



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID

LECCIÓN INAUGURAL  
Curso Académico 2005/2006

# Veo veo. La óptica ubicua

**Javier Alda Serrano**

Catedrático de la Escuela Universitaria de Óptica

Madrid, 2005



# **Veo veo. La óptica ubicua**

**Javier Alda Serrano**

Catedrático de la Escuela Universitaria de Óptica

**Corrección, diseño, reedición y maquetación**  
Departamento de Estudios e Imagen Corporativa. UCM

## Presentación

A mediados de los 60 se produjo en España un aumento significativo del número de nacimientos. Como consecuencia de ello, en 1985 el volumen de quintos llamados al servicio militar obligatorio fue de tal calibre que aproximadamente un tercio de ellos fue declarado excedente de cupo. Uno de ellos fui yo. Esta generación que era llamada a filas, desfasada 5 años con la mía, también comenzó a abarrotar las aulas de todas las universidades. Debido a esta coyuntura, el número de alumnos de nuevo ingreso en la Escuela Universitaria de Óptica se multiplicó por 5, obligando a las autoridades académicas del momento a la convocatoria urgente de plazas de profesorado contratado. Estas circunstancias de origen demográfico me convirtieron en noviembre de 1985 en candidato disponible para ocupar una plaza de Profesor Encargado de Curso con nivel C en la Escuela Universitaria de Óptica de la Universidad Complutense de Madrid. Y desde provincias llegué a un Madrid regentado por el Profesor Tierno y en el que las obras de la Puerta del Sol comenzaron a lucir unas vanguardistas farolas que pronto fueron sustituidas. Luego vinieron las labores investigadoras en el Departamento de Óptica de esta Universidad, la tesis, las oposiciones, los proyectos, y mi establecimiento en el trajín cotidiano, a veces esquizofrénico, de la docencia y la investigación.

Poco tiene que ver la Escuela Universitaria de Óptica en la que yo ingresé hace casi veinte años, desdotada hasta de laboratorios docentes, con la Escuela Universitaria de Óptica de la actualidad, que se coloca atenta para aprovechar los retos que nos depara el futuro. A lo largo de sus 33 años de historia, la Escuela Universitaria de Óptica de la Universidad Complutense se ha mantenido como punto de referencia académico para el resto de centros del Estado, y también para el sector profesional de ópticos-optometristas. Pero si al comienzo lo era como solución única, en estos tiempos lo es debido al prestigio académico de sus profesores, a los servicios e instalaciones de que dispone, entre las que debemos citar la Clínica Universitaria de Optometría, que además está abierta de forma expresa para servir a la comunidad complutense, y a la proyección de los trabajos de investigación que se realizan por el Claustro que la compone [EUO-UCM, 2005]. Y todo ello gracias al mimo y atención que constantemente hemos requerido a nuestras autoridades académicas y que en buena parte se nos ha otorgado. De esta manera, la Escuela Universitaria de Óptica muestra con orgullo su carácter complutense y esta Universidad se galardona a sí misma con un centro universitario de referencia estatal, europea y latinoamericana.

La oportunidad de elaborar la Lección Inaugural del Curso Académico por parte de la Escuela terminó sobre la mesa de mi despacho. La responsabilidad de esta tarea me ha atezado durante varios meses y confío haberla resuelto con dignidad, en la certeza de que muchos otros profesores de la Escuela lo habrían hecho mejor que yo. Sin embargo, la tradición y mi propia supervivencia me han colocado en el estrado para cortar la cinta de arranque del nuevo curso 2005/2006. El diseño de la lección y su enfoque han estado guiados por la necesidad de agradar y entretener a un selecto y diverso grupo de profesores y, a la vez, enseñar contenidos y conceptos de gran cercanía y relevancia. En este sentido, he podido aprovecharme de dos de los aspectos más agradecidos de la Óptica: la cotidianidad de ciertos elementos ópticos, y el innegable hecho de que los fenómenos que involucran a la luz, por su propia naturaleza, “entran por los ojos” [Falk, 1986; Können, 1985; Cowley, 2005; Edens, 2005; opticsforkids, 2005; opticsforteens, 2005; handsonoptics, 2005; Irving, 2004; Martínez-Antón, 2005a; javaoptics, 2005]. La Óptica como ciencia es, además de un “corpus” autoconsistente, lo que hoy podríamos catalogar como una disciplina transversal que ilumina otras áreas de la ciencia y la tecnología [Bass, 2001; Driggers, 2004; Shannon, 2003; Wolf, 2004], las arrastra y las mejora [NRC, 1998]. Pero no sólo eso, debido al sustrato visual de toda manifestación sociocultural multitud de conceptos ópticos impregnan al arte, a las relaciones sociales y a la historia [Greene, 2003; Stork, 2004; González-Cano, 2004]. Debido a ello, el ser humano se convierte en un individuo emocionalmente accesible mediante imágenes. Todo esto refuerza el carácter ubicuo de la Óptica que, necesariamente resumido, se ha intentado mostrar aquí. En estas páginas he plasmado una aproximación muy cercana al discurso real de apertura, dejando para el lector interesado la posibilidad de acudir a las fuentes bibliográficas, a las referencias y a nosotros mismos para resolver sus dudas y satisfacer sus curiosidades.

La forma de la lección, dictada a dos voces entre un manuscrito anónimo (como siempre) y el docente, ha permitido acercar al alumno, materia prima de nuestro trabajo, a la solemnidad y boato de este acto académico. De forma natural y por derecho propio, nuestros discentes van a estar presentes en la apertura del nuevo curso. La verosimilitud del recurso es ofrecida como un factor añadido a la lección y, en cualquier caso, su inclusión forma parte de la creatividad del acto de enseñar.

Llegado el momento de los agradecimientos deseo expresar mi gratitud a todas las personas que a lo largo de mi labor universitaria han confiado en mí y a las que espero no haber defraudado demasiado. Entre todas ellas voy a destacar

a dos: en el ámbito docente al Profesor Manuel Gómez Chueca, y en el investigador al Profesor Eusebio Bernabeu. Varias decenas de personas configurarían una lista extensa y necesariamente incompleta de profesores, alumnos, compañeros y amigos, que guardo para mí. A todos ellos, junto con Reivaj, les envío mi sincero reconocimiento. Lo más triste de este camino han sido las ausencias que se han producido. Maestros y compañeros que nos han abandonado y a los cuales deseo recordar en este momento de forma expresa. Debo comenzar por el Profesor Justiniano Casas, Catedrático de la Universidad de Zaragoza cuyos cursos tuve el privilegio de seguir, y que me animó a incorporarme plenamente a la Universidad Complutense. Y ya dentro de nuestra Universidad he visto con tristeza partir a los profesores José Fernández Mochales, José Luis Escudero, Eduardo Villamor, Pedro Dueñas, Gerardo Alemán y Daniel Vázquez.



# Veo Veo. La Óptica Ubicua

## Introducción

Uno de los objetivos de la primera lección de un curso es conseguir que los asistentes a la misma acudan al día siguiente a escuchar la segunda lección, en mi caso seguirá siendo una lección de Óptica [opticseducation, 2004], en el suyo corresponderá a las enseñanzas de sus especialidades pero, para todas ellas, mi intención será demostrarles que la Óptica, de forma ubicua, silenciosa y productiva se habrá colado en ellas. En el día de hoy mi objetivo va a ser conseguir que en la próxima clase, cuando nuestros alumnos ocupen las aulas de esta Universidad, nosotros lleguemos a dar esa lección aspirando la presencia de una disciplina que entra por los ojos, mirando a nuestro alrededor el universo con una visión refrescante, viendo nuevos reflejos de la realidad y entendiendo que nuestros individuales puntos de vista reconstruyen la imagen de un mundo plural, variopinto y necesariamente complejo.

Para conseguirlo voy a comenzar contándoles un hecho que considero les va a interesar y que ha marcado de forma decisiva el desarrollo de esta lección. Una de esas tardes de invierno de principio de este año bajé a la biblioteca de la Escuela de Óptica para consultar una de las revistas que se reciben habitualmente en ella. Al subir de nuevo a mi despacho y al lado de la puerta, me pude encontrar un pequeño cuaderno caído en los escalones, lo recogí y entré. Dejé el cuaderno sobre la mesa y no tardé mucho en abrirlo y ojear su contenido. Ha sido precisamente lo escrito en este cuaderno lo que me ha permitido preparar esta primera lección con más y mejor fundamento. Este cuaderno que ahora guardo con devoción estaba manuscrito con una letra redonda, menuda y utilizando varios bolígrafos, rotuladores y lapiceros a lo largo de bastante tiempo. No tiene escrito ningún nombre ni dirección ni teléfono que me haya permitido localizar a su autora, género que es deducible de la concordancia de algunos adjetivos. Pero lo primero que he podido concluir de su contenido es que la persona que lo ha escrito conoce nuestra Escuela y las materias que impartimos en ella. Es decir, de alguna manera sus anotaciones, como veremos a continuación, reflejan conceptos, ideas y opiniones adquiridas durante unas cuantas docenas de meses de estudio y vida universitaria.

Además de su especial contenido, la peculiaridad más relevante de este manuscrito anónimo es que está organizado de manera alfabética, como una agenda, pero en vez de ordenar los nombres o apellidos de las personas, aglutina conceptos, glosándolos y desarrollando una perspectiva personal y en ocasiones bastante acertada de los mismos. Este hecho es el que me ha inspirado para

titular a esta lección como “Veo Veo” remedando ese juego adivinatorio sobre el concepto u objeto encerrado en la mente de un individuo quien, para poner a prueba el ingenio de sus interlocutores, tan sólo nos proporciona la primera letra de la palabra. Qué mejor revelación para un profesor que el hallazgo de una clave de estas características, y cuánto he disfrutado en su esclarecimiento.

Apoyándome en los comentarios recogidos en este particular cuaderno, les voy a mostrar uno de los aspectos más interesantes de la Óptica: su difusión en un mundo necesariamente permeable a la luz, y la permanente presencia de elementos ópticos y visuales que rodean nuestro deambular y las facetas de la sociedad actual. La Óptica y la visión impregnan la tecnología de nuestro estado del bienestar y la trama del medio escrito y hablado. De hecho, sabemos que la “comida entra por los ojos”, que la gente a veces “se enamora a primera vista”, que cuando estamos ahítos decimos que “nos hemos puesto ciegos”, que la divinidad se representa refulgente de rayos y con el mismo ojo omnisciente que aparece en el billete de un dólar americano. Nuestro lenguaje está lleno de metáforas visuales, de innumerables rimas y greguerías de imágenes. Nosotros, los docentes, experimentamos día a día y en primera persona el dicho de que “una imagen vale más que mil palabras”. Esto es posible porque el ser humano está especialmente adaptado a observar el entorno y sacar de él la suficiente información para sobrevivir como especie y para crear los vínculos sociales y afectivos que le han colocado, en algunos aspectos, al borde de la autoextinción.



Fotografía de la Tierra y la Luna desde el espacio. La visualización de esta imagen permite explicar de forma evidente la forma y el aspecto de estos dos cuerpos celestes, ilustrando el potencial docente de las imágenes (fotografía tomada de NASA, <http://grin.hq.nasa.gov>, acceso 20/6/2005).

## De la A a la Y

Pero vamos, sin más, a resolver este paseo por el abecedario de la mano del cuaderno hallado ante la puerta de mi despacho. Existen en este cuaderno varias entradas para cada una de las letras, pero me he permitido seleccionar las más relevantes para el objetivo que les planteo. En la mayoría de los casos he respetado la redacción y estilo de los textos originales, pero en otros me he tomado la licencia de adaptar algunos giros y expresiones al marco en el que hoy nos encontramos. Como es esperable, la primera de las entradas corresponde a la letra A, la primera letra, y por ella empezamos.

“Aberraciones: Hoy nos han dicho que los sistemas ópticos que no son perfectos presentan aberraciones, pero si se describen en la aproximación paraxial sólo se manifiestan las aberraciones cromáticas. Esto me recuerda a mucha gente que conozco. Si me quedo en la aproximación paraxial, o sea, sin tener en cuenta toda la realidad del individuo, todo el mundo me cae fenomenal y sólo encuentro diferencias cromáticas, o sea, unos tienen los ojos verdes, otros azules, y algunos se ponen colorados. Pero en cuanto abarcamos todo lo demás comienzan a dispararse los comportamientos aberrantes”.

Las aberraciones ópticas [Majahan, 1991] describen la fenomenología que presentan los sistemas ópticos cuando dejan de poder describirse de una forma sencilla que denominamos como aproximación paraxial [Alda, 2003]. El tratamiento paraxial, como todas las aproximaciones utilizadas en la ciencia, permite un cálculo rápido y sencillo del comportamiento de los elementos ópticos, que debe ser refinado para incluir las aberraciones ópticas, que de manera indefectible aparecerán en el sistema en cuanto queramos forzar su comportamiento. Las aberraciones ópticas limitan el rendimiento de los instrumentos ópticos y sólo un adecuado análisis del comportamiento de sus elementos constituyentes, lentes y espejos, permiten diseñar sistemas de gran calidad óptica.

“Acomodación: Es la capacidad que tiene el sistema visual humano para producir una imagen nítida sobre la retina cuando se colocan frente a él objetos a diversas distancias. Cuando falla la acomodación se produce la incomodación que consiste en que nos sentimos molestos porque los demás no ven las cosas según nuestro criterio. Esto me ha pasado un par de ocasiones en la revisión de exámenes, no hubo manera de acomodar la nota de mi ejercicio en el rango del aprobado y me sentí incomodada”.

En este punto quisiera realizar una aportación a la relación entre la nitidez y la resolución. En muchas ocasiones, la fe en la tecnología y en la ciencia produce ciertos procesos audiovisuales que, no por acostumbrados, debemos considerar como correctos. Es habitual observar en escenas de guiones cinematográficos, televisivos y publicitarios la constante superación de los límites de resolución de imágenes y vídeos. A veces somos testigos de que, gracias a una licencia pseudotecnológica, una determinada imagen tomada por un instrumento óptico se amplía y se procesa sucesivamente, en un bucle casi infinito, para justificar el desarrollo posterior de la acción. Todos nos hemos enfrentado en más de una ocasión a la frustración de observar cómo las fotografías tomadas de un evento familiar, social o profesional defraudan nuestras expectativas al aparecer como desenfocadas, o tomadas tan de lejos que no podemos apreciar detalles o aspectos en los que podemos estar interesados. En esos momentos se nos ocurre que acaso sería posible aplicar sofisticados sistemas de procesado de la imagen que nos devolviesen el resultado apetecido [Russ, 1995; Goodman, 1996; Gaskill, 1978]. Sin embargo, esto también tiene un límite ya que bien sabemos todos que “de donde no hay no se puede sacar”, y si en el registro de la imagen, la luz procedente del objeto de interés se ha repartido por una región del plano de la imagen de forma inadecuada, por ejemplo si está desenfocada, no será posible recuperar la información del objeto de una forma sencilla. Es cierto que existen notables avances en el procesado de imágenes que permiten mejorar la calidad de tomas afectadas de diversos problemas. Como caso paradigmático, podemos nombrar el gran esfuerzo empleado para mejorar la calidad de las imágenes enviadas por el Hubble que en un primer momento se veían afectadas por los defectos de fabricación de su espejo primario [Hanish, 1993; HST, 2005]. Sin embargo, el continuo bucle de ampliación y mejora de la resolución y nitidez de las imágenes es sencillamente una bella metáfora acerca de la superación de los límites físicos. Afortunadamente, la aparición de la fotografía digital ha permitido la ilustración de los conceptos de nitidez y resolución y su uso como señuelo comercial y publicitario. El empleo de vocablos tan alejados de los currícula de la sociedad en general, como megapixels o zoom óptico, ha sido relativamente bien ilustrado y aprendido por las empresas y por el público. Todo el mundo ha entendido de una forma relativamente eficiente que la resolución, no la nitidez, de una cámara aumenta conforme aumenta el número de detectores que colocamos en el plano de detección. Ello es debido a que las cámaras digitales incorporan *de fábrica* el equivalente a la película fotográfica. En las cámaras tradicionales el medio de registro se elige por el usuario, quien, en función de su gusto o necesidad, incluye películas de mayor o menor resolución, de menor o mayor sensibilidad respectivamente. En este

caso, la óptica de las cámaras tradicionales debe especificarse y fabricarse para poder producir imágenes nítidas, bien enfocadas y libres de aberraciones, para un amplio abanico de resoluciones de películas fotográficas. Sin embargo, las cámaras digitales, con la resolución fijada por el elemento de registro, pueden ajustar la calidad del sistema óptico empleado, optimizando costes y especificaciones [Holst, 2003a; Holst, 2003b].



Debido a los defectos y errores en la fabricación y prueba del espejo primario del telescopio espacial Hubble las primeras imágenes presentaban una fuerte aberración esférica (a la izquierda se muestra la imagen aberrada de una galaxia) impidiendo que la imagen de un objeto puntual fuese un punto. El conocimiento de las características del sistema óptico permitió el cálculo de la distribución de luz esperada para un objeto puntual (en el centro). A partir de estos datos y utilizando algoritmos de deconvolución de la imagen, se pudo mejorar notablemente la calidad de las imágenes (a la derecha tenemos la imagen mejorada de la galaxia). [Hanish, 1993].

“Boloñesa: hasta ahora ha sido sólo una salsa italiana. A partir de ahora también va a nombrar al lío que se puede organizar en las carreras universitarias. A mí me parece muy bien que por fin se pueda trabajar en distintos sitios de Europa y que lo que hayas estudiado aquí te valga en cualquier otro país. Pero también es verdad que, como en el caso de la salsa, en este proceso de Bolonia lo más importante va a ser la pasta”.

“Color: A mí me gusta el color azul de la noche americana de las películas de miedo y de suspense. Curiosamente el ojo, cuando trabaja de noche desplaza su máxima sensibilidad hacia el azul. Es lo que científicamente se denomina como efecto Purkinje. También me gusta el color azul del cielo y el azul-verdoso del mar. El aire, según parece, también es azul. Es fácil de entender, el cielo tiñe al aire de azul”.

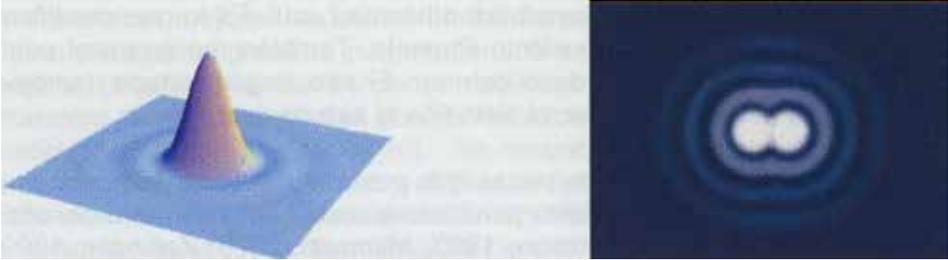
La especie humana es una de las pocas que posee un sistema sensorial que codifica el espectro electromagnético percibido en una sensación que denominamos color [Gilles, 1948; Williamson, 1983; Minnaert, 1993; Zollinger, 1999;

Tilley, 2000; Wyszecki, 2000; Wandell, 1995; Lynch, 2002]. La percepción del color ha supuesto una ventaja evolutiva frente a otras especies. La distinción por el color entre los frutos maduros y no maduros, entre la carne comestible y putrefacta, o la identificación de reacciones fisiológicas que producen cambios de color de la piel, ha permitido superar las carencias en el sentido olfativo y ha dotado al ser humano de una herramienta singular para ver el entorno que le rodea de una forma singular. La colorimetría, encargada de la medida y caracterización del color, ha logrado medir una percepción sensorial. Para ello ha necesitado el auxilio de diversos ámbitos de la ciencia, que incluyen a la medicina, biología y bioquímica para identificar las sustancias, tejidos, órganos y sistemas responsables de la detección y percepción del color, a la física y a la química para desarrollar materiales y compuestos con características cromáticas reproducibles e instrumentos para medirlas, y a las matemáticas que han ofrecido formulaciones y estructuras sólidas y fiables para la construcción de los modelos de visión del color.



Comparación entre la visualización en color y blanco y negro de una orquídea.

“Difracción: La difracción de la luz aparece cuando intentamos forzar a la luz a pasar por agujeros muy estrechos. Según parece, las puntas que les salen a las estrellas por la noche son debidas a la difracción que se produce en los medios oculares. Yo acabo de comprobarlo, he estado mirando por la ventana hace un rato y cuando giraba mi cabeza mirando a una sola estrella he visto claramente como las puntas de la estrella giraban conmigo”.



La difracción impone un límite físico, basado en el modelo electromagnético de la luz, para la resolución de un instrumento óptico, incluso aunque éste se considere libre de aberraciones. En la práctica, debido a la naturaleza ondulatoria de la luz, la imagen de un punto se convierte en una mancha extensa cuya distribución de irradiancia, para una apertura de entrada circular, está representada a la izquierda. Cuando se observan dos puntos próximos, las manchas correspondientes a cada una de ellas pueden llegar a confundirse, impidiendo resolver los dos puntos objeto como separados (a la derecha se representan las imágenes difractadas de dos fuentes puntuales muy próximas).

“Espejo: desde que estoy en la escuela veo el espejo como un objeto diferente. Antes me parecía sólo un mueble, ahora un instrumento óptico. El espejo de mi baño está hecho con un vidrio. La parte de atrás es el verdadero espejo. Una vez, en el museo arqueológico vi un espejo antiguo, creo que era romano. La verdad es que aquello no parecía un espejo. No había manera de mirarse en él. Luego entendí que el espejo originalmente era metálico, algo que aquí llaman de primera superficie, y el paso del tiempo había estropeado esa superficie. Aquí yo sólo he visto una vez un espejo de primera superficie: en unos baños públicos de un parque asturiano. Imagino que estarían hartos de reponer espejos de vidrio y decidieron ponerlos de acero inoxidable”.

El espejo es el elemento óptico más popular y utilizado en todas las sociedades y épocas. El espejo compensa la asimetría que supone el hecho de que podemos ver el rostro de los demás pero nos está vedado el nuestro. Los espejos aparecen en todas las manifestaciones artísticas: pintura, arquitectura, escultura, literatura, cine, etc. Dos ejemplos: el esperpento de Valle-Inclán no sería posible sin los espejos curvos del callejón del Gato [Valle-Inclán, 1924], y Blancanieves fue víctima de un deslenguado espejo mágico [Grimm, 1857]. La insolencia de los espejos al devolvernos nuestra propia mirada se compensa con su bondad al enseñarnos nuestra identidad. Los espejos, como elementos tecnológicos se incluyen en multitud de técnicas e instrumentos. Los odontólogos exploran nuestra dentadura con su ayuda, de la misma manera que, en circunstancias extremas, los guardias de seguridad vigilan los bajos de los coches que atraviesan determinados puntos de control. Los láseres, los retinoscopios, las señalizaciones viales, además de innumerables instrumentos ópticos, incluyen espejos curvos o planos como elementos básicos para su operación.

“Foco: el foco de un sistema óptico se define como el punto en el que se concentran los rayos de luz procedentes del infinito y que entran a un sistema óptico. El foco de la Escuela de Óptica es la cafetería, ahí vamos a parar todos”.

Quizá hubiese sido más reconfortante leer que el foco de un centro universitario es la biblioteca, o el laboratorio, o las aulas, pero la realidad es tozuda e invariante bajo traslaciones temporales, el comentario refleja un comportamiento muy ligado a la vida universitaria. La cafetería de todos los centros universitarios se convierte en lugar de encuentro, de solaz y de comunicación informal. Es donde confluyen los actores del proceso educativo descontextualizados.

“Gafas: La primera vez que vi unas gafas fue en el colegio. Germán era un niño de mi clase de segundo de primaria que llegó a mitad de curso y que llevaba de forma continua unas gafas. Al año siguiente, en mitad de un juego del recreo, sus gafas cayeron al suelo y se rompieron. Creo que en aquel momento pensé que lo que se había hecho añicos habían sido sus ojos ya que se quedó con ellos cerrados durante un rato mientras los trozos de vidrio y de montura permanecían desperdigados por el suelo. Luego los abrió y se puso a llorar. En Óptica he comprobado que las gafas son una magnífica solución para compensar la mayor parte de las ametropías: son bonitas, son ligeras, no afectan al globo ocular, y son fácilmente adaptables a la evolución de la ametropía”.

Es interesante incorporar aquí una reflexión sobre la evolución temporal de los procedimientos utilizados para la compensación de las ametropías. Las gafas, o más precisamente hablando, las lentes oftálmicas han sido los dignos sucesores de los anteojos de la antigüedad. Hoy en día, la complejidad en el diseño, fabricación y prueba de las lentes progresivas poco tiene que envidiar a cualquier otro elemento óptico o electrónico de precisión [Fanin, 1987; Jalie, 1994; Alonso, 2003]. Sin embargo, la compensación mediante lentes oftálmicas ha visto el nacimiento de competidores cada vez más próximos e interactuantes con los medios oculares. En primer lugar fueron las lentes de contacto, que se apoyan en la película lacrimonal que fluye delante de la córnea. Y en las últimas décadas ha sido la cirugía refractiva la que ha permitido el desarrollo de técnicas cada vez más sofisticadas y fiables para la corrección de las ametropías mediante un acto quirúrgico sobre la córnea. Cabe preguntarse cuál sería nuestra actitud ante las gafas si la evolución temporal hubiese sido al revés, desde la cirugía a la lente oftálmica. Sin duda la consideraríamos como una solución apetecible, cómoda, reversible, y actualizable.

“Humor acuoso: Lo más gracioso que he visto relacionado con el humor acuoso es un cartel que hay en la piscina de niños del polideportivo de mi barrio, donde pone: “Agua No Potable”. El humor acuoso me parece más divertido que el humor vítreo. Ese humor vítreo que tenemos en el interior del globo ocular me recuerda a las bolas de ámbar que venden en las ferias de minerales, y que tienen incrustados insectos y plantas del pasado. También yo veo moscas flotantes en mi ojo, como productos del metabolismo ocular engullidos por el humor vítreo y que ya forman parte de todos mis paisajes”.

“Iluminación: dícese del estado en el que deseo encontrarme al realizar un examen”.

La iluminación es la parte de la Óptica que estudia las condiciones para que exista un determinado nivel de radiación luminosa sobre un objeto. Al igual que la colorimetría, las bases de la iluminación se encuentran en el conocimiento preciso de la respuesta del ojo humano ante la luz. El ojo no responde por igual a todo el espectro visible y, de forma lógica, tiene el máximo de sensibilidad adaptado evolutivamente a la región espectral en la que el Sol emite la mayor cantidad de energía, en torno a una longitud de onda de 555 nm. A ambos lados de este máximo el sistema visual humano detecta luz con peor eficiencia hasta dejar de percibir, de producir sensación luminosa, fuera del espectro visible. Como disciplina tecnológica aplicada a circunstancias cotidianas, la iluminación es un factor determinante en seguridad vial y laboral, al proponer valores de iluminancia mínimos para determinados elementos del tráfico rodado y de tareas laborales, incluido el estudio en nuestras bibliotecas. Por otro lado, la iluminación impone sus reglas para la retransmisión de eventos deportivos, para la correcta visualización de obras pictóricas, escultóricas o arquitectónicas, para el ocio, y de una manera muy singular en las artes escénicas, donde la correcta manipulación de las bases de la fotometría y de la colorimetría permite proporcionar ambientes y entornos estrictamente controlados y apropiados al espectáculo [Lindsey, 1991; Murdoch, 1994; McCluney, 1994; Gandolfo, 2003].

“Jalón: después de un tiempo de estar en la Escuela me enteré de que el Jalón es un río y que Arcos de Jalón es un pueblo de la provincia de Guadalajara cerca de donde nace ese río. Por allí pasa el tren y por aquí la línea siete de metro. Después de tantas generaciones de ópticos optométristas saliendo de Arcos de Jalón me tengo que enterar si existe una óptica en ese pueblo”.

En este punto debemos aclarar que Arcos de Jalón realmente pertenece a la provincia de Soria, no a la de Guadalajara, y se sitúa en el vértice que esta provincia tiene entre la de Guadalajara y la de Zaragoza. También es necesario precisar que la Escuela de Óptica de la Complutense está situada en la Avenida Arcos de Jalón, que afortunadamente para todos está mucho más cercana al campus que el pueblo de Soria en honor al cual tiene su nombre. Por último, según los datos de 2004, en el pueblo de Arcos de Jalón no ejerce en la actualidad ningún óptico optometrista, por lo que es posible todavía compensar esta deuda.

“Láser: La primera vez que vi un láser fue en el patio del instituto. Mi amigo Carlos trajo un llavero con un láser que utilizó para espantar a todos los gorriones del patio. Luego intentó diversos trucos de señalamiento y el vigilante del recreo, mi profesor de inglés, se lo guardó hasta la salida. Cuando se lo devolvió le entregó un papelito con los peligros reales de provocar una lesión ocular si insistía en experimentar en explorar las pupilas del resto de compañeros del instituto con él. Desde entonces me voy fijando en todas esas etiquetas amarillas que anuncian la existencia de un láser en el interior. Lo tiene mi compact, la impresora de mi padre, el puntero del profesor de contactología, y la cajera del supermercado. Hay muchos láseres a nuestro alrededor, los que más se ven son los rojos de los escáneres de los códigos de barras, pero también hay muchos que ni siquiera se ven y que sin embargo me sirven para oír música o hablar con mi prima que está en Holanda”.



Representación cinematográfica de la emisión láser en el espacio (© George Lucas, Starwars VI, el Retorno del Jedi).



Símbolo de advertencia sobre la presencia de un dispositivo que emite radiación láser.

El láser ha supuesto, desde su invención en 1961, la disponibilidad de una fuente de radiación electromagnética con características muy singulares [Townes, 2001]. Su manejo y uso es cada vez más sencillo, aunque es necesario mantener ciertas condiciones de seguridad [Sliney, 1980; LIA, 2005; ANSI, 2005]. Desde un punto de vista básico, los láseres ofrecen ventajas considerables frente a fuentes convencionales en términos de monocromaticidad, coherencia espacial y temporal, intensidad y calidad de colimación de la radiación emitida [Siegman, 1986; Hecht,

1993; McComb, 1997; Hecht, 1999b; Ready, 1997; Beach, 1993; Goldsmith, 1998]. Todo ello acompañado de un diseño compacto, reproducible y en continua mejora de especificaciones. Muchas de las ventajas tecnológicas de las que disfrutamos no serían posibles sin el concurso de estas fuentes de luz. Sin ir más lejos, y de forma directa, la impresión tipográfica de esta lección ha involucrado a varios láseres: el de la impresora de mi despacho y el de la editorial que lo ha confeccionado, el del grabador de discos compactos que he utilizado para realizar un par de copias de seguridad, y el que inyecta luz sobre la fibra óptica que sin duda ha intervenido en el transporte del fichero electrónico desde un lado a otro de la ciudad. Todo ello sin contar el empleo de telémetros láser para construir las infraestructuras públicas que han permitido nuestro desplazamiento por Madrid: túneles, puentes, autopistas, todos ellos se han servido de láseres para mejorar la precisión y la fiabilidad de las obras de ingeniería civil. Por otro lado, la industria automovilística ha mejorado la robustez y ligereza de los elementos de carrocería y de mecánica gracias al empleo de láseres en el corte, soldadura y tratamiento superficial de piezas. La capacidad de las fuentes láser para desmenuzar las propiedades de sustancias y materiales abrió en su momento nuevas técnicas de análisis espectroscópico de gran resolución e indudable transcendencia. En medicina los láseres han sido utilizados como sustitutos del bisturí, como parte de sondas de tratamiento y diagnóstico [Yager, 1997], y más recientemente como instrumento esencial para la corrección de ametropías a través de la ablación láser del estroma corneal [Berlien, 1993; Niemz, 1996; Wanynant, 2002]. A lo largo de este año se prevé la puesta en funcionamiento de uno de los proyectos mundiales que pretende demostrar la viabilidad de la fusión nuclear como fuente estable de energía: el National Ignition Facility [Paisner, 1994; NIF, 2005]. La pieza clave de este sistema es un conjunto de láseres y amplificadores ópticos que deben concentrar su energía para situar a la materia en las condiciones de temperatura y densidad necesarias para fusionar núcleos de deuterio y tritio y generar un núcleo de helio produciendo energía. Por todas estas razones y muchas más que ampliarían notablemente este listado, no es arriesgado afirmar que la invención del láser ha constituido uno de los avances más importantes de la segunda mitad del siglo XX. Este hecho ilustra una de las características más llamativas de la óptica, que está bien acreditada a lo largo de la historia de la ciencia y de la tecnología. La Óptica se convierte en una herramienta posibilitadora de nuevos avances en otros ámbitos [NRC, 1998].

“Luz: Según cuentan, lo primero que hizo Dios fue crear la luz. No me extraña, con lo complicado y triste que es vivir a oscuras. Me llama la atención que cuando se abre la puerta del frigorífico o del microondas se enciende una lámpara. Es como en la creación, hágase la luz y cenemos. Lo que más me choca es la existencia de luces que no vemos. Al principio sonaba a esotérico

pero luego quedó claro que es el ojo humano el que clasifica y distingue a la luz entre visible y no visible. Es un consuelo que más allá de nuestra percepción, el universo sigue iluminado por otras luces de diversa naturaleza: ondas de radio, infrarrojos, rayos X, etc. Aunque es un poco inquietante saber además que el cuerpo humano emite luz infrarroja. Me desconcierta que al dormir en la oscuridad de la noche, incluso mis entrañas están iluminadas por sí mismas”.

La presencia de la luz es algo bueno en nuestra sociedad. De hecho, cuando deseamos valorar positivamente algo o a alguien decimos que es brillante, luminoso, o radiante. Los periódicos se dedican a “sacar a la luz” las opiniones y hechos cotidianos y para ello utilizan una consigna irrefutable: “luz y taquígrafos”, o sea, dejadme ver lo que pasa para que yo pueda contarlo a los demás. Lo negativo es la ausencia de luz, lo oscuro, lo tenebroso. Cuando los niños pequeños quieren esconderse se tapan los ojos, de manera que en su oscuridad es impensable que nadie les vea. La ciencia desde siempre se ha preocupado por la explicación de los fenómenos ópticos. Para ello, a lo largo de la historia, ha ido creando modelos y teorías sobre la luz [González-Cano, 2003]. Es llamativo que la Óptica siga manteniendo vivos tres modelos superados sucesivamente pero que siguen formando parte de los manuales y textos de Óptica y hacen posible el diseño de instrumentos ópticos o la explicación de la interacción de los fotones con sistemas materiales [Casas, 1994; Hecht, 1999a; Malacara, 1989; Pedrotti, 1996; Born, 2002; Boreman, 1999; Sobel, 1987; Mansuripur, 2002; Goodman, 2000; Frieden, 2001; Calvo, 2002; Bloembergen, 1992; Paul, 2004; Feynman, 1988; Scully, 1997; Mandel, 1995]. Estos tres modelos son el geométrico, el ondulatorio y el cuántico. En el modelo geométrico la luz se explica a través de las trayectorias que recorre. Para ello utiliza un principio de minimización del tiempo recorrido. La propagación rectilínea de la luz en el vacío, la existencia de sombras y la explicación de los espejismos es posible gracias a este modelo. El modelo ondulatorio o electromagnético considera a la luz como una onda electromagnética propagante incluso en el vacío. Las consecuencias de este modelo son incluso más formidables que las del modelo geométrico ya que han permitido explicar fenomenologías tales como la polarización de la luz, la interferencia y la difracción. Los tratamientos antirreflejantes de los sistemas ópticos y las pantallas planas de cristal líquido han sido desarrollados utilizando dispositivos que emplean este modelo con eficacia. Por último, el modelo cuántico de la naturaleza considera a la luz como una colección de paquetes energéticos con propiedades muy especiales: tienen energía y momento, pero no tienen masa, y por lo tanto pueden viajar a la velocidad de la luz,  $c$ . Las ventajas tecnológicas que en este momento disfrutamos gracias al modelo cuántico son innumerables, pero podemos citar un par de ellas: el láser y los detectores de semiconductor [Dereniak, 1996] que se encuentran, por ejemplo, en las cámaras digitales o en las de los teléfonos móviles.

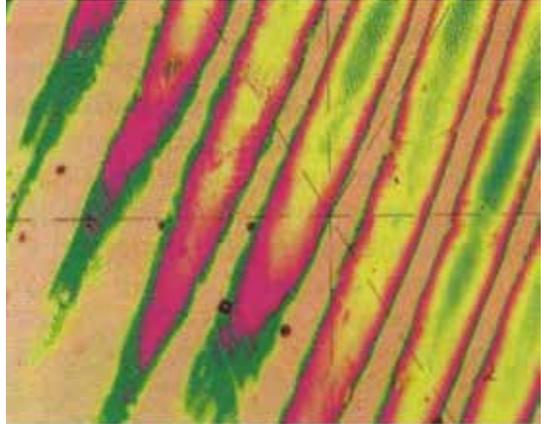
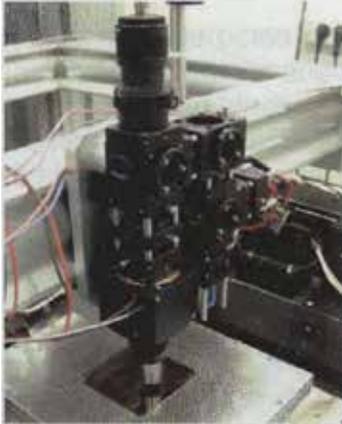
“Matrícula: desde que entré en la Universidad la matrícula es el rito que marca el final del verano y de las vacaciones, además de una forma especialmente dolorosa cuando te tienes que matricular de las que te quedan, ya que encima de que te han suspendido tienes que pagar más. Dicen que si sacas una matrícula de honor al año siguiente te sale más barato. Yo hasta ahora no he conseguido ninguna pero tendré la mala pata de sacar una matrícula de honor en mi última asignatura, y entonces, ¿a quién le pido el descuento?”

Un elemento mucho más extendido que la matrícula universitaria es la matrícula de los vehículos. También aquí hay una contribución esencial de la Óptica. El recubrimiento del fondo de las placas de matrícula contiene una película de minúsculas esferas de vidrio suspendidas en una matriz. La función de estas bolas es devolver la luz que llega a ellas en la misma dirección de la iluminación, aproximadamente. Esto es debido a la reflexión interna de la luz en el interior de las bolas de vidrio. El mismo mecanismo es el que utilizan los recubrimientos y pinturas reflectantes utilizados en señalización vial y que permiten circular de noche por carreteras bien señalizadas.

La siguiente entrada colocada en esta lección no estaba en el cuaderno y me he permitido reservar la N para incluir una breve reseña a uno de los ámbitos de mayor potencial científico y tecnológico de la Óptica.

Nanofotónica: Estamos acostumbrados a considerar a los elementos ópticos como sistemas claramente macroscópicos, de dimensiones centimétricas o incluso métricas. Todos entendemos que los telescopios, las cámaras de fotos, las lentes oftálmicas son instrumentos ópticos. También entendemos que los sistemas ópticos empleados en tecnologías más modernas, tales como las fibras y acopladores usados en comunicaciones ópticas, son sistemas milimétricos o, más generalmente, con rasgos de decenas o centenares de micras. Por ello no nos sorprende el encontrar tratados, libros y reseñas que desde hace tiempo hablan de la Microóptica como una parte esencial del desarrollo de estas nuevas tecnologías [Borelli, 2004; Brenner, 2004]. A la vez, si nos introducimos un poco más en los fundamentos de la Óptica, vemos que tiene que ver con entidades que tienen tamaños mucho más pequeños, sub-micrométricos. De hecho, la longitud de onda de la radiación visible se encuentra en el rango de 380 a 780 nanómetros. Y aquí encontramos el prefijo que está moviendo una importantísima cantidad de recursos intelectuales y económicos: nano-. Desde finales del siglo XX y en estos primeros años del XXI estamos siendo testigos de una efervescencia de la Nano-tecnología y de la Nano-ciencia [Scientific American, 2002]. Los programas nacionales y europeos de investigación básica y aplicada comienzan a tener

subprogramas dedicados de forma preferente o exclusiva a las Nano-cosas. Los países e instituciones que han entendido que la ciencia expande no sólo las fronteras del conocimiento, sino también las fronteras de las áreas de influencia económica y cultural, han desarrollado mucho antes que nosotros las condiciones precisas para la creación de institutos multidisciplinares dedicados al desarrollo de ideas y conceptos en Nanociencia [CNF, 2005; SNF, 2005; PSNF, 2005; IMM, 2005; Nanospain, 2005]. Pero antes de presentar la Nanofotónica debemos definir qué es lo que entendemos por “nano”. Podemos considerar un sistema “nano” a aquel que implica la interacción con estructuras cuya dimensión relevante para el fenómeno está por debajo de 100 nanómetros (a título comparativo sabemos que el cabello humano posee un diámetro en torno a los 70.000 nanómetros). En cuanto a la fotónica [Saleh, 2001; Kasap, 2001] debemos asumir que, a pesar de que el término Nano-óptica también circula entre la comunidad científica [Ohtsu, 1999; Kawata, 2002; Novotly, 2006], en esta escala dimensional es mucho más sencillo el referirnos a las unidades básicas de la radiación luminosa: los fotones, que a los elementos que se utilizan para su control, que en muchas ocasiones se denominan como óptica, forzando una sinécdoque que no por injusta es menos utilizada. Por tanto, la Nanofotónica tratará con estructuras materiales que interactúan con la radiación luminosa cuyos rasgos característicos están por debajo de la longitud de onda, y con fenomenologías cuyo rango, alcance y efecto está confinado en minúsculos volúmenes. Afortunadamente, el electromagnetismo computacional [Taflove, 2000; Hafner, 2001] y otros modelos que incorporan la naturaleza cuántica de la interacción radiación-materia, ofrecen las técnicas y la algorítmica necesaria para simular el comportamiento de los nano-dispositivos. Fruto de los avances en otras áreas de la ciencia y de la tecnología es posible la fabricación de los dispositivos [Joannopoulos, 1995]. Y por último, se dispone de las herramientas necesarias para configurar sistemas de medida y análisis de los elementos ideados y fabricados. Basados en este ciclo podemos afirmar que los avances en Nanofotónica, y en general en Nanociencia o Nanotecnología, se encuentran bien fundamentados. A la vez, la exploración de la naturaleza a escala nanométrica descubrirá nuevos comportamientos y fenomenologías que sin duda abrirán nuevos interrogantes y retos que la ciencia deberá intentar resolver. Por último deberíamos concluir que en este nuevo paso en el escudriñamiento de la naturaleza es más patente que nunca la multidisciplinariedad de los conceptos e ideas involucradas. Es revelador que buena parte de los proyectos de nanotecnología que se llevan a cabo en las instalaciones de fabricación dispuestas para estos fines están relacionados con las “bio-ciencias”. La razón es muy sencilla, si en algún sitio podemos mirar para observar un comportamiento complejo de la naturaleza a escalas nanométricas, éste es el de la interacción entre moléculas y estructuras biológicas [V-Dinh, 2003; Prasad, 2003; Prasad, 2004; Palanker, 2005].



La grabación de nanoestructuras puede realizarse mediante la utilización de grabadores láser en configuración de onda evanescente. La fotografía de la izquierda muestra el sistema de grabación láser del Grupo Complutense de Óptica Aplicada [AOCG, 2005; Alonso, 2005] y la microfotografía de la derecha muestra las estructuras, en forma de micro-nano-surcos tridimensionales, obtenidas mediante esta técnica [Martínez-Antón, 2005b].

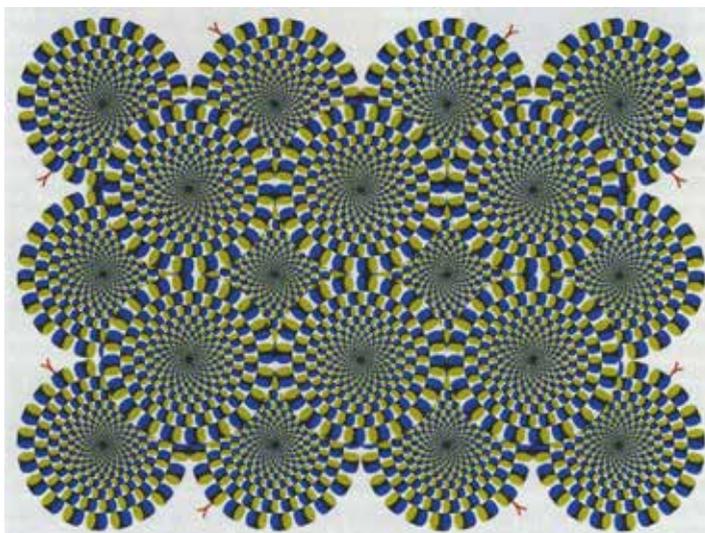
“Ñ: es de las pocas letras del alfabeto que no aparece en los optotipos de un gabinete de optometría. La razón de su ausencia es su semejanza con la N, que sí que está en los test optométricos. De todos modos, si alguna vez tengo que diseñar un test optométrico pondré la Ñ, sólo para dar un guiño al idioma”.

“Óptica: después de todo este tiempo aquí me he dado cuenta de que al añadirle apellidos, la Óptica explica muchas cosas: óptica geométrica, óptica física, óptica instrumental, óptica oftálmica, óptica cuántica, óptica no lineal, óptica de Fourier, óptica estadística, etc. Estos son algunos de los que he oído en clase y seguro que me dejo muchos más”.

“Optometría: un amigo que estudia filología inglesa me dijo que su profesora de literatura norteamericana les definió la literatura como aquello que se estudia en clase de literatura. Me pregunto si podríamos decir que la Optometría es lo que se enseña en clase de Optometría. De todos modos cuando vea otra vez a mi amigo el filólogo le diré que la Optometría va a ser capaz de proporcionarle los medios para que pueda leer literatura norteamericana cuando la longitud de sus brazos para sostener el libro no sea capaz de compensar su presbicia”.

A partir de estos dos comentarios sobre la Óptica y la Optometría, creo que es conveniente aclarar algunos aspectos relacionados con estas parcelas del saber. Dentro de la taxonomía de la ciencia, la Optometría aparece dentro del epígrafe

de la Óptica que a su vez se incluye dentro de la Física. Sin embargo, la realidad académica y social de la Optometría en los países más avanzados en esta disciplina permite concluir que la Optometría cobra carta de naturaleza y recoge, para su constitución y desarrollo ulterior, aspectos básicos y aplicados de diversas disciplinas del saber [AAO, 2005; AOA, 2005a; AOA, 2005b]. Este hecho convierte a la Optometría en una disciplina científica de marcado carácter multidisciplinar, en donde intervienen de forma pareja y complementaria las ciencias experimentales y las ciencias biosanitarias [Grosvenor, 2001; Rosenblum, 1992; Edwards, 1993; Leibovic, 1990; Hubel, 1999; Palmer, 1999; Pedrotti, 1999; Rodieck, 1998; Wandell, 1996]. Baste como ejemplo la amplia variedad de titulaciones del profesorado que imparte estas enseñanzas en nuestra Universidad y que enumero a continuación: Ingeniería Industrial, Ingeniería de Telecomunicaciones, Ingeniería de Minas, Física, Matemáticas, Biología, Química, Farmacia, Medicina y Cirugía, Bellas Artes, Ciencias de la Educación, Arquitectura, Filología Inglesa, Filosofía y Letras, Psicología, Derecho y, por supuesto, Óptica y Optometría.

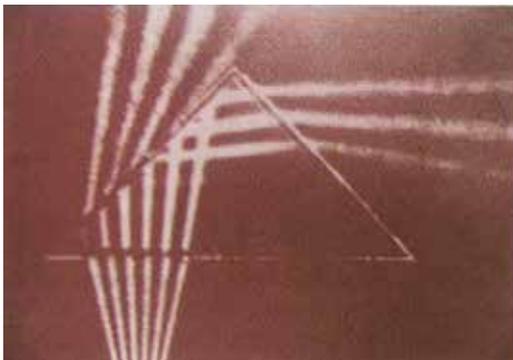


La correcta explicación de las ilusiones ópticas [Shekel, 2005] requiere el análisis de todo el sistema de procesado de la información visual, desde el comportamiento de los elementos ópticos del ojo hasta los mecanismos de percepción instaurados en el cortex visual. En este sentido, la Optometría, como disciplina encargada de la evaluación, medida y tratamiento de la función visual, requiere un enfoque multidisciplinar.

“Polarización: según he entendido, la polarización de la luz es posible debido a que el espacio en el que nos movemos tiene tres dimensiones. Simplificando mucho creo que se puede decir que una de ellas se utiliza para definir la dirección en la que se propaga la luz y en las otras dos es en las que se mueven los campos electromagnéticos”.

La imagen espacial que promueve esta descripción es muy apropiada y permite decir que el estado de polarización de la luz constituye un grado de libertad añadido para el manejo de las ondas luminosas. En la naturaleza, el cielo diurno se encuentra parcialmente polarizado y algunos insectos como las abejas, utilizan este hecho para orientarse en su entorno, los pescadores conocen las ventajas de usar gafas polarizadas y suprimir en gran medida el reflejo del cielo en la superficie del agua [Kónnen, 1985]. Todos los que utilizamos ordenadores portátiles, o visualizadores de cristal líquido, disfrutamos de dispositivos tecnológicos que emplean esta propiedad de la luz. Incluso el ojo humano, en ciertas circunstancias puede distinguir la orientación de la vibración del campo eléctrico de una luz linealmente polarizada. A este efecto se le denomina como efecto Haidinger [Minnaert, 1993; Alcoz, 2005].

“Prisma: Trozo de vidrio con caras planas que desvía la luz. Es interesante ver que los escaparates de las joyerías están llenos de prismas: diamantes, rubíes, esmeraldas... Las piedras preciosas serían menos preciosas si no estuviesen talladas con caras planas que desvían y descomponen la luz en cientos de reflejos y colores. Posiblemente los prismas que más lucen son los de las lámparas de araña, es cautivador observar la dispersión cromática de la luz refractada en los cientos de prismas colgando alrededor de las bombillas. Pobrecitos los que tengan que limpiarlos”.



Refracción y reflexión total de la luz en un prisma de vidrio.



Descomposición espectral de la luz al atravesar un prisma de vidrio.

“Quijote: Al año que viene será el centenario del Quijote. Cuando lo leí hace unos años me llamó la atención el caballero de los espejos, quien intenta devolver a don Quijote a la razón y que termina descalabrado porque su caballo no consigue arrancarse en la batalla”.

No es este el único elemento de óptica que aparece en la obra de Cervantes, los anteojos como artilugio para proteger la vista están también presentes en varias

ocasiones refiriéndose al tipo de ayudas visuales o elementos ópticos que protegen a los ojos [González-Cano, 2004].

“Rayo: Al llegar a la escuela dejé de dibujar los rayos en forma de diente de sierra. Los comencé a trazar como rectas que se torcían al atravesar lentes y espejos. Puestos a hacer bromas alguien dijo que puesto que las asignaturas de Óptica nos enseñaron cómo trazar rayos, a lo mejor la asignatura de Audiometría nos decía cómo representar los truenos”.



Fotografía del interior de la Gran Central Station de New York. La luz que entra por los ventanales es difundida hacia la cámara por la presencia en el aire de partículas en suspensión mostrando su trayectoria rectilínea.



Anunciación de Fra Angélico (Temple sobre tabla, 1436, Museo del Prado, Madrid).

Los rayos han sido siempre la representación del transporte de la luz y también del poder desde un lugar a otro. El sol refulge con rayos que iluminan las escenas y desde pequeños se nos enseña a dibujarlo de esta forma. La luz procedente de la divinidad sirve tanto para transfigurar a las almas devotas como para castigar a las desviadas del camino. Esos rayos flamígeros ilustran todo tipo de manifestaciones artísticas. Hoy en día siguen siendo admiradas las construcciones arquitectónicas de la antigüedad que, como perdurables heliógrafos, sólo en ciertos días del ciclo solar, muestran o resaltan un determinado detalle. A la vez, las modestas representaciones de las trayectorias de la luz que en óptica denominamos como rayos son las piezas básicas que permiten reconstruir el proceso de formación de imágenes en todo tipo de sistemas ópticos [Alda, 2004; Arasa, 2004; Smith, 1990]. La integración de este concepto geométrico en algoritmos de cálculo aplicados de forma intensiva, además de acelerar el proceso de diseño y optimización de los instrumentos ópticos que disfrutamos hoy en día, ha permitido crear escenarios virtuales de gran verosimilitud y realismo. Las producciones cinematográficas de animación computerizada han sido los principales beneficiarios de este hecho. Como contrapunto merece la pena señalar el abuso de ciertas licencias

visuales que poco o nada tienen que ver con la realidad. Un ejemplo accesible son esas batallas galácticas a base de armas láser que destrozan a las naves enemigas. En ellas, el haz se representa desde un lado, silba en el vacío y viaja a velocidad claramente inferior a la de la luz desde la nave atacante a la receptora. La realidad impuesta por la naturaleza es mucho menos espectacular, debido a que el vacío interestelar no contiene medio material en el que la luz se difunda, tal y como ocurre en recintos llenos de humo y partículas en suspensión, sólo la zona iluminada lo percibirá, imposibilitando la visualización lateral del haz. La misma ausencia de materia impedirá escuchar silbido o ruido alguno procedente del haz [Rossing, 1990], y por último, aunque son conocidos los experimentos en los que ha sido posible la reducción de la velocidad a la que se propaga un pulso luminoso en un medio especialmente preparado para ello, nuevamente el vacío permitirá a la luz propagarse a la velocidad  $c$ .

“Sombra: al andar bajo el sol mi sombra se mantiene unida a mí en el punto en el que toco el suelo. Al correr, en cada zancada, hay un instante de desconexión, de deliciosa independencia. Al medir con el retinoscopio, la velocidad y dirección del movimiento de la sombra me da pistas para saber la refracción del ojo que observo. Entonces me imagino que es mi sombra la que se mueve en la retina observada”.



Fotografía tomada por el astronauta francés Jean-Pierre Haigneré desde la estación espacial rusa MIR, el día 11 de agosto de 1999, en el momento en el que la sombra de la Luna sobre la Tierra se situó sobre el Macizo Central francés.

La ausencia de luz debida a la interposición de un objeto opaco frente a una fuente de luz es lo que se denomina como sombra. La sombra suele tener connotaciones negativas relacionadas con la oscuridad. No es apropiado “hacer la sombra” a nadie, y permanecer “en la sombra” suele implicar un sentimiento de culpa u obligado anonimato. Incluso en el análisis de imágenes médicas suele ser un mal diagnóstico la aparición de sombras anormales. Sin embargo, el uso apropiado de las sombras puede producir

resultados muy productivos y útiles. En el ámbito artístico cabe destacar el teatro de las sombras tan desarrollado en las culturas china y griega. También en ciencia, el análisis de las sombras es significativo, y no sólo en retinoscopía. La predicción del paso de la sombra de la Luna sobre la Tierra o de la Tierra sobre la Luna proporcionaba rango y poder a la casta de astrónomos próxima a las clases dominantes. La sombra de un mástil sobre un círculo graduado proporciona un método probado y amigable con el medio ambiente para conocer el paso del tiempo a lo largo del día. La medida de la sombra de dos mástiles hincados en el suelo en dos puntos del globo terráqueo permitió a Eratóstenes, hace 23 siglos, estimar el tamaño de la Tierra y proporcionar un valor extraordinariamente cercano al verdadero, dados los rudimentarios medios de medida y cálculo. Resulta curioso recordar que el antropocentrismo cultural de la época no fue capaz de admitir que, a partir de los datos de Eratóstenes, el mundo desconocido era muchísimo mayor que el conocido. De esa manera, cuando Posidonio repitió la medida y el cálculo y proporcionó un valor erróneo, mucho menor, pero políticamente más correcto se consideró éste como válido. Este dato pervivió a lo largo de los siglos y formaba parte del conocimiento científico en la época en la que Colón planificó y realizó su viaje. Podríamos preguntarnos cuál hubiese sido la respuesta de la reina Isabel ante la subvención solicitada por Colón, si el dato correcto hubiese estado en su poder. En este caso cobra una dramática relevancia esa frase que dice “qué atrevida es la ignorancia”, y nos demuestra de forma fundamentada que la gesta de 1492 tuvo sus luces y sus sombras.



Mapamundi, Florencia, 1474 (Biblioteca del Vaticano, Ciudad del Vaticano).

“Telescopio: La etimología de la palabra corresponde a un instrumento para ver a distancia. Yo propongo una mezcla de las dos partes de la palabra. Así, telescopio significa “ver la tele”, del griego “scopio”: ver, y del español: tele”.

Si bien es correcto considerar a la televisión como un producto de la ingeniería electrónica y de las comunicaciones, también es necesario matizar que la Óptica y especialmente las ciencias de la visión han realizado aportaciones significativas al desarrollo de la televisión [Peli, 1995; Holst, 1998a; Leibovic, 1990; Hubel, 1999; Wandell, 1995; Falk, 1986]. Como ejemplo podemos citar la elección de los colores de los fósforos que se siguen utilizando en las pantallas de rayos catódicos, o la disposición de elementos controladores de la polarización de la luz que emplean las modernas pantallas planas. Los avances en la investigación acerca de cómo el sistema visual humano procesa las imágenes en movimiento han permitido el desarrollo de estándares de televisión y de compresión de vídeo gracias a los cuales disfrutamos de películas en formatos digitales con calidad superior a sus predecesores analógicos en soporte magnético y con posibilidad de ser transmitidas a través de Internet con una calidad aceptable.

“UVA: Son las radiaciones ultravioletas al parecer más inofensivas y son las que te ponen morena. Ahora se han puesto de moda para tener buen color en pleno febrero, aunque lo mejor es escaparse en Navidades a algún lugar donde tumbarse al sol. Las gafas de sol deben protegernos de esta radiación porque parece estar relacionada con la aparición precoz de las cataratas”.

Todos los años, poco antes del verano, los ópticos-optometristas nos recuerdan la necesidad de vigilar la calidad de las gafas de sol que suelen adquirirse para esas fechas. Además del correspondiente tributo a la moda, los filtros de protección solar han de cumplir una serie de requisitos de calidad que en ocasiones pueden verse comprometidos en artículos no homologados. Deberíamos tener en cuenta que una gafa de sol con un filtro mal fabricado es peor que la ausencia de la gafa. Lo que puede ocurrir es que la transmitancia de la gafa en el UV no asegure la protección adecuada, y a la vez atenúe fuertemente la radiación visible. En esas circunstancias, ante una menor iluminancia sobre la retina, el sistema visual humano abre la pupila de entrada para dejar pasar más luz, que contiene radiación ultravioleta no bloqueada por la gafa defectuosa, con lo que el efecto de la misma es mayor que si no se portase ninguna gafa de sol.

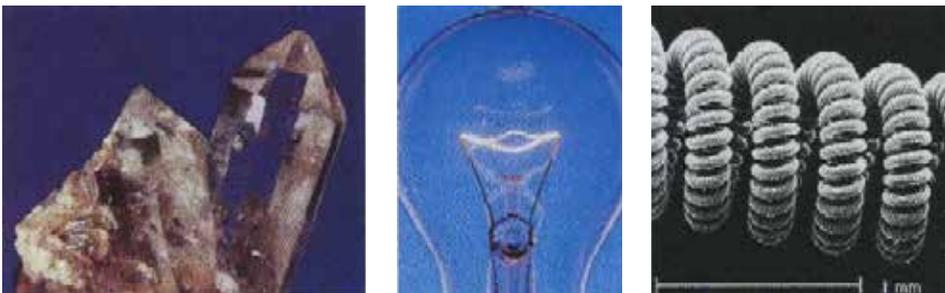
“Vista: hay un refrán que dice “lo que es bueno para la vista es malo para los ojos”. Yo creo que si algo he aprendido en la Escuela es que es posible proponer soluciones y tratamientos optométricos que mejoran la vista y la salud ocular. Creo que somos el contraejemplo necesario de este refrán”.

“Virtual: si lo virtual se contrapone a lo real ¿qué significa realidad virtual? Cuando me miro al espejo veo mi imagen virtual frente a mí, y si me pellizco

la imagen virtual se queja como yo. No parece que el mundo al otro lado del espejo sea muy diferente a este”.

Vivimos en un tiempo de la historia donde la virtualidad se ha hecho dueña de la escena. A pesar de que el origen latino de la palabra indica fuerza o virtud, lo virtual se relaciona con lo etéreo o aparente. En Óptica desde siempre hemos tenido la oportunidad de manejar elementos virtuales. Estos conceptos han servido para describir, por ejemplo, la formación de imágenes mediante espejos o el aumento visual observado con una lupa. Por otro lado han permitido ofrecer imágenes muy valiosas a otros ámbitos de la Física donde la búsqueda de simetrías en los fenómenos naturales se relaciona con la invariancia de la fenomenología frente a inversiones especulares. En otras áreas, el progreso de las tecnologías de la información y las comunicaciones ha colocado el adjetivo virtual a aspectos cuya solidez y esencia requieren un soporte material definitorio, entre ellos cabe destacar la presencia virtual, dinero virtual, escenario virtual, y la más llamativa de todas que es realidad virtual, tal y como glosaba el cuaderno. Nuestro entorno se virtualiza, las instituciones financieras y de suministro nos animan a manejar la correspondencia virtual, el comercio abre tiendas virtuales, el ocio también, y nuestra universidad aprovecha todo ello para configurar una nueva herramienta de aprendizaje y de docencia y que ha venido a llamarse como Campus Virtual y que, además de ofrecer apoyo al profesorado y nuevos servicios al alumno, debería servir para adaptar paulatinamente nuestros hábitos docentes a los modelos propuestos por el proceso de convergencia europea [EEES, 2005].

“Wolframio: cuando me he enterado de que el wolframio lo descubrió un logroñés me he decidido a no volver a utilizar el nombre de tungsteno. Ahora cuando vea la W en la tabla periódica de elementos el paladar me sabrá a Rioja”.



La wolframita (izquierda) se utiliza para extraer el wolframio con el que se fabrican los filamentos de las lámparas incandescentes (centro). El filamento se enrolla en una doble espiral (derecha) para mejorar la eficiencia de las lámparas.

Cabe decir aquí dos cosas: la primera es que los descubridores del wolframio, Fausto de Elhuyar y su hermano Juan José, hoy hubiesen pedido una bolsa de viaje o una beca postdoctoral para viajar a Suecia y trabajar en un laboratorio de reconocido prestigio que trabajaba sobre la identificación y medida de la composición de los minerales. El genio de los hermanos Elhuyar consistió en aprovechar los avances de los laboratorios suecos y proponer un método efectivo para la separación de materiales que les permitió hallar el wolframio. De paso, deberíamos recordar que el nombre de tungsteno y que es otra manera de llamar a la misma sustancia proviene del sueco. El segundo comentario pertinente es que el uso tecnológico del wolframio en el ámbito de la óptica está relacionado con la mejora de las bombillas eléctricas inventadas por Edison en 1879. La alta temperatura de fusión de este metal (3.410 °C) ha permitido su uso extensivo como filamento de las lámparas incandescentes.

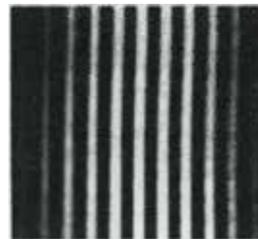
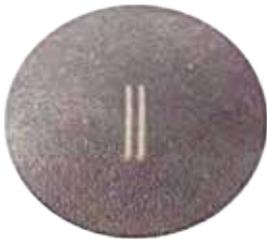
“Xenón: Los gases nobles siempre me han merecido mucho respeto. Desde que me enteré que éste servía para fabricar lámparas todavía le tengo más admiración. ¿Se podría decir que esto es una xenofilia?”.

Ciertamente el xenón es el gas que se incluye en las minúsculas lámparas de descarga que se utilizan en los vídeo-proyectores de salas de conferencias y de cinematografía. Ciertas mejoras tecnológicas de estas lámparas han permitido su inclusión en las luminarias de los automóviles. Debido a su diseño y características, los faros de xenón incorporan no sólo los habituales elementos reflectores, sino que también ha sido necesario integrar lentes y elementos ópticos de gran fiabilidad y que han de funcionar en situaciones ambientales extremas.

“Young: joven. Otra contradicción: me siento joven y me abruma el futuro, aunque quizá debería decir que me produce ansiedad. Dentro de unos años me darán un título para poder buscar un trabajo que me guste, pero estoy casi segura de que esto sólo es el principio. Todos esos libros que quedan por leer y estudiar me parecen un laberinto. Espero que con mi diploma me entreguen un mapa para guiarme en su interior, si no es así, volveré a la Escuela a quejarme”.

Esta es una de las entradas más personales que he visto en el cuaderno y describe uno de los objetivos más importantes de nuestra labor académica. El panorama de cambio de paradigma docente que supone los nuevos modelos de convergencia europea no puede dejar de lado la formación en habilidades y destrezas para la mejora del conocimiento propio. Nuestros alumnos deben

aprender a aprender, de lo contrario sólo aprenderán lo que les enseñamos y, eso, además de caduco es necesariamente finito y limitado. Ignoro por qué su autora la ha colocado en inglés, pero ello me ha permitido recoger una biografía ejemplar y que viene al caso. Thomas Young fue médico y físico en el tránsito del siglo XVIII al XIX. Esta multidisciplinariedad, además de su prodigiosa mente, le permitió realizar contribuciones notables en diversos aspectos de la percepción sensorial, y de la física. Entre ellos podemos destacar: la comprobación experimental de que el cristalino del ojo cambia su forma al observar objetos a distintas distancias; la relación entre las irregularidades de la córnea y el astigmatismo producido; la prueba experimental que permitió describir la luz como un fenómeno ondulatorio, frente al modelo corpuscular todavía vigente desde la obra de Newton; una teoría de la visión del color basada en la existencia de tres colores primarios que aún pervive en nuestros días bajo el nombre de modelo de Young-Helmholtz; la comprensión y parametrización de los fenómenos de elasticidad, de hecho una de las propiedades elásticas de los cuerpos se conoce en la actualidad como módulo de Young, y a modo de entretenimiento se interesó por el lenguaje jeroglífico de los egipcios, aportando claves para su posterior descifrado. Al fin y al cabo comprobamos nuevamente que la contribución de diversos ámbitos del saber, tal y como ocurre en la Óptica y en la Optometría, supone una ventaja añadida para el resto de la ciencia.



El experimento de la doble rendija de Young fue un argumento irrefutable para el establecimiento del modelo ondulatorio de la luz frente al modelo corpuscular propuesto por Newton. Cuando una fuente de luz ilumina una pantalla que contiene dos aperturas en forma de rendija (izquierda), la luz proveniente de ambas rendijas muestra una distribución interferencial como la mostrada a la derecha de esta figura. La réplica de este experimento óptico con partículas materiales (electrones, neutrones, etc.) permitió la corroboración de la dualidad onda-corpúsculo en Física cuántica.

## y Z

Y les voy a decir la última palabra de aquella agenda, y que, además, es la que más inquietud me ha producido. Después de todo el discurrir alfabético sobre conceptos aprehendidos en la Escuela me encontré con el “Veó Veó” empezando por Z que se condensa en la palabra “Zaragoza”. Y es que yo soy de Zaragoza. Y en ese epígrafe decía:

“Zaragoza: capital de provincia que se pronuncia con todas las sílabas acentuadas”.



Vista de Zaragoza en 1647 desde la ribera norte del Ebro. (Martínez del Mazo, aunque en algunos textos se le atribuye a su maestro Velázquez. Museo del Prado, Madrid).

Y junto con la definición fonética de este topónimo había dos envoltorios de papel ya arrugados. En la parte de afuera pone “auténticos adoquines de Zaragoza, deliciosos” y en la parte de adentro había dos coplas, como de jota aragonesa [Barreiro, 2000; Yus, 2000], muy lisonjeras y apropiadas para formar parte de este cuaderno y que a continuación transcribo:

“Es la Óptica de siempre  
una ciencia muy cabal  
a mí me alegra la vista  
con la luz que tú me das”.

“Son tus miradas maña  
muchísimo de desear  
que a mi las gafas me empañan  
cuando te veo pasar”

Por último, y puestos ya a formar cuartetos me gustaría despedirme con la siguiente:

Empiezo un curso mañana  
y mis clases voy a dar  
con los ojos bien abiertos  
y con ganas de...

...de aprender. Este año, como todos, daré clase para aprender.

## Conclusiones

A partir de los contenidos desarrollados en esta lección podemos extraer las siguientes conclusiones:

- El ser humano está especialmente dotado para el procesamiento de las imágenes percibidas por su sistema visual. Por esta razón, las relaciones humanas, las manifestaciones socio-culturales y el arte, que es la sublimación de todo ello, están impregnados de multitud de referencias visuales. La Óptica y la Optometría, como partes de la ciencia encargadas de analizar la interacción de la luz con la materia y la respuesta del sistema visual humano ante estímulos externos, están en perfectas condiciones de explicar y fundamentar adecuadamente la mayoría de las referencias visuales que aparecen en las manifestaciones artísticas de todo tipo.
- La Óptica constituye en sí misma una rama de la ciencia que se preocupa de la explicación de todos los fenómenos en los que la radiación luminosa tenga un papel relevante. El panorama actual de la Óptica abarca desde cuestiones fundamentales del conocimiento de la naturaleza hasta aspectos tremendamente aplicados, de marcado carácter ingenieril.
- Además, la Óptica ha proporcionado herramientas, modelos, elementos de análisis y sistemas de medida para el desarrollo del resto de ciencias y disciplinas. Como ejemplos, podemos citar a la Astronomía y a la Medicina como demandantes del desarrollo de instrumental óptico de gran calidad. Por otro lado, la popularización del acceso a la tecnología que se ha producido en la sociedad occidental ha desperdigado en hogares, en puestos de trabajo, en automóviles e infraestructuras innumerables objetos y dispositivos que incorporan elementos ópticos, o que funcionan gracias a la correcta integración de sistemas ópticos y electrónicos. La desaparición de la Óptica en nuestra sociedad produciría un “apagón” tecnológico devastador para todos los sectores de la actividad productiva, y que comprometería seriamente la calidad y eficacia de los sectores secundario y terciario. Todo esto convierte a la Óptica en una disciplina transversal que posibilita el avance en otras áreas de la ciencia y de la tecnología.
- La Optometría, catalogada oficialmente como una parte de la Óptica, va mostrando cada vez más su carácter propio y la necesidad de un acercamiento multidisciplinar a ella. La aportación de la Optometría al cuidado de la salud

visual de la población corresponde a la primera línea de actuación para la compensación de ametropías y para la detección de desarreglos visuales más preocupantes. A la vez, la Óptica, como metonimia de los gabinetes de Optometría, se convierte en la dispensadora de los sistemas ópticos más populares: las lentes oftálmicas y las lentes de contacto.

- Como resumen podemos afirmar que una de las características más relevantes de la Óptica es su ubicuidad y su cercanía al individuo. Este hecho la convierte en una materia especialmente agradecida en su enseñanza, ya que los alumnos se encuentran altamente motivados para entender el comportamiento de la naturaleza y de los elementos cotidianos que hacen uso de fenomenologías ópticas.



Fotografía panorámica de la sombra de la Tierra sobre la atmósfera. El Este se sitúa a la izquierda y puede observarse el disco lunar en su fase de orto como una mancha blanca sobre la vertical del edificio blanco. El centro de la fotografía corresponde aproximadamente al sur y el resplandor de la derecha es debido al Sol poniente. La sombra de la superficie de la Tierra puede observarse como una zona de coloración azul oscura cuyo grosor es máximo en el Este y va decreciendo hacia el Oeste hasta desaparecer. Sobre esta zona oscura puede verse una franja púrpura correspondiente a los niveles atmosféricos todavía iluminados por el Sol (22 de mayo de 2005, a las 21:35).

## Referencias

[AAO, 2005] American Academy of Optometry, [www.aaopt.org](http://www.aaopt.org) (acceso 20/6/2005).

[Alcoz, 2005] Alcoz, J.: *Polarized light in nature and technology*, [www.polarization.com/index-net/index.html](http://www.polarization.com/index-net/index.html) (acceso, 20/6/2005).

[Alda, 2003] Alda, J.: *Paraxial Optics*. Encyclopedia of Optical Engineering, Marcel Dekker, 2003.

[Alda, 2004] Alda, J.; Arasa J.: *Paraxial Ray-Tracing*. Encyclopedia of Optical Engineering, Marcel Dekker, 2004.

[Alonso, 2003] Alonso, J.; Alda, J.: *Ophthalmic Optics*. Encyclopedia of Optical Engineering, Marcel Dekker, 2003.

[Alonso, 2005] Alonso, J.; Crespo, D.; Bernabéu, E.: *Grabador láser de alta resolución*. Actas de la Primera Jornada Complutense de Investigación en Óptica, Optometría y Ciencias de la Visión, 69-74, 2005.

[ANSI, 2000] American National Standards Institute, *American National Standard for the Safe Use of Lasers: ANSI Z-136.1 (2000)*, Láser Institute of America, 2000.

[AOA, 2005a] American Optometry Association, [www.aoanet.org](http://www.aoanet.org) (acceso 20/6/2005).

[AOA, 2005b] American Optometry Association, *What is doctor of Optometry?* [www.aoa.org/x792.xml](http://www.aoa.org/x792.xml) (acceso 20/6/2005).

[AOCG, 2005] Applied Optics Complutense Group (Grupo Complutense de Óptica Aplicada), [www.ucm.es/info/aocg](http://www.ucm.es/info/aocg) (acceso 20/6/2005).

[Arasa, 2004] Arasa, J.; Alda, J.: *Real Ray-Tracing*. Encyclopedia of Optical Engineering, Marcel Dekker, 2004.

[Barreiro, 2000] Barreiro, J.: *La jota aragonesa*. Caja de Ahorros de la Inmaculada, 2000.

[Bass, 2001] Bass, M., editor: *Handbook of Optics*, McGraw-Hill, 2001.

[Beach, 1993] Beach, D.; Shotwall, A.; Essue, P.: *Applications of lasers and laser systems*.

Prentice-Hall, 1993.

[Berlien, 1993] Berlien, H.; Müller G., editors: *Applied laser medicine*. Springer-Verlag, 1993.

[Bloembergen, 1992] Bloembergen, N.: *Nonlinear optics*. Addison-Wesley, 1992.

[Borelli, 2004] Borelli, N.: *Microoptics technology*, 2ª edición. Marcel Dekker, 2004.

[Boreman, 1999] Boreman, G. D.: *Fundamentos de electro-óptica para ingenieros*. SPIE Optical Engineering Press, 1999.

[Born, 2002] Born, M.; Wolf, E.: *Principles of Optics*, 7ª edición. Cambridge University Press, 2002.

[Brenner, 2004] Brenner, K.; Jahns, J.: *Microoptics: from technology to applications*. Springer series in Optical Sciences, Springer, 2004.

[Calvo, 2002] Calvo, M. L., editor: *Óptica avanzada*. Ariel, 2002.

[Casas, 1994] Casas, J.: *Óptica*. Librería Pons, Zaragoza, 1994.

[CNF, 2005] Cornell Nanoscale Science and Technology Facility, [www.cnf.cornell.edu](http://www.cnf.cornell.edu). University of Cornell. New York, USA (acceso 20/6/2005).

[Cowley, 2005] Cowley, L.: *Atmospheric optics*, [www.sundog.clara.co.uk/atoptics/phenom.htm](http://www.sundog.clara.co.uk/atoptics/phenom.htm) (acceso 20/6/2005).

[Dereniak, 1996] Dereniak, E.; Boreman, G.: *Infrared detectors and systems*. John Wiley and Sons, 1996.

[Driggers, 2003] Driggers, R.: *Encyclopedia of optical engineering*. Marcel Dekker, 2003.

[Edens, 2005] Edens, H.: *Weatherphotography*, [www.weather-photography.com/index.php](http://www.weather-photography.com/index.php) (acceso 20/6/2005).

[Edwards, 1993] Edwards, K.; Llewellyn, R.: *Optometría*. Masson-Salvat, 1993.

[EEES, 2005] Espacio Europeo de Educación Superior, <http://eees.universia.es>. Portal Universia S.A. (acceso 20/5/2005).

[EUO-UCM, 2005] Especial sobre la Escuela Universitaria de Óptica de la UCM. Ver y Oír, 195. Mayo, 2005.

[handsonoptics,2005] Optical Society of America - SPIE [www.hands-on-optics.org](http://www.hands-on-optics.org) (acceso 20/6/2005).

[Falk, 1986] Falk, D.; Brill, D.; Stork, D.: *Seeing the light: Optics in nature, photography, color, vision and holography*. Harper & Row, 1986.

[Fanin, 1987] Fanin, T.; Grosvenor, T.: *Clinical Optics*. Butterworths, 1987.

[Feynman, 1988] Feynman, R. P.: *Electrodinámica cuántica*. Alianza, 1988.

[Frieden, 2001] Frieden, B. R.: *Probability, statistical optics and data testing*. Springer, 2001.

[Gandolfo, 2003] Gandolfo, M.: *Introducción al alumbrado*. Philips Ibérica, 2003.

[Gaskill, 1978] Gaskill, J.: *Linear Systems, Fourier transforms and optics*. John Wiley and sons, 1978.

[Gillies, 1948] Gillies, M.; Minnaert, J.: *The nature of light and colour in the open air*, Dover publications, 1948.

[Goldsmith, 1998] Goldsmith, P.: *Quasioptical systems: Gaussian beam quasioptical propagation and applications*. IEEE Press, 1998.

[González-Cano, 2003] González-Cano, A.: *Introducción a la historia de la Óptica*. Madrid, 2003.

[González-Cano, 2004] González-Cano, A.: *Un poema del siglo de oro español sobre los anteojos*. Óptica pura y aplicada, 2004, pp. 37, 33-43.

[Goodman, 1996] Goodman, J.: *Introduction to Fourier Optics*, 2ª edición. McGraw-Hill, 1996.

[Goodman, 2000] Goodman, J.: *Statistical Optics*. Wiley Interscience Publications, 2000.

[Greene, 2003] Greene, D.: *Light and dark. An exploration in science, nature, art and technology*. Institute of Physics Publishing, 2003.

[Grimm, 1857] Grimm, J.; Grimm, W.: *Blancanieves. Cuentos de Hadas*, 1857. Cátedra, 1986.

[Grosvenor, 2004] Grosvenor, T.: *Optometría de atención primaria*. Masson, 2004.

[Hanish, 1993] Hanish, R. J.; White, R. L.: *The restoration of HST images and spectra*. The Space Telescope Science Institute, 1993.

[Hecht, 1993] Hecht, J.: *Understanding lasers: an entry-level guide*. Wiley IEEE Press, 1993.

[Hecht, 1999a] Hecht, E.: *Óptica*. Addison-Wesley Iberoamericana, 1999.

[Hecht, 1999b] Hecht, J.: *The laser guidebook*. McGraw-Hill Professional, 1999.

[Holst, 1998a] Holst, G.: *CCD arrays, cameras, and displays*. JCD Publishing-SPIE Optical Engineering Press, 1998.

[Holst, 1998b] Holst, G.: *Sampling, aliasing, and data fidelity for electronic imaging systems, communications, and data acquisition*. JCD Publishing-SPIE Optical Engineering Press, 1998.

[HST, 2005] Hubble Space Telescope, [www.stsci.edu/hst/](http://www.stsci.edu/hst/) (acceso 20/6/2005).

[Hubel, 1999] Hubel, D. H.: *Ojo, cerebro y visión*. Universidad de Murcia, 1999.

[IMM, 2005] Instituto de Microelectrónica de Madrid, [www.imm.cnm.csic.es](http://www.imm.cnm.csic.es). Centro Nacional de Microelectrónica, CSIC (acceso 20/6/2005).

[Irving, 2005] Irving, B.: *Optics for kids*, [www.opticalres.com/kidoptx.html](http://www.opticalres.com/kidoptx.html). Optical Research Associated (acceso 20/6/2005).

[javaoptics, 2005] Grup d'Innovació docent en Òptica Física i Fotònica: *Curso de Óptica en Java*, [www.ub.es/javaoptics](http://www.ub.es/javaoptics) Universitat de Barcelona (acceso 20/6/2005).

[Joannopoulos, 1995] Joannopoulos, J.; Meade, R.; Winn, J.: *Photonic crystals*. Princeton University Press, 1995.

[Kasap, 2001] Kasap, S. O.: *Optoelectronics and photonics*. Prentice Hall, 2001.

[Kawata, 2002] Kawata, S.; Ohtsu, M.; Irie, M., editores: *Nano-optics*. Springer, 2002.

- [Können, 1985] Können, G. P.: *Polarized light in nature*. Cambridge University Press, 1985.
- [Leibovic, 1990] Leibovic, K. N.: *Science of vision*. Springer-Verlag, 1990.
- [Lindsey, 1991] Lindsey, J. L.: *Applied illumination engineering*. Fairmont Press, 1991.
- [Lynch, 2001] Lynch, D. K.; Livingston, W.: *Color and Light in Nature*. Cambridge University Press, 2001.
- [Mahajan, 1991] Mahajan, V.: *Aberration Theory Made Simple*. SPIE Optical Engineering Press, 1991.
- [Malacara, 1989] Malacara, D.: *Óptica básica*. Fondo de Cultura Económica, 1989.
- [Malacara, 1992] Malacara, D.: *Optical shop testing*. John Wiley and Sons, 1992.
- [Mandel, 1995] Mandel, L.; Wolf, E.: *Optical Coherence and Quantum Optics*. Cambridge University Press, 1995.
- [Mansuripur, 2002] Mansuripur, M.: *Classical optics and its application*. Cambridge University Press, 2002.
- [Martínez-Antón, 2005a] Martínez-Antón, J. C.: *Óptica geométrica*  
[www.ucm.es/info/aocg/pie2002\\_4/index.htm](http://www.ucm.es/info/aocg/pie2002_4/index.htm) (acceso 20/6/2005).
- [Martínez-Antón, 2005b] Martínez-Antón, J. C.: *Litografía de onda evanescente. Hacia la nano-estructuración tridimensional de superficies*. Actas de la Primera Jornada Complutense de Investigación en Óptica, Optometría y Ciencias de la Visión, 2005, pp. 53-54.
- [McCluney, 1994] McCluney, R.: *Introduction to radiometry and photometry*. Artech House, 1994.
- [McComb, 1997] McComb, G.: *Lasers, Ray Guns and Light Cannons*. McGraw-Hill/TAB Electronics, 1997.
- [Minnaert, 1993] Minnaert, M. G. J.: *Light and color in the outdoors*. Springer Verlag, 1993.
- [Murdoch, 1994] Murdoch, J.: *Illumination engineering: from Edison's lamp to the laser*. Visions Communications, 1994.

- [Nanospain, 2005] Red Española de Nanotecnología. [www.nanospain.org/nanospain.htm](http://www.nanospain.org/nanospain.htm). Phantoms Foundations (acceso 20/5/2005).
- [Newton, 1730] Newton, I.: *Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*, edición inglesa 1730. Alfaguara, 1977.
- [Niemz, 1996] Niemz, M.: *Laser-tissue interactions*. Springer-Verlag, 1996.
- [NIF, 2005] National Ignition Facility. [www.llnl.gov/nif/](http://www.llnl.gov/nif/) (acceso 20/6/2005).
- [LIA, 2005] Laser Institute of America.: *Laser Pointer Safety*, [www.laserinstitute.org/publications/safety\\_bulletin/laser\\_pointer/](http://www.laserinstitute.org/publications/safety_bulletin/laser_pointer/) (acceso 20/6/2005).
- [Novotny, 2006] Novotny, L.; Hecht, B.: *Principles of Nano-Optics*. Cambridge University Press, 2006.
- [NRC, 1998] National Research Council. Committee on Optical Sciences and Engineering: *Harnessing light: optical science and engineering for the 21<sup>st</sup> century*. National Academy Press, 1998.
- [Ohtsu, 1999] Ohtsu, M.; Hori, H.: *Near-Field Nano-optics: From basic principles to nano-fabrication and nano-photonics (Lasers, Photonics, and Electro-optics)*. Plenum Publishing Corporation, 1999.
- [opticseducation, 2001] Optics Society of America, SPIE. *Optics Education - A blue print for the 21<sup>st</sup> century, OSA-SPIE, 2001*. [www.osa.org/news/release/12.2001/Final Blueprint Dec 2001.pdf](http://www.osa.org/news/release/12.2001/Final%20Blueprint%20Dec%202001.pdf) (acceso 20/6/2005).
- [opticsforkids, 2005] Optical Society of America. [www.opticsforkids.com](http://www.opticsforkids.com) (acceso 20/6/2005).
- [opticsforteens, 2005] Optical Society of America. [www.opticsforteens.org](http://www.opticsforteens.org) (acceso 20/6/2005).
- [Paisner, 1994] Paisner, J.; Manes, K.: *The National Ignition Facility: An Overview*. Energy and Technology Review, 1994, pp.1-6.
- [Palanker, 2005] Palanker, D.; Vankov, A.; Huie, P.; Baccus, S.: *Design of a high resolution optoelectronic retinal prosthesis*. Journal of Neural Engineering, 2, S105-S120 (2005).

- [Palmer, 1999] Palmer, S. E.: *Vision Science. Photons to Phenomenology*. Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [Paul, 2004] Paul, H.: *Introduction to Quantum Optics: From light quanta to quantum teleportation*. Cambridge University Press, 2004.
- [Pedrotti, 1996] Pedrotti, F.; Pedrotti, L.: *Introduction to optics*. Prentice-Hall International, 1996.
- [Pedrotti, 1999] Pedrotti, L.; Pedrotti, F.: *Optics and vision*. Prentice-Hall, 1999.
- [Peli, 1995] Peli, E.: *Vision models for target detection and recognition*. World Scientific, 1995.
- [Prasad, 2003] Prasad, P.: *Introduction to biophotonics*. Wiley-Interscience, 2003.
- [Prasad, 2004] Prasad, P.: *Nanophotonics*. Wiley Interscience, 2004.
- [PSNF, 2005] Penn State Nanofabrication Facility, [www.nanofab.psu.edu](http://www.nanofab.psu.edu). Pennsylvania State University. Pennsylvania, USA (accesso 20/6/2005).
- [Ready, 1997] Ready, J.: *Industrial applications of lasers*. Academic Press, 1997.
- [Rodieck, 1998] Rodieck, R. W.: *The first steps in seeing*. Sinauer Associates Inc., 1998.
- [Rosenblum, 1992] Rosenblum, W. Benjamin, W.: *Selected papers on special significance to Optometry*. SPIE Optical Engineering Press, 1992.
- [Rossing, 1990] Rossing, T. D.: *The science of sound*. Addison-Wesley, 1990.
- [Russ, 1995] Russ, J. C.: *The image processing handbook*. CRC, 1995.
- [Saleh, 2001] Saleh, B. E. A.; Teich, M. C.: *Fundamentals of photonics*. Wiley and Sons, 2001.
- [ScientificAmerican, 2002] Scientific American.: *Understanding Nanotechnology*. Warner Books, 2002.
- [Scully, 1997] Scully, M.; Zubiary, M.: *Quantum optics*. Cambridge University Press, 1997.

- [Seckel, 2005] Seckel, A.: *The great book of optical illusions*. Firefly Books, 2005.
- [Shannon, 2003] Shannon, R.; Wyant, J. C., editores: *Applied Optics and Optical Engineering*. Academic Press (serie), 2003.
- [Siegman, 1986] Siegman, A. E.: *Lasers*. University Science Books, 1986.
- [Sloney, 1980] Sloney, D.; Wolbarsht, M.: *Safety with lasers and other optical sources*. Plenum Press, 1980.
- [Smith, 1990] Smith, W. J.: *Modern optical engineering. The design of optical systems*. McGraw-Hill, 1990.
- [Smith, 1997] Smith, G.; Atchinson, D.: *The eye and visual optical instrumentation*. Cambridge University Press, 1997.
- [SNF, 2005] Stanford Nanofabrication Facility, <http://snf.stanford.edu>. University of Stanford California, USA (acceso 20/6/2005).
- [Sobel, 1987] Sobel, M. I.: *Light*. University of Chicago Press, 1987.
- [Soroko, 1996] Soroko, L. M.: *Meso-optics. Foundations and applications*. World Scientific, 1996.
- [Stork, 2004] Stork, D.: *Optics and the old masters revisited*. Optics and Photonics News, 15, marzo, 2004, pp. 30-37.
- [Taflove, 2001] Taflove, A.; Hagness, S.: *Computational electrodynamics. The finite difference time domain method*. John Wiley and Sons, 2001.
- [Tilley, 2000] Tilley, R.: *Colour and the optical properties of materials*. John Wiley and Sons, 2000.
- [Townes, 2001] Townes, C. H.: *How the laser happened: adventures of a scientist*. Oxford University Press, 2001.
- [V-Dinh, 2003] V-Dinh, Tuan, editor: *Biomedical photonics handbook* CRC-Press, 2003.
- [Valle-Inclán, 1924] Valle-Inclán, R. M.: *Luces de Bohemia*, 1924. Espasa Calpe, 1998.

[Wandell, 1995] Wandell, B. A.: *Foundations of vision*. Sinauer Associates, 1995.

[Waynant, 2002] Waynant, R. W., editor: *Lasers in medicine*. CRC Press, 2002.

[Williamson, 1983] Williamson, S. J.; Cummins, H. Z.: *Light and color in nature and art*. John Wiley and Sons, 1983.

[Wolf, 2004] Wolf, E., editor: *Progress in Optics*. Elsevier (serie).

[Wyszecki, 2000] Wyszecki, G.; Stiles, W.: *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. John Wiley and Sons, 2000.

[Yager, 1997] Yager, D., editor: *Non invasive assessment of the visual system*. Trends in optics and photonics series, 11, Optical Society of America, 1997.

[Yus, 2000] Yus, J.: *Vivero de coplas de jota: adagios de humor y pensamiento*. Edición del autor, 2000.

[Zollinger, 1999] Zollinger, H.: *Color: a multidisciplinary approach*. Wiley-VCH, 1999.





