo teórico para poder llegar a la interpretación de un conjunto de datos, y una de las bondades de esta propuesta es que desemboca naturalmente en esa idea, e ilustra una posibilidad de trabajarla en el aula.

3. LA ENSEÑANZA DE LA ÓPTICA EN NIVEL MEDIO

3.1. La enseñanza tradicional. Análisis crítico

La enseñanza tradicional de la óptica en el nivel medio consiste en general en el estudio de las propiedades más notables de la luz, acompañado de algunas anécdotas históricas en las que se menciona la evolución de ideas básicas, y seguido de actividades orientadas al aprendizaje de figuras que muestran un rayo de luz en varias situaciones típicas que corresponden a los fenómenos estudiados, básicamente: marcha rectilínea, sombras, reflexión, imágenes en espejos planos, refracción, y si se llega, casos de formación de imágenes en lentes y espejos curvos.

También se destina cierto espacio a una descripción esquemática de la naturaleza ondulatoria de la luz, llegando a veces a la predicción de cierta misteriosa aparición de franjas cuando se haga pasar luz por rendijas muy delgadas.

Los textos además tienen en general prevista la realización de experiencias elementales relacionadas con todos estos temas, algunas de las cuales, como las que sirven para ilustrar la marcha rectilínea de la luz con elementos mínimos, muchas veces se desarrollan en las clases.

Las experiencias propuestas tradicionalmente, para ilustrar o verificar las leyes de reflexión y refracción en superficies planas, suelen ser adecuadas, y se pueden realizar con materiales sencillos. Pueden quedar en la verifi-

cación de que los rayos incidente, reflejado y refractado tienen la disposición que corresponde a las figuras aprendidas en las clases, o llegar hasta la medición cuidadosa de ángulos y determinación de índices de refracción con la ley de Snell.

Resumiendo puede decirse que el nivel de dificultad de los temas se presenta en general graduado adecuadamente para la edad, se introduce algo de historia, y se realizan algunas experiencias. Ahora bien, a pesar de estos factores que podrían considerarse positivos, los resultados de esta enseñanza son increíblemente pobres.

Esto se entiende porque en general en el abordaje escolar de los temas no se parte de la necesidad de encontrar soluciones a problemas, sino que se sigue una planificación concebida con la intención de lograr aprendizajes lo más satisfactorios que sea posible, dadas determinadas condiciones de contexto. En general se espera que luego del aprendizaje el alumno esté capacitado para resolver o abordar determinadas situaciones, y la enseñanza tradicional se caracteriza por abordar primero el cuerpo de conocimientos que se considera necesario (enunciados, conceptos, leyes, etc.), para llegar poco después al tratamiento de las situaciones que deberían comprenderse o resolverse.

En particular en el caso de temas de óptica se comienza tratando de aprender el enunciado y las figuras estandarizadas correspondientes a ciertas leyes consideradas básicas o importantes, y se deja para un proceso posterior la tarea de encarar las situaciones físicas que se explicarían por medio de esas leyes y esquemas. La interpretación de situaciones reales conlleva dificultades y riesgos aun para el docente, que suele concentrar su actividad en la primera parte, en la cual se siente seguro, y limitar la segunda parte, que es la que debería dar sentido a la primera, a unos mínimos planteos que, a fuerza de ser simplificados para eliminar las dificultades, terminan estereotipados y carentes de sentido.

Pesa (1999) ha mostrado que no sólo los estudiantes sino también los profesores tienen graves dificultades para interpretar fenómenos elementales que sólo involucran la marcha rectilínea de la luz, y ha destacado la necesidad, entre otras cosas, de una metodología de enseñanza que contemple procesos más activos de aprendizaje, con incorporación de tratamientos cualitativos que propicien la reflexión sobre los significados.

Es claro que los docentes no están acostumbrados a encarar situaciones elaborando las explicaciones sobre la base de dibujos de rayos, y obviamente no acostumbran a ellas a sus alumnos. Los temas de óptica son desperdiciados en sus potencialidades para desarrollar razonamientos que permitan relacionar los conceptos estudiados con situaciones de la vida diaria.

Este tipo de enseñanza produce serios daños: tanto una visión totalmente errónea de lo que es el pensamiento científico, como la afirmación de procedimientos y actitudes viciosos denunciados hace ya mucho como parte de una metodología de la superficialidad (Carrascosa y Gil, 1985).

3.2. Alternativas a la enseñanza tradicional. Una propuesta

En este punto se presenta, para un nivel medio, abreviada hasta sus aspectos esenciales, una propuesta que se considera superadora de muchos de los problemas mencionados, elaborada con la participación de la historia de la manera descrita en la fundamentación. En letra cursiva se agregan comentarios que aclaran aspectos de las actividades especificadas.

El desarrollo de la óptica geométrica se presenta dividido en tres partes o etapas. La primera, en la que se presentan las ideas básicas sobre la luz y la visión, y se tratan fenómenos elementales referidos a la marcha rectilínea de la luz, puede desarrollarse bastante antes que las otras, tal vez en un segundo año (alumnos de 13 años de edad), mientras que el desarrollo de las otras partes podría corresponder a quinto o sexto año (alumnos de 16 o 17 años), aunque a veces ocurre que todos los temas se tratan juntos en los años finales.

Primera Parte:

Presentación de ideas sobre la luz y la visión

Actividad 1. Se trabaja con un material de lectura en el que se presentan ideas y realizaciones antiguas relacionadas con la luz y la visión (básicamente los pensadores de la Grecia antigua).

A los alumnos divididos para trabajo en grupos pequeños (TGP) se les propone que encuentren argumentos a favor y en contra, y apoyen cada argumento con dibujos adecuados. La actividad se cierra con una puesta en común en la cual el docente valida algunas ideas y procedimientos fundamentales, aunque sin cerrar necesariamente todas las posibilidades.

No se pretende llegar a discernir aquí entre naturaleza corpuscular u ondulatoria, sino solamente pensar y argumentar sobre la posibilidad de que la visión funcione a partir de algo que emane del ojo, o de algo que llegue al ojo, considerando también la posibilidad de que cada objeto emita algo como réplicas de sí mismo, que son captadas por los observadores, etc. Se incluirán en el conjunto algunas ideas cercanas a las modernas como para que también formen parte de las discusiones. Se espera asentar gradualmente la idea de que la luz es generada en algunas fuentes que la emiten en todas direcciones, que viaja en línea recta hasta encontrar obstáculos, y que sólo podemos captarla con nuestros ojos si entra en ellos, lo cual ocurre por la pupila, que es la abertura que el ojo tiene para tal fin.

No se considera agotado el tema, que se seguirá tratando en la actividad 2.

Actividad 2. Se presentan dibujos de situaciones que deben ser analizadas por los alumnos. Ellos deberán elaborar explicaciones y dibujar los rayos indicativos de la marcha de la luz según las consignas que se indiquen. El trabajo será individual (TI), y luego habrá puesta en común guiada por el docente.

El docente habrá escogido situaciones adecuadas para poner en cuestión diversas características de las ideas antes presentadas, planteando problematizaciones simples. Las situaciones habrán sido diseñadas para requerir dibujos de rayos en las explicaciones, y en las consignas se los pedirá explícitamente.

Con esta actividad se espera ejercitar la capacidad de aplicar a situaciones las ideas expuestas, tomando algunas decisiones muy simples en el proceso, y adquiriendo el hábito de que una explicación vaya acompañada de un dibujo en el cual se muestre la marcha de la luz que corresponde a la situación.

Actividad 3. El docente expondrá presentando detalles sobre las fuentes de luz, las características de los objetos que se interponen en la marcha de ésta, la formación de sombras simples, y la difusión de la luz por parte de los objetos iluminados, responsable tanto de que los podamos ver como de que ellos a su vez sean fuentes secundarias de luz.

Actividad 4. Los alumnos trabajarán sobre una o dos guías en las cuales el docente planteará cuestiones sobre situaciones simples que involucren fuentes de luz, sombras y observadores. Deberá haber cuestiones planteadas con dibujos, cuestiones en las cuales el alumno deba dibujar la situación planteada en un texto, y también situaciones experimentales, en las cuales el alumno deba iluminar algo de determinada manera (u observar alguna situación de la vida diaria), y llevarla a un dibujo. Las consignas siempre pedirán dibujos de rayos en las explicaciones y respuestas.

En alguna de estas guías se incluirán algunas cuestiones que involucren ideas sobre la naturaleza del día y la noche, tamaño, naturaleza y distancia del Sol y los astros, etc. Habrá algunas lecturas con concepciones antiguas y modernas sobre estos temas, y las consignas pondrán en cuestión diversos aspectos que se presten para analizar la marcha de la luz que corresponda.

Una de estas guías podrá ser de TGP y la otra de TI.

Los autores han constatado en diversos escenarios la absoluta incapacidad de alumnos y de algunos profesores para hacer intervenir la difusión de la luz en cualquier explicación que la requiera. El tema es lisa y llanamente ignorado, aunque es fundamental para la noción de objeto iluminado, para la noción de iluminación indirecta, y, resumiendo, para entender por qué se ve cualquier objeto. ¡No hay interpretación de una situación cotidiana si no hay familiaridad con la reflexión difusa, o con la difusión en general!

De manera que en estas guías, que obviamente contienen el tema (todas las situaciones de óptica lo contienen en alguna medida), éste debe ser destacado especialmente.

Luego del trabajo realizado en esta primera etapa los alumnos deberán estar familiarizados con la mecánica de responder preguntas sobre situaciones elementales que involucren la luz, encarando por propia iniciativa el dibujo

de rayos tendientes a dar respuestas, sin el cual ningún tratamiento razonable de temas más complejos es posible.

Segunda Parte:

La reflexión de la luz en espejos planos

De acuerdo con lo previsto, en esta parte se continuará con el dibujo de rayos, ahora para tratar la reflexión de la luz en espejos planos. El grado de abstracción se incrementa porque para este fenómeno debe lograrse una coordinación entre esquemas explicativos diferentes: lo que le sucede a los rayos (leyes de la reflexión) debe hacerse corresponder con la interpretación de la visión de una imagen de los objetos.

Además este tema brinda la ocasión para iniciar un ejercicio de modelización, especulando sobre la naturaleza de la luz, lo que se hará a través de la comparación del comportamiento de las ondas en la superficie del agua con el de objetos que rebotan al llegar a obstáculos.

Actividad 5. El docente expondrá sobre las leyes de la reflexión en espejos planos, y paralelamente mostrará, con un espejo y una linterna (o fuente de luz adecuada), los aspectos más importantes.

El docente mostrará distintas maneras de visualizar el haz de luz: por ejemplo iluminando de manera rasante una hoja de papel blanco ubicada aproximadamente como el plano de incidencia, o, sin esta hoja, observando qué lugar resulta iluminado por el haz reflejado. Destacará en cada caso que lo que se ve no es el haz, sino objetos iluminados por el haz, que permiten inferir por dónde va el mismo. El docente mostrará también que hay una imagen (virtual) en la que parece generarse la luz reflejada, sin plantear aún todos los detalles.

Actividad 6. Los alumnos resolverán (TGP) una guía en la que se los orientará para que realicen acciones necesarias para ilustrar diversos aspectos de las leyes (muchas serán las acciones exhibidas antes por el profesor, con ciertas variaciones). Para cada caso además se deberán hacer los correspondientes dibujos de rayos complementando la acción.

Pueden faltar materiales (espejos, fuentes), y en ese caso la guía puede plantearse para realizar en los respectivos hogares, iniciándose en la clase con los elementos del profesor, pasando un grupo por vez.

Actividad 7. Los alumnos resolverán una guía con ejercicios que impliquen dibujar rayos en situaciones simples con espejos (TI).

Actividad 8. El profesor desarrollará el concepto de *imagen virtual* correspondiente al caso del espejo plano, mostrando aspectos notables con un espejo.

Actividad 9. Los alumnos resolverán una guía con ejercicios sobre el tema (TI).

Actividad 10. El profesor expondrá comparando la reflexión en un modelo de partículas y en un modelo ondulatorio, discutiendo algunos aspectos de ambos modelos.

Valiéndose de un recipiente con agua mostrará ondas reflejándose, mientras propondrá cuestiones acerca de cómo mostrar la reflexión en diversos ángulos y situaciones. Algunas cosas no se podrán resolver en el aula y quedarán como tarea para los alumnos.

El profesor también expondrá el principio del camino mínimo de Herón de Alejandría (Anexo 2).

El principio de Herón tendrá aquí el estatus de un tercer modelo, cuya naturaleza no necesariamente se podrá aclarar, pero que por su éxito destacará como digno de ser considerado y pensado.

Actividad 11. Los alumnos trabajarán (TGP) sobre una guía con cuestiones referidas al tema. En esta guía habrá algunos ejercicios que obliguen a imaginar y dibujar elementos correspondientes a los diferentes modelos (como rayos, frentes de onda, etc.) en algunas situaciones propuestas, y también algunos cuestionamientos que exijan elaborar argumentos en el marco de uno u otro modelo. Se incluirán algunos elementos históricos correspondientes a épocas anteriores a Snell (intentos de medición de la velocidad de la luz, especulaciones correspondientes sobre su naturaleza, etc.).

No se pretenderá resolver exhaustivamente el tema, pero sí ejercitar el manejo de los razonamientos y elementos que corresponden a cada modelo.

Tercera Parte:

Refracción de la luz y profundización en el tratamiento de modelos

Actividad 12. El docente presenta el tema de manera cualitativa, mostrando esquemas, por un lado de la marcha de la luz, y por otro, de la alteración que se observa en la posición de un objeto al intervenir la refracción.

Actividad 13. Valiéndose de una pecera con agua dentro de la cual se coloca un objeto sumergido (o dispositivo equivalente) el docente propone a los alumnos (TGP) que expliquen (dibujando rayos) la posición observada del objeto (y otros aspectos que surjan de las observaciones).

Dado que los grupos observarán desde diferentes lugares, habrá distintas situaciones y aspectos curiosos. Luego en una puesta en común el docente guiará el análisis de las situaciones (algunas serán confusas), validando inquietudes, razonamientos y procedimientos más importantes para el tema.

Actividad 14. Los alumnos resolverán individualmente una guía en la que se plantearán situaciones con consignas que exigirán la transferencia de los conceptos. Finalmente en una puesta en común se validarán conceptos y procedimientos.

Las mismas situaciones vistas en la pecera y otras parecidas (lápices que se ven quebrados en vasos con agua, pesca con flechas y cómo acertarle a un objeto bajo el

agua, cómo se ve bajo el agua con máscara de buceo, etc.) se plantearán ahora como problemas a resolver con lápiz y papel, sin tener los elementos concretos a la vista. Con vistas a la próxima actividad se incluirán planteos sobre cómo nos ven los peces desde el agua, y cómo vemos nosotros a los astros desde el fondo de la atmósfera.

Actividad 15. Se propondrá a los alumnos la lectura de material seleccionado con antecedentes del estudio de temas de óptica por parte de los griegos, hasta llegar a Ptolomeo o Al Hazen, con comentarios sobre los logros de los diferentes actores del proceso, destacando la ley encontrada por Ptolomeo, lineal, que se mantuvo vigente por casi quince siglos.

Estas lecturas están apuntadas a allanar el camino para la propuesta de trabajo experimental en la que se espera tratar la refracción reproduciendo el problema de Ptolomeo. Los alumnos podrán buscar y aportar datos históricos que sirvan para completar y enriquecer el contexto en el cual ocurrieron los desarrollos de interés, y el docente siempre deberá tener el material básico que se necesita para fundamentar la parte conceptual de la propuesta.

Actividad 16. A partir de las lecturas anteriores se propone proceder a realizar una experiencia con mediciones que sirvan para estudiar la refracción, con la consigna especial de revisar las conclusiones de Ptolomeo.

Para ello se propone un arreglo experimental básico, del tipo que se detalla en el anexo 1.

Existen muchas formas parecidas para determinar los ángulos de incidencia y refracción para un rayo que cruza la superficie de separación entre dos medios, y es importante tanto hacer participar a los alumnos en el diseño de la experiencia, como orientar su participación hacia un procedimiento eficaz. Por ello aquí la cuestión se deja abierta, y en el anexo se detalla una posibilidad concreta que cada docente podrá adecuar a su situación particular.

El arreglo propuesto deberá ser analizado por los alumnos (TGP), para determinar, en cada grupo:

– Algunos detalles experimentales que se habrán dejado sin precisar, para dar cierta libertad de formas de trabajo.

– Mejoras, modificaciones o variantes que se consideren convenientes.

– La secuencia de procedimientos que se seguirá para llegar al resultado.

Este análisis será seguido de una puesta en común en la que se debatirán los puntos de vista de los grupos, y se destacarán errores y aciertos, para que cada grupo decida definitivamente su procedimiento.

La orientación dada por el docente deberá prever que cada grupo llegue a un diseño y a un protocolo de proce-

dimiento que permita poner de manifiesto algún tipo de ley referida a la refracción. Seguramente la realización de las experiencias mostrará la necesidad de cambios y reajustes, pero se trata de que el artefacto inicial ya posea cierto grado de elaboración.

Actividad 17. Se procede a la realización de las experiencias, con la toma de los datos y su procesamiento de acuerdo con los procedimientos definidos por cada grupo, seguida de una puesta en común con exposición de los resultados de los distintos grupos y una discusión general de lo obtenido. A medida que el proceso avance, el docente sugerirá cómo obtener valores del índice de refracción para comparar con los de tablas.

Vale destacar que los resultados variarán según el procedimiento elegido y el cuidado que pongan los diferentes operadores, pero es de prever que en general la ley lineal (relación entre ángulo de incidencia y de refracción) será verificada con bastante más precisión que en cualquier caso de experiencia de mecánica, termometría o electricidad. No obstante, los trabajos deberán mostrar una desviación sistemática (leve pero clara) a medida que crecen los ángulos, y esa desviación deberá ser considerada en los comentarios sobre el acuerdo logrado o no con las conclusiones de Ptolomeo.

El docente debe guiar las discusiones hasta que, ya sea porque se determine que la ley no es lineal, ya sea porque no se llegue a determinar si lo es o no, se establezca claramente que hace falta una teoría para decidir cuál es la ley.

Actividad 18. Se propondrá a los alumnos (TGP) nuevas lecturas sobre el hallazgo empírico de Snell, y las contribuciones de Descartes, Fermat, Huygens y Newton.

Actividad 19. El profesor desarrollará un análisis de las explicaciones de la refracción según los distintos modelos (Anexos). Al terminar planteará unas (pocas) ejercicios simples que sirvan para aplicar y reproducir los razonamientos y esquemas (TI).

Las explicaciones de la refracción según los diferentes modelos son fundamentales aquí, por lo cual se presentan esquemáticamente en los anexos (aunque están en muchos textos que no vale la pena listar).

Para el modelo corpuscular no se puede pretender abarcar los desarrollos de Newton, ya que eran complejos, difíciles de encontrar y de analizar, pero es importante tratarlo en un nivel elemental, como revisión de conceptos de mecánica (Anexo 5).

Complementos históricos se encuentran en muchos textos, y son especialmente ricos en Hetch-Zajac (1977), y en Arons (1970).

Actividad 20. Los grupos procederán a verificar el ajuste de sus datos experimentales con la ley de Snell, y se hará una puesta en común discutiendo conclusiones y perspectivas.

Es importante destacar en las discusiones la diferencia entre deducir la ley a partir de ideas teóricas (modelos), que sirven así de explicación a la ley y son convalidadas por ella, como lo hacen Descartes, Fermat, y Huygens, o descubrir la ley empíricamente, como lo hizo Snell.

Vale destacar que para eso, desde Ptolomeo, tuvieron que transcurrir quince siglos (con los trabajos de Al Hazen en el intervalo). Y también podría haberse requerido mucho más o mucho menos tiempo: sin una teoría, establecer esta ley era un hecho fortuito –a partir de las teorías sobre la naturaleza y propagación de la luz, la ley debe surgir inmediatamente.

Actividad 21. El profesor desarrollará los casos de reflexión total interna, y marcha/descomposición de la luz en el prisma, ilustrando con algunos elementos (fuente de luz y prisma, o pecera con agua). A continuación planteará a los grupos que diseñen el procedimiento (y lo lleven luego a cabo) para ilustrar determinado efecto (tendrá dos o tres efectos preparados que resulten interesantes para la actividad).

Actividad 22. Los alumnos resolverán individualmente una guía con ejercitaciones sobre refracción y reflexión.

A continuación resta aún desarrollar el tema formación de imágenes con lentes delgadas. El tratamiento de este tema es necesario porque está relacionado con múltiples aplicaciones en la vida diaria, y sólo por falta de espacio no se ha incluido esa parte de la propuesta, pero se considera que la metodología que se ha mostrado ilustra suficientemente bien la forma en que se considera que se debe trabajar:

– Debe mostrarse claramente cómo interviene la refracción en cada rayo, para establecer un hilo conceptual con lo que ya se ha visto.

– Deben ilustrarse los casos manipulando y haciendo manipular a los alumnos algunas lentes.

– Deben plantearse cuestionamientos sobre cómo y desde dónde se ve determinada cosa, trascendiendo los esquemas estandarizados de marcha de rayos.

– Entre las aplicaciones no puede faltar el funcionamiento del ojo.

– Se puede complementar con elementos históricos que resulten de interés.

La formación de imágenes en espejos esféricos se ha postergado porque las lentes dan lugar a más aplicaciones importantes y son más fáciles de manipular para ilustrar efectos, pero de haber tiempo también se desarrollarían algunos casos.

4. CONCLUSIONES

La inclusión de la historia en la enseñanza de la física no garantiza por sí misma que el aprendizaje se acerque a lo que se consideraría significativo o comprensivo, sino que para lograr esto es necesario buscarlo explícitamente, y en esta propuesta se ha mostrado cómo buscar elementos históricos con ese fin, para un tema particular.

Para ello se ha partido de la concepción fundamental de que un aprendizaje significativo requiere de un proceso de enseñanza activo y problematizador. Trabajando entonces con la idea de que en la historia se pueden encontrar los conceptos y modelos, siendo construidos a partir precisamente de los problemas y necesidades que les dieron origen, se encontró que ésta no sólo contiene elementos adecuados para proponer actividades adaptadas al aula, sino también pautas para organizar la secuencia de contenidos de la asignatura a partir de consideraciones sobre la evolución histórica de los conceptos.

Se considera que la propuesta obtenida es adecuada, y que aunque puede faltar tiempo efectivo de aula para desarrollarla, el tiempo no va a faltar por la inclusión de la historia, sino por la inclusión de las actividades que se consideran necesarias para lograr el aprendizaje buscado.

Se considera además que, manteniendo el esquema básico de esta propuesta: rescatar el análisis de la evolución histórica de ideas, modelos, y de los problemas causantes de esa evolución, y adaptar su tratamiento a un proceso de aprendizaje activo y problematizador, los beneficios de la historia en la enseñanza de ciencias podrían trascender el caso específico de la óptica y ser de un alcance general.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARONS, A. (1970). *Evolución de los conceptos de la Física*. México: Trillas.
- BOIDO, G. (1985). Historia de la ciencia y vida de la ciencia. *Revista de Enseñanza de la Física*, 1(1), pp. 19-25.
- CAMPANARIO, J. (1998). Ventajas e inconvenientes de la historia de la ciencia como recurso de la enseñanza de las ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física*, 11(1), pp. 5-14.
- CARRASCOSA, J. y GIL, D. (1985). La metodología de la superficialidad y el aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), pp. 113-120.
- CERNUSCHI, F. (1969). *Experimento, razonamiento y creación en física. Serie de Física, Monografía N° 5*, Programa regional de desarrollo científico y tecnológico, OEA.
- GONZÁLEZ, E. (1992). ¿Qué hay que renovar en los trabajos prácticos? *Enseñanza de las Ciencias*, 10(2), pp. 206-211.
- JENKINS, F. y WHITE, H. (1964). *Fundamentos de Óptica*. Madrid: Aguilar.
- HETCH, E. y ZAJAC, A. (1977). *Óptica*. (Versión española de *Optics*). USA: Fondo Educativo Interamericano, S.A.
- MATTHEWS, M.R. (1994). Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2), pp. 255-277.
- PESA, M. (1999). Concepciones y preconcepciones referidas a la formación de imágenes (Resumen de tesis doctoral). *Revista de Enseñanza de la Física*, 12(1), pp. 13-46.
- SOLBES, J. y TRAVER, M.J. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y de la química. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(1), pp. 103-112.
- SOLBES, J. y TRAVER, M.J. (2001). Resultados obtenidos introduciendo la historia de la ciencia en las clases de física y química: mejora de la imagen de la ciencia y desarrollo de actitudes positivas. *Enseñanza de las Ciencias*. 19(1), pp. 151-162.
- WHITAKER, M. (1979). History and quasi-history in physics education - part 1. *Physics Education*, 14(2), pp. 108-112.

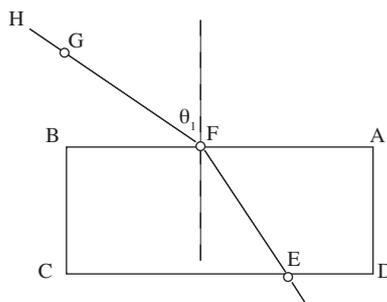
[Artículo recibido en marzo de 2004 y aceptado en marzo de 2007]

ANEXO 1

Planteo experimental

Se describen a continuación dos planteos experimentales que pueden servir de base a las elaboraciones de los alumnos.

Planteo 1. Se coloca un bloque prismático transparente de base ABCD (que puede ser un recipiente conteniendo un líquido a estudiar) apoyado sobre una hoja de papel o cartón, sobre la que se clavarán alfileres en E, F y G, que deberán verse alineados desde H. Al retirar el prisma, los segmentos GF y FE muestran la refracción sufrida por el rayo en la cara AB, y permiten obtener las mediciones que se deseen.



Planteo 2. El mismo dispositivo puesto sobre una hoja blanca es iluminado desde H con una fuente que produce un haz delgado que ilumina la hoja de manera bastante rasante. El haz que emerge en E puede ser visto sobre la misma hoja, o buscando dónde ilumina otra hoja que se ubica para interceptarlo.

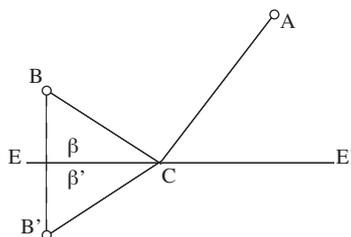
Comentario: el primer procedimiento permite obtener resultados muy precisos. Una vez que se establezca la ley de Snell, se la podrá verificar con gran precisión.

El segundo procedimiento es mucho menos preciso que el anterior, y eso será bueno para tener resultados que se ajustan naturalmente con una ley lineal. La presencia de las dos propuestas (con sus variantes) enriquece el panorama pues muestra dos maneras muy distintas de captar o tener la vivencia de cualquier fenómeno óptico: una es interceptando el haz con el ojo e interpretando lo que se ve, y la otra es viendo por dónde va el haz.

ANEXO 2

Principio de Herón.

Considérese un rayo que parte de A y llega a B luego de reflejarse en algún punto C del espejo EE'.



Se determinará cuál es el punto C para el cual la longitud del camino ACB es mínima.

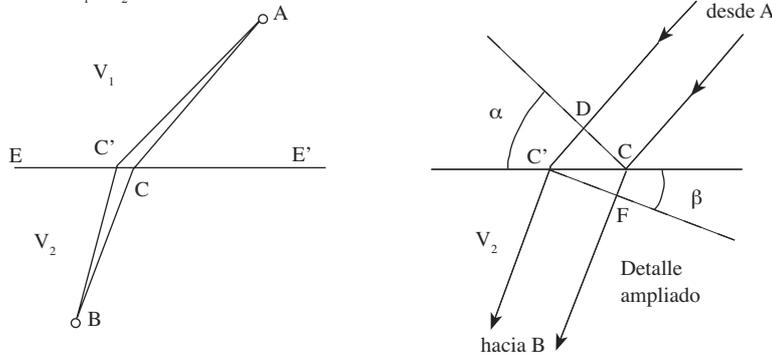
Para ello se dibuja el punto B' simétrico del B. Ahora se tiene $\beta = \beta'$, y $\text{longitud}(BC) = \text{longitud}(B'C)$, de manera que $\text{longitud}(ACB) = \text{longitud}(AC) + \text{longitud}(CB) = \text{longitud}(AC) + \text{longitud}(CB') = \text{longitud}(ACB')$

Para que la longitud del camino ACB' sea mínima, el punto C debe ubicarse alineado con A y B', y en ese caso $\alpha = \beta' = \beta$.

ANEXO 3

Principio de Fermat

Considérese un rayo que parte de A y llega a B luego de cruzar en C la superficie EE', que separa el medio 1 del 2, en los cuales la luz viaja respectivamente con velocidades v_1 y v_2 .



Para encontrar el punto C para el cual el tiempo sea mínimo, se compara el tiempo que se demora en el trayecto ACB ($\text{longitud}(AC)/v_1 + \text{longitud}(CB)/v_2$), con el que insumiría por un camino próximo, AC'B.

Si se marcan los puntos D, a la misma distancia de A que C y F, a la misma distancia de B que C', puede verse que la diferencia de tiempos que se demora entre los caminos ACB, y AC'B está dada por tiempo (DC') - tiempo (CF). Es decir:

$$\text{tiempo}(AC'B) - \text{tiempo}(ACB) = \frac{\text{longitud}(DC')}{v_1} - \frac{\text{longitud}(CF)}{v_2}$$

Si correr el punto C hacia la izquierda hace aumentar el tiempo que se demora, entonces correrlo hacia la derecha hará disminuir dicho tiempo, y viceversa. De manera que el tiempo será mínimo (es decir, ya no podrá disminuir) cuando no se altere al correr levemente el punto C.

Es decir, la condición de tiempo mínimo es:

$$\frac{\text{longitud}(DC')}{v_1} = \frac{\text{longitud}(CF)}{v_2}$$

Dado que $\text{longitud}(DC') = \text{longitud}(CC') \times \text{sen} \alpha$, y $\text{longitud}(CF) = \text{longitud}(CC') \times \text{sen} \beta$, la condición anterior finalmente queda:

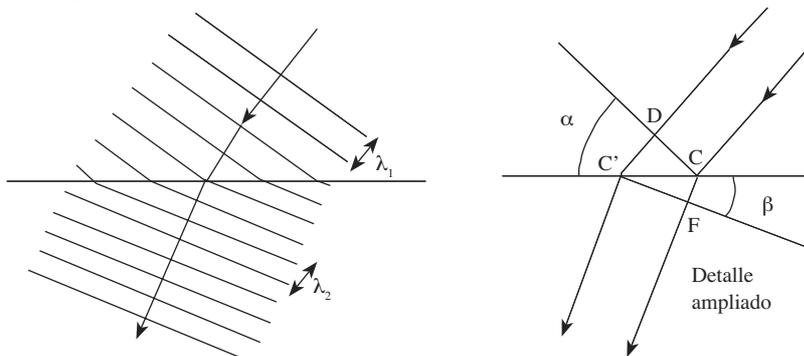
$$\frac{\text{sen} \alpha}{v_1} = \frac{\text{sen} \beta}{v_2}$$

Como las líneas CD y C'F son perpendiculares respectivamente a AC y BC (AC es paralelo a AC' y BC es paralelo a BC', pues CC' es infinitesimalmente corto), resulta que α y β son los ángulos que forman AC y BC con la normal a la superficie respectivamente, y la condición de tiempo mínimo resulta ser la ley de Snell, [3], con la relación [4] entre las velocidades.

ANEXO 4

La refracción de las ondas

Al dibujar los frentes de onda de un haz que cruza desde el medio (1) al (2), teniendo en cuenta que se conserva la frecuencia (f), y que debe plantearse la continuidad de los frentes de onda a ambos lados de la superficie refractora, se tiene la siguiente figura, cuya parte central ampliada es igual a la que corresponde al principio de Fermat.

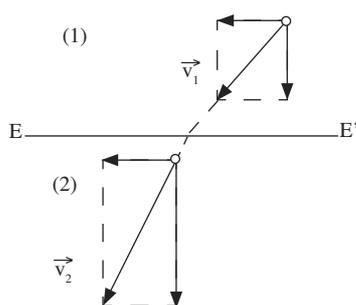


Se puede entonces repetir toda la deducción anterior, teniendo en cuenta que, ahora, longitud(DC') = $\lambda_1 = v_1 / f$, y longitud(CF) = $\lambda_2 = v_2 / f$; se obtienen las mismas expresiones.

ANEXO 5

Refracción en el modelo de partículas.

El viaje de una partícula que cruza oblicuamente la superficie EE', que separa el medio 1 del 2, en los cuales tiene respectivamente velocidades v_1 y v_2 , corresponde a un viaje libre de fuerzas tanto en el medio 1 como en el 2, alterado en la vecindad de la superficie por una fuerza responsable del cambio de velocidad. La consideración de que la fuerza sea conservativa equivale a la afirmación de que debe ser normal a la superficie. Se tiene que la trayectoria se acerca a la normal si la fuerza actúa hacia el medio 2 (caso de la figura), y viceversa.



El pasaje de un medio ópticamente menos denso a uno ópticamente más denso corresponde a una disminución de velocidad en el modelo ondulatorio y a un aumento en el corpuscular. Durante muchos años se consideró que la medición de la velocidad de la luz en distintos medios sería una experiencia crucial que permitiría zanjar la controversia onda-partícula, y las dificultades experimentales demoraron la cuestión hasta que León Foucault (1819-1868) midió la velocidad de la luz en el agua, encontrando en 1862 que $v_{\text{agua}} \cong 0,75 \times v_{\text{aire}}$, dando un apoyo total al modelo ondulatorio (ya que además el índice de refracción del agua vale 1,33, que es la inversa de 0,75). Pero para ese entonces la ciencia ya había concedido el triunfo al modelo ondulatorio a partir del desarrollo de las teorías y experiencias de difracción e interferencia. Es interesante ilustrar este modelo con una bolita que viaja en línea recta rodando por superficies bien planas y horizontales, representativas de cada medio. El cruce a otro medio está representado por un desnivel (una pequeña zona inclinada) entre los dos planos. El modelo se presta para analizar algunas características tanto de la refracción como de la reflexión.