

FORMACION Y VALORACION DE LA IMAGEN OPTICA

Por el

ILMO. SR. D. JUSTINIANO CASAS PELÁEZ

Excelentísimo Sr. Presidente,

Excelentísimos e Ilustrísimos señores Académicos,

Señoras y señores:

Cuando esta ilustre Academia tuvo a bien designarme como miembro para compartir sus quehaceres, sentí la satisfacción natural del que llega al más alto peldaño de la honorabilidad, y, con ella, el desasosiego propio de quien recibe una distinción que no marca precisamente, como es usual, el fin de una tarea felizmente coronada, sino el principio de una responsabilidad, el comienzo de una actuación en la cual uno tiene que hacerse acreedor a los méritos que le permitan ostentar airoosamente el galardón que, en honor a la confianza, le ha sido concedido por anticipado.

Pueden estar seguros los señores Académicos de que, en la medida de mis fuerzas, pondré todo mi entusiasmo en ser digno de la acogida que me dispensan.

En este sendero de preocupaciones, la primera que me obsesiona es el pensar que vengo a relevar en su puesto al Prof. D. Mariano Velasco Durantez, lo que tiene para mí un significado especial. Conozco muy bien al profesor Velasco porque a él me ligan desde hace mucho tiempo profundos lazos de amistad, motivados, de un lado, por una constante relación científica basada en nuestra idéntica especialidad, y, de otro, por nuestra común manera de pensar como paisanos nacidos entre las labranzas de la dura tierra castellana y crecidos bajo su cielo azul con horizontes sin límites.

En él he tenido siempre un gran estímulo para mi trabajo, un consejero leal, y un gran instigador en su día para que abrazara la cátedra y viniera a sustituirle en la Universidad de Zaragoza.

Hoy he sido llamado también a sustituirle en su silla de académico y sé bien lo que representa para mí el ser sucesor de un hombre con tantas virtudes, entre las que resaltan su sabiduría, su bondad, el amor a su profesión y a sus semejantes, la sencillez y la modestia al par con su envidiable laboriosidad.

Don Variano Velasco, nació en Villacón (Palencia) en 1897, estudió su Licenciatura en las universidades de Salamanca y Madrid, doctorándose en esta última con el "Premio Echegaray". En 1931 ganó por oposición la Cátedra de Optica de la Universidad de Zaragoza y en 1952 ocupó por concur-

so la correspondiente de la Universidad de Barcelona, siendo nombrado miembro de esta Academia en octubre de 1945.

En su vida científica colaboró con los profesores españoles Blas Cabrera y Julio Palacios en el laboratorio de Investigaciones Físicas en Madrid. Con E. Rutherford en el Cavendish Laboratory de Cambridge, con C. D. Ellis en el King's College de la Universidad de Londres y con R. Scherrer en la Technische Hochschule de Zurich. Fruto de su gran capacidad de trabajo e incansable actividad son los numerosos artículos publicados sobre la refracción molar, moléculas polares, y sobre la estructura fina en la absorción de rayos X.

A su fructífera labor docente desarrollada en la cátedra, hemos de añadir una colección de publicaciones en las que se ponen de manifiesto sus singulares dotes pedagógicas, y entre las que figuran "Física General", en tres tomos; "Prácticas de laboratorio de Física", "Pasado y presente del Radar y sus aplicaciones", etc.

No cabe duda de que un hombre con estas cualidades científicas y humanas siempre es difícil de sustituir.

La segunda de las preocupaciones a que antes he aludido fue la elección de tema para este discurso. A fuer de físico, recorrí el panorama de la Física actual, en el que existen paisajes cautivadores, conquistas recentísimas que han requerido una elaboración mental de extraordinaria profundidad. Pero existen también problemas tan viejos como la propia humanidad que conservan al mismo tiempo la novedad, no sólo de no estar resueltos, sino de aparecer cada día con nuevas exigencias.

A uno de estos problemas: "La formación y valoración de la imagen óptica", ha dedicado el que os habla la mayor parte de su vida científica, y del que, abusando de vuestra benevolencia, quiere haceros partícipes en estos momentos, no sin antes rendir público homenaje de gratitud a las personas que con su ayuda han hecho posible este feliz suceso, debiendo comenzar en orden temporal por mi querido tío, Ilmo. Sr. D. Justiniano Casas Barrero, gracias a cuyo esfuerzo y sacrificio pude seguir en la vida la senda intelectual, en la que he podido remar arropado siempre por el amor a la ciencia que él supo despertar en mí.

A los Excmos. Sres. D. José María Otero Navascués y D. Armando Durán Miranda, cuya contribución a la Óptica es bien conocida internacionalmente, y gracias a cuyos esfuerzos se puso en marcha el cultivo de esta ciencia en nuestro país. Bajo su dirección me inicié en la investigación científica, y de ellos he recibido siempre los mejores estímulos y ayudas para el desarrollo de mi labor.

A todos mis colaboradores, que no puedo citar de nómine porque ya van siendo muchos. Ellos son verdaderamente quienes han contrastado y convertido en realidad mis modestas ideas.

Finalmente, a mi esposa, que sin exigencias, y con un formidable espíritu de renuncia, ha sabido estimularme y anteponer a todo mi dedicación a la ciencia y a la Universidad.

FORMACION Y VALORACION DE LA IMAGEN OPTICA

Cualquier descripción del mundo sería incompleta si no diera una explicación de los procesos físicos y fisiológicos por medio de los cuales el hombre hace sus observaciones. Esta descripción científica debe a su vez incluir una explicación de las ligaduras entre el cerebro humano y aquellos entes: átomos, moléculas, etc., cuya existencia se postula para de algún modo describir las observaciones que, en fin de cuentas, se hacen siempre a través de nuestros sentidos.

Históricamente se ha reconocido que una gran parte de nuestras observaciones se realizan por medio de la luz y la visión. Hoy se estima que más del 50 % de la información que recibimos del mundo exterior se hace a través del sentido de la vista, por las percepciones conscientes que en nuestro cerebro producen los estímulos retineanos, originados por las imágenes que la parte anterior del ojo, unas veces por propia cuenta, y otras con ayuda de instrumentos, forma sobre su retina.

Pero no siempre se ha entendido así este proceso que encadena el estímulo físico, en forma de energía radiante, con la sensación y la percepción, aunque desde las más remotas civilizaciones se ve que el hombre siente verdadera preocupación por explicar el fenómeno de la visión.

Este intento que en sus principios no trascendió del marco de la más pura filosofía, considerándolo como facultad anímica exclusivamente, dio lugar a uno de los más bellos capítulos de la filosofía natural: la Óptica.

Para las mentes helénicas del siglo V a. C., que es donde se encuentran los primeros tratamientos de la cuestión, cualquier información de un objeto distante debería hacerse estableciendo de algún modo un *contacto* de nuestra alma con el objeto visto, debiendo existir un *algo* por medio del cual se realizara este contacto. Este "algo" es lo que hoy llamamos *luz*.

Estas ideas están perfectamente expresadas en un escrito atribuido a Leucipo de Mileto¹, de la escuela atomística de Demócrito, donde dice "Todas nuestras percepciones son táctiles; todos nuestros sentidos son variedades del tacto. Por tanto, si nuestra alma no sale de nuestro interior para ir a tocar a los objetos exteriores, es necesario que estos objetos vengán a tocar a nuestra alma pasando a través de los sentidos. Pero nosotros no vemos que los objetos se nos acerquen cuando los percibimos, debiendo ocurrir por tanto que ellos envíen a nuestra alma algo que los represente: imágenes (εἰδολα), especies de sombras o simulacros materiales que revistiendo los cuerpos se agitan en su superficie y pueden desprenderse para traer a nuestra alma las formas, los colores y todas las demás cualidades de los cuerpos de los cuales emanan".

La escuela pitagórica opinaba, según escritos de Apuleyo² (430 a 365 antes de C.), que la visión se producía por un fuego invisible que saliendo

1 J. TROUËSSART. — *Recherches sur quelques phénomènes de la Vision*. Brest, Anner, 1854.

2 Ver V. RONCHI. — *Storia della Luce*. Znichelli, 1952.

de los ojos iba a tocar y explorar los objetos a modo de tentáculo, poniéndonos de manifiesto las formas y colores.

Esta teoría puramente táctil, que no pudo explicar por qué en la oscuridad no se veían los objetos, ni por qué cuando los cuerpos se calentaban se hacían visibles ellos y sus circundantes, duró 14 siglos, y, con ella como principio, Euclides sentó las bases de la Óptica geométrica sobre el concepto de rayo emitido por el ojo.

Finalmente hay que citar la teoría de Aristóteles, según la cual la visión se producía por un movimiento o alteración del medio entre el ojo y el objeto, que aunque no tuvo seguidores, tuvo al menos la virtud de detener las investigaciones por medio de los instrumentos ópticos durante 20 siglos (hasta Galileo) por haber sostenido la idea de que cualquier instrumento puesto entre el ojo y el objeto perturbaba la visión, produciendo un engaño, y que, por tanto, cualquier información obtenida de este modo sería falsa.

Como aportaciones a la aclaración del fenómeno de la visión en épocas sucesivas, son dignas de mencionarse la de Galeno (130-201 d. C.), dando la anatomía del ojo, con su nervio óptico por el cual salían los efluvios del cerebro hasta el cristalino, que era la parte sensible donde se hacía el contacto del fuego interno con los simulacros atomistas, según las ideas de su contemporáneo Platón.

Ocho siglos después encontramos una importante contribución del mundo árabe con Alhazen (965-1039 d. C.) para quien definitivamente la luz va de los objetos a los ojos comportándose en la reflexión como los proyectiles en el choque elástico, lo que da entrada al criterio mecanicista. Esta misma idea es utilizada por Descartes (1596-1650) para explicar la ley de la refracción y, modificada, llega hasta Newton (1642-1726).

En el intermedio aparece la figura de Juan Kepler (1571-1630), en cuya obra "Ad Vitellionem Paralipomena", da importantes y nuevos conceptos sobre la luz y la visión. Respecto a la luz dice textualmente: "A la luz compete la propiedad de efluir o de ser lanzada por su fuente hacia un lugar lejano". "Desde un punto cualquiera la luz efluye según un número infinito de direcciones, siendo por sí misma apta para avanzar hasta el infinito. Las líneas de esta emisión son rectas y se llaman "rayos".

Salvo que no se pronuncia sobre la naturaleza de la luz, la óptica newtoniana queda diseñada con las citadas palabras.

Respecto a la visión, establece de un modo definitivo el concepto actual sobre la localización del estímulo en la siguiente frase: "Digo que la visión tiene lugar cuando la imagen de todo el hemisferio del mundo que está ante el ojo, y aún un poco más, se forma sobre la superficie cóncava rosada de la retina".

Un nuevo rumbo toman los problemas de la luz con Descartes (1596-1650), dando definitivamente las leyes de la óptica geométrica; pero sobre todo con el P. Grimaldi (1618-1663), de quien en 1665 aparece un volumen titulado "Phycomathesis de Lúmine", donde se ponen de manifiesto los fenómenos de difracción; y con Robert Hooke (1635-1703), quien en su libro

"Micrografía", aparecido también en 1665, además de dar impulso a la microscopía, intenta una explicación de los colores interferenciales en las láminas delgadas.

Tanto él como Grimaldi necesitan que la luz tenga algo periódico, bien sea sustancia o movimiento y esto prepara la fase siguiente en que aparecen en el escenario científico las dos grandes figuras: Newton (1642-1726), sustentando la teoría de la emisión corpuscular, la cual desemboca en una óptica geométrica que adquiere con Fermat su estamento definitivo, y Huygens (1629-1695) con su teoría ondulatoria, que no pudo abrirse paso, debido a la autoridad de Newton, hasta un siglo después en que en 1801 Thomas Young da la teoría de las interferencias y A. Fresnel (1788-1827) las de la difracción y polarización en los medios anisótropos.

Esta teoría alcanza su unidad con Maxwell en 1864 al asignar a las ondas luminosas naturaleza electromagnética, con lo que la teoría ondulatoria adquiere el estado en que hoy la conocemos.

Los progresos sobre el conocimiento de la naturaleza de la luz continúan, y en 1900, con Plank, nace la teoría cuántica, y con ella la incómoda situación de la dualidad onda corpúsculo que da origen a la Mecánica cuántica.

No obstante estos progresos sobre el conocimiento de la naturaleza de la luz, y mucho antes de ser alcanzados, se inicia un divorcio entre el progreso de la Óptica instrumental y las teorías de la luz, que realmente todavía padecemos en nuestros días, y no parece que esté en vías de arreglo inmediato.

La óptica instrumental sigue progresando sobre los conceptos geométricos y la teoría geométrica de las aberraciones, que alcanza su esplendor con Abbe, Seidel y Petzval a mediados del siglo XIX, y puede decirse que es la única que en la actualidad guía el diseño de instrumentos.

Un hecho insólito tiene lugar sin embargo en 1835, en que el astrónomo inglés y director del observatorio de Greenwich, Airy, da la teoría para calcular la distribución de luz en la mancha de difracción que un instrumento ideal produce en la imagen de un punto, cuya obra se completa en 1884 con Kirchhoff, quien da correcto estamento matemático al principio de Huygens para ondas escalares, con lo cual queda abierta la puerta a la teoría difraccional de las imágenes.

En esta época se tienen por tanto las bases para unificar la teoría geométrica de los instrumentos con la ondulatoria, pero lejos de llegarse al acuerdo entre las dos teorías, que en esencia son la misma, el divorcio se hace cada vez más patente. Los calculadores de instrumentos siguen aferrados a sus métodos geométricos, mientras que la teoría ondulatoria progresa por un camino que bien pudiéramos llamar teórico, ya que en la práctica no es primordialmente utilizado como material de diseño.

De cualquier modo se llega a una importante conclusión: la imagen que un instrumento real da de un punto, nunca es un punto, sino una mancha. La calidad de la imagen depende de la forma, tamaño y distribución de la luz en esta mancha, y estas circunstancias dependen a su vez del lugar en que la imagen sea recogida.

Si se pretenden hacer instrumentos de alta calidad, debe entenderse que se trata de instrumentos que den alta y permanente calidad de imagen. Entonces cabe preguntarse ¿Qué entendemos por calidad de imagen? ¿Cuándo podemos decir que una imagen es buena? ¿Qué criterios seguros tenemos para decidir sobre la calidad de la imagen?

Y viene aquí como anillo al dedo aquella frase de Lord Rayleigh: "Cuando se puede medir aquello de que se habla y expresarlo por números, se sabe algo a su respecto; sin medidas, el conocimiento es escaso e insuficiente".

Pero acontece que en una imagen no se pueden hacer fácilmente medidas que valoren su calidad, ya que el único criterio para saber cuál es la mejor imagen que da, por ejemplo, una cámara fotográfica, es obtener una serie de fotografías con distintas exposiciones y enfoques, presentar esta colección a un grupo de observadores y aceptar como mejor aquella que la mayoría repunte como tal.

Análogamente diríamos de los instrumentos de visión. Cuando un observador enfoca su telescopio o microscopio, en realidad no hace sino seleccionar lo que él considera como la mejor imagen.

El problema de la valoración de una imagen es por tanto en todos los casos un problema psicológico que apareja la gravedad de reducir a números una apreciación psicológica, lo que no puede llevar otro camino que el estadístico.

Hoy, llevadas las cosas por estos derroteros estadísticos, parece haberse llegado a la conclusión bastante segura de que una imagen es buena cuando en ella se cumple un determinado compromiso entre tres variables que tienen una correcta definición física: el poder resolutivo, el contraste y la nitidez de reproducción de una línea que separa una playa clara de una oscura. Lo difícil está en determinar a priori este compromiso en cada caso. Así, para un retrato la imagen puede ser considerada como buena si una cámara la produce con gran suavidad, aunque en ella se pierdan un sin fin de detalles menores. Es decir, que cuando observamos un retrato, instintivamente entre en juego nuestro sentido artístico. Si esta cámara la utilizáramos, sin embargo, para catastro o reconocimientos aéreos, el mismo observador diría que las fotografías que producen son detestables por su baja calidad en la reproducción de detalles.

Pero, lógicamente, no tendría ningún significado el valorar una imagen por el simple hecho de valorarla, si esto no se hiciera con miras más elevadas. Los problemas de valoración de la imagen se manifiestan con todas sus exigencias cuando se trata de construir un instrumento al cual a priori hay que exigirle una calidad en la reproducción, pues no tendría objeto haber gastado millones en hacer el prototipo para después comprobar desoladamente que el instrumento no da la calidad esperada.

Y aquí es donde surge el verdadero problema: ¿Cómo se le dice en cifras al proyectista la calidad psicológica que el presunto observador espera del instrumento?, y lo que es peor aún, ¿cómo puede el ingeniero que proyecta relacionar los parámetros geométricos que él maneja en el proyecto,

que no son otros que radios de curvatura de las lentes, espesores e índices de refracción, con la psicología del observador medio? ¿Cuál es la cadena que enlaza una colección de parámetros geométricos con los subjetivos de una sensación?

La resolución de esta cuestión ha consumido y consume la vida de un crecido número de científicos que todavía están aportando datos parciales para tratar de llegar a la síntesis final.

En el lento proceso de realización de un instrumento óptico se comienza por un anteproyecto en el cual, a la vista de las exigencias de campo que se ha de observar, aumentos y luminosidad, se fijan los diámetros de lentes y diafragmas, y las potencias operando sobre lentes delgadas que después se sustituyen por lentes reales gruesas.

Con este planteo previo se hace el paso de los rayos que proceden de un punto del objeto para ver si todos ellos van al punto imagen, y se van modificando los radios, índices y espesores de las lentes hasta conseguirlo. Pero ocurre que esto no se puede conseguir. En contadas circunstancias todos los rayos que salen de un punto cualquiera del objeto y atraviesan el sistema van después a un punto, dando así lugar a una imagen defectuosa o como decimos los ópticos, con aberraciones.

La imposibilidad de obtener una imagen perfecta en el más amplio sentido espacial desde el punto de vista geométrico, radica en la incompatibilidad de las condiciones de Abbe y Herschell, es decir, en los propios principios de la óptica geométrica.

Por si esta imposibilidad fuera poco, la luz se manifiesta con su carácter ondulatorio, y al pasar por los orificios del sistema se producen los fenómenos de difracción, lo que conduce a que aun cuando el sistema fuera perfecto desde el punto de vista geométrico, o bien, que todos los rayos que salen de cualquier punto del objeto fueran a un punto de la imagen, entre las ondas se producen fenómenos de interferencia que dan lugar a que la imagen de un punto sea una mancha rodeada de anillos alternativamente claros y oscuros.

Es decir que por cualquier camino que se ataquen los problemas, existen causas de imposibilidad que por principio son insuperables.

Pudiéramos decir, por tanto, que la óptica instrumental es una ciencia absurda, que trata de hacer instrumentos perfectos yendo en contra de sus propios principios, lo que acarrea, como es lógico, la natural penitencia.

Es cierto también que consigue instrumentos cuya calidad de imagen nos asombra por su bondad, pero en general con trampa; porque desde que el proyectista comienza a hacer un instrumento, en todo instante le preside una idea fundamental: engañar al observador, engañar al ojo.

Mas para que este engaño pueda producirse es menester conocer bien al sujeto engañado al objeto de atacarle en sus puntos flacos. Esto ha hecho que los estudios fisiológicos sobre el ojo, a los que en su día prestó gran contribución nuestro compatriota Cajal, como hoy los presta la relevante escuela de Optica fisiológica creada por José María Otero, junto a los correspondientes a la psicología de la percepción visual, hayan sido y sean en la actualidad objeto de gran preocupación, y también que se hayan reali-

zados profundos estudios sobre el comportamiento de los sistemas ópticos a fin de compaginar las posibilidades del instrumento con las debilidades del observador.

Un ejemplo sensacional de engaño de tipo psicológico lo tenemos en el cine. Durante mucho tiempo se ha perseguido la realización del cine en relieve sin éxito, hasta que E. Chretien hizo el "cinemascope". Se sabe que el ojo en grandes extensiones no ve las cosas planas, sino curvas, como ocurre con la bóveda celeste, el horizonte, etc. También cuando miramos a panoramas extensos nuestro campo visual es más amplio en sentido horizontal que vertical, y que cuando miramos a una escena amplia vemos una zona bien enfocada y el resto con borrosidad. Pongámosle pues al ojo un cine con amplia pantalla rectangular curva, enfoquemos de un modo especial la parte de la pantalla donde se produce la escena que reclama la atención del espectador y ajustemos el sonido de modo que proceda del punto de la pantalla donde parece que debe producirse, la sensación de relieve será extraordinaria.

Otros engaños tienen su fundamento en la anatomía, en el sentido de ver hasta qué punto el ojo es capaz de discernir detalles debido a la granularidad de su retina. La retina es como un mosaico de terminales de células nerviosas, y dos estímulos que caigan dentro de la misma pieza, no los percibiría el ojo sino como uno sólo. Si las manchas que de un punto produce un instrumento en su imagen son más pequeñas que las piezas del mosaico, el ojo encontrará al instrumento perfecto, si son mayores considerará que la imagen es borrosa. Algo análogo pudiéramos decir de las cámaras fotográficas; éstas serán de buena calidad en el discernimiento de detalles si el proyectista consigue que la mancha imagen puntual sea menor que el grano de la emulsión. Todo lo cual produce un gran alivio en el límite de afino del proyecto.

Históricamente, debido al mayor desarrollo de la óptica geométrica, los instrumentos se hacían sin más que reducir las aberraciones geométricas al mínimo posible, y como los campos y aperturas de aquellos antiguos instrumentos eran extraordinariamente pequeños, las aberraciones prácticamente se anulaban. Los aparatos mayormente en uso eran los telescopios que tenían exigencias mínimas, y entonces la imagen de una estrella aparecía como una mancha originada casi exclusivamente por los fenómenos de difracción, cuya distribución de luz podía calcularse a priori teóricamente. Y como quiera que al observar estrellas la única que importaba era que los instrumentos tuvieran buen poder resolutivo para poder ver separadas estrellas angularmente muy próximas entre sí, comenzó a tomarse como parámetro único que respondiera de la calidad de la imagen el poder resolutivo.

La situación la resume L. E. Howlett³ en las siguientes palabras: "La resolución en ausencia de aberraciones vino a ser considerada como la propiedad intrínseca de la geometría del sistema —y añade— fue una desgracia que esta manera de pensar se convirtiera en hábito, cuando había que

3 L. E. HOWLETT. — *Optical Image Evaluation*. N. B. S. Circ. 526 (1954).

prestar atención a los objetivos fotográficos en los que las imágenes están limitadas por las aberraciones residuales”.

El problema, de todos modos, se va perfilando y aparecen delimitadas dos cuestiones: por un lado la calidad de la imagen y, por otra parte, la situación de la mejor imagen, siendo clamor unánime por parte de los instrumentistas que estas cuestiones se resuelvan en función de las aberraciones geométricas.

En el aspecto de la calidad, como acabamos de decir, en principio se tomó el poder resolutorio como único factor determinante, lo cual no dejaba de ser criterio operante cuando los instrumentos se utilizaban para observar objetos puntuales y debido a las pequeñas exigencias de campos y aperturas estaban prácticamente corregidos de aberraciones, entonces el criterio de Lord Rayleigh era suficiente. Cuando estos parámetros fueron ampliándose se vio que la presencia de aberraciones modificaba la estructura de la mancha reduciendo la concentración de luz en el disco central de la difracción y aumentándola en los anillos. En 1894, a la vista de estas circunstancias, vino a tomarse como medida de la calidad de la imagen el número de Strehl, definido por el cociente entre la intensidad luminosa en el centro de la mancha cuando existen aberraciones, y la intensidad en el instrumento ideal de igual apertura.

En 1919, Conrady⁴ publica los primeros trabajos sobre la distribución de luz en la imagen en presencia de pequeñas aberraciones. Lo que se obtuvo de provecho con ello lo refleja un comentario del ruso G. G. Sliusarev⁵ en 1933, quien dice “El estudio experimental de la dependencia entre el poder resolutorio y las aberraciones geométricas de los sistemas, presenta una grave dificultad y hasta hoy no ha sido efectuado, aunque de ello pudieran derivarse resultados importantes para el cálculo. A fin de que la prueba de la calidad de la imagen producida por instrumentos ópticos ya construidos pueda dar un resultado bien determinado e indiscutible, es necesario establecer las características en base a las cuales se pueda apreciar el sistema no sólo del lado cualitativo sino también del cuantitativo. Tales características deberán consentir una valoración numérica de la propiedad más importante y necesaria de un sistema óptico. Aun cuando no existen hasta hoy criterios de tal suerte y general aceptación, es indudable que uno de los más importantes lo suministra el poder resolutorio. —Y añade— aunque ello podría ser calculado en teoría, los cálculos sin embargo son insufribles”.

De todo ello saca como consecuencia que un juicio definitivo sobre la bondad de la imagen de un instrumento solamente puede darse por la experiencia sobre un ejemplar construido.

Como se ve, en esta época se siguen haciendo instrumentos por método de tanteo, desechando aquellos que después de construidos no producen una imagen de calidad deseable. Pero el criterio sigue aferrado al poder resolutorio para objetos puntuales como único factor determinante de la calidad.

4 A. E. CONRADY. — *Monthly Notices*, p. 575 (1919).

5 G. G. SLIUSAREV. — *Calcolo dei sistemi ottici* (Trad. italiana).

En el aspecto de los objetos puntuales para el caso de pequeñas aberraciones se ha progresado hasta el límite y pudiéramos decir que existe ya un cuerpo de doctrina que da a priori toda la respuesta del instrumento, incluso se ha logrado modificar la mancha imagen por medio de la apodización, introducida por Couder y Jaquinot, consistente en la supresión de los anillos de difracción.

El estudio de la relación que existe entre los fenómenos de difracción y aberraciones con la forma y tamaño de la mancha imagen, así como su influencia en la distribución de luz dentro de la misma, no ha recibido la misma atención por parte de los investigadores desde los comienzos de la Óptica hasta nuestros días. Mientras existe un cuerpo de doctrina que nos permite conocer la influencia de la difracción, no podemos afirmar lo mismo en lo que se refiere a las aberraciones, aun sabiendo que la descripción de la mancha imagen en función de las aberraciones que afectan al sistema es lo que determina el comportamiento óptico de muchos instrumentos y, por lo tanto, constituye una de las grandes aspiraciones de todos aquellos que están interesados en la óptica instrumental.

En confirmación de ello dice G. Kuwara en 1955⁶: "Para un sistema ideal, libre de aberraciones, la distribución de luz en la imagen de un punto luminoso ha sido resuelta teóricamente por la óptica ondulatoria. Sería muy deseable el tratar de una manera análoga un sistema con aberraciones, esto es, encontrar la relación entre la distribución de luz en la imagen y las aberraciones del sistema expresadas geoméricamente, puesto que la mayor parte de los problemas de la Óptica de las lentes, tales como la calidad de la imagen, localización del plano de mejor imagen, etc., están relacionadas con el carácter de esta distribución de luz en el punto imagen".

Como se ve, en nuestros días continúa el divorcio entre los proyectistas de instrumentos y los teóricos de la imagen respecto a su calidad y situación, y aunque el problema de los objetos puntuales, está bastante adelantado, el de los objetos extensos sigue en pie.

El objeto extenso se caracteriza por estar formado por zonas de claridad y color diferentes. Aun prescindiendo de la coloración a fin de no complicar el problema, para llegar a definir la calidad de la imagen, que como se ha dicho depende de la reproducción de contrastes y de la nitidez de líneas, se ha hecho necesario tipificar los objetos y se ha venido a tomar como objeto tipo el formado por bandas paralelas de igual anchura alternativamente claras y oscuras (test de Foucault).

Si en el objeto estas barras son blancas y negras, de contraste unidad, y bordes nítidos, en la imagen aparecerán grises oscuros los negros y grises claros los blancos, es decir que se produce una disminución del contraste. Los bordes nítidos de las barras se suavizan, estableciéndose en ellos un gradiente de luminosidad, cuyo valor numérico se toma como medida de la nitidez. Finalmente, si el número de barras por unidad de longitud aumenta, el contraste entre ellas puede reducirse tanto que en lugar de barras se vea una playa gris. La distancia mínima entre las barras para que se vean como tales da una medida numérica del poder resolutivo.

6 GORO KUWARA. — J. O. S. A. 43 (1953) y 45 (1955).

Pero ¿cómo saber a priori, o en cualquier etapa del proyecto de un instrumento cómo van a suceder estas cosas en la imagen?

En los últimos años, como en toda la Física, se ha llegado en este aspecto a resultados teóricos de extraordinaria profundidad y complicación. Afortunadamente el desarrollo de los métodos de cálculo electrónico ha permitido llevar a cabo los estudios necesarios.

Entre los pioneros en estos trabajos debemos citar a Duffieux⁷ que introduce la transformada de Fourier y puede decirse que ello es la base de partida de todos los estudios modernos, en los que han destacado, Wolf en Norteamérica, H. H. Hopkins y Linfoot en Inglaterra, Miyamoto en Japón y Marechal y Françon en Francia.

Gracias a esta introducción de la transformada de Fourier se pueden obtener una relación entre el reparto de claridades en el objeto y la correspondiente de la imagen por medio de operaciones de convolución. A tales efectos se descompone el objeto en un sistema de armónicos de distintas frecuencias y orientaciones (frecuencias espaciales). El sistema óptico al transmitirlos actúa sobre ellos con un factor de atenuación que depende de su frecuencia y orientación. Estos armónicos transmitidos y atenuados componen la imagen, dándonos su reparto de luz y contrastes y, por tanto, también la nitidez y el poder resolutivo en un plano determinado.

Planteado así el problema, se observa que a medida que aumenta la frecuencia de los armónicos, aumenta fuertemente el factor de atenuación, llegándose a una frecuencia de corte por encima de la cual el sistema ya no transmite. Viene así a comportarse un sistema óptico como un filtro electrónico de paso de baja, y esta unificación de los problemas electrónicos y ópticos ha permitido introducir en la Óptica instrumental la teoría de la información, en cuyos trabajos se ha distinguido Gabor. La función de atenuación respecto a las frecuencias espaciales es la llamada "función de transmisión óptica" (transfer function), y aunque todavía no ha dado sus frutos de aplicación práctica, se tiene gran esperanza en sus posibilidades.

Pudiéramos, pues, decir que esta forma de operar constituye el último avance de la cuestión en la determinación apriorística de la calidad de la imagen en un plano.

Pero, por otra parte, los cultivadores de la óptica geométrica intentan también resolver estos problema a su modo, y entre ellos merece citarse a Herzberger⁸ quien con su "spot diagram", estudiando el reparto de los impactos que los rayos que atraviesan la pupila de un instrumento producen alrededor del punto imagen, halla una distribución de luz muy semejante a la que dan teorías más acabadas. Ciertamente que no es tan exacta, pero tiene al menos para el calculador la ventaja de que la obtiene con el mismo material con que lleva a cabo la corrección del sistema.

En el año 1961, sobre esta problemática, todavía escribe Miyamoto⁹: "Cuando los proyectistas tratan de aplicar estos útiles resultados al cálculo

7 P. M. DUFFIEUX. — *La integral de Fourier et ses applications a l'Optique*. Besançon, 1946.

8 M. HERZBERGER. — *Modern Geometrical Optics*. Interscience (1958).

9 K. MIYAMOTO. — *Progress in Optics*. I, 33. North Holl., 1961.

de sistemas, encuentra un gran obstáculo, las recientes investigaciones sobre la formación y evaluación de la imagen dependen de la Óptica ondulatoria, mientras que los calculadores acuden a la óptica geométrica según su vieja tradición, teniendo buenas razones para ello entre otras por la comodidad de cálculo. Por estas razones la relación entre los dos métodos ha permanecido oscura cuantitativamente y el cambio de ideas entre los seguidores de unos y otros es más bien insatisfactoria".

Y en el año 1960, escriben Françon y Marechal¹⁰: "La evolución de la mancha de difracción en presencia de aberraciones es un problema complejo; se pueden emplear para estudiarla desarrollos en serie cuando las aberraciones son pequeñas, o asintóticos cuando son grandes, pero estamos desprovistos de medios para estudiarlas cuando las aberraciones son intermedias".

En concreto, no estamos mucho mejor que al principio. Cuando las aberraciones son pequeñas, manda la difracción y la teoría escalar hecha en 1864 (hace un siglo) por Kirchhoff es suficiente. Cuando son grandes, en las grandes aperturas, es la óptica geométrica quien suministra los elementos de juicio. En el paso intermedio, que es el grave, no sabemos a qué atenernos.

Con todo, el progreso es enorme y no cabe duda de que tarde o temprano, más bien temprano, se resolverá el hallar las características físicas de la imagen en un plano. Pero aun en este supuesto cabe todavía hacer la pregunta que nos hicimos en principio. ¿Cómo se compagina esto con la sentencia del último juez, el ojo? De ello parece que nadie se preocupa en principio.

Nosotros en nuestras modestas investigaciones llevadas a cabo en Zaragoza, en colaboración con Merino, Valdés, Arias e Yzuel, hemos tratado de sondear el ojo para ver cuál es su respuesta ante una imagen aberrante tanto en instrumentos fotográficos como telescópicos, y hemos encontrado sistemáticamente que el ojo encuentra su mejor imagen donde menos lo podíamos esperar; en el caso de sistemas astigmáticos, para aperturas medias, y grandes, el ojo encuentra que un instrumento produce su mejor imagen en el lugar donde las deformaciones de la imagen de un punto son nada menos que los segmentos de recta correspondientes a las imágenes sagitales, y en el tren de cálculo de sistemas que lleva nuestro entrañable colaborador J. R. F. Moneo, se calcula sobre estas bases.

LA TEORIA DE IMAGENES EN EL FUTURO

Como hemos visto, la teoría y valoración de las imágenes ha perseguido hasta ahora fundamentalmente resolver el problema para instrumentos visuales y cámaras fotográficas tal como sus cometidos se han desarrollado en el pasado.

El futuro, ya presente, reserva, sin embargo, importantes tareas que atacar, cuando todavía no se han acabado los problemas anteriores.

10 A. MARECHAL y M. FRANÇON. — *Difraction*. Rev. D'Opt. (1960).

En primer lugar nos plantea problemas importantes la utilización de los *laser*. Estas fuentes de luz de alta intensidad permiten hacer fotografías con exposiciones mucho más cortas que con las corrientes lámparas de destello, lo cual se estima que ha mejorado la calidad de las imágenes en un factor diez. Por otra parte, el hecho de que su luz sea totalmente coherente, plantea los inevitables problemas a la teoría difraccional, puesto que toda la luz procedente de objetos extensos puede interferir, ya que aunque proceda de puntos muy distantes la coherencia está asegurada para pulsos de 10^7 m. de longitud.

La Óptica con fibras está haciendo progresos formidables. En la actualidad se hacen fibras cuyo diámetro es menor que el de la mancha de difracción con aparatos clásicos de apertura relativa equivalente. Por otra parte, en las propias fibras se puede producir efecto *laser* obteniéndose así imágenes con una impresionante amplificación de luminosidad, lo que sin duda planteará serios problemas a la teoría de las imágenes.

Los sistemas de telemunicación del futuro, sobre todo los espaciales, parece que vuelven sus ojos hacia los métodos ópticos por medio de *lasers* y diodos de inyección en sustitución de radares y otros métodos basados en ondas medias y cortas. La recepción planteará nuevos problemas a la citada teoría.

Los receptores físicos intentan desplazar en primera instancia al ojo para evitar lo que pudiera considerarse como una tara psicológica, y con ello la respuesta incierta. Por otra parte las placas fotográficas van disminuyendo el tamaño de su grano, sin menoscabo de la sensibilidad.

Así mismo, los modernos sistemas con óptica de infrarrojo y ultravioleta dotados de detectores de imagen fluorescente son otros tantos ejemplos de tareas que requieren atención.

Por si esto fuera poco, todavía ni siquiera se ha pensado en introducir en las mencionadas cuestiones instrumentales el concepto cuántico de la luz por considerarse hasta ahora inoperante, pero no cabe duda de que todo ello impedirá descansar a la Óptica, esta vieja ciencia que, como ciencia de la luz ha ido alumbrando constantemente los senderos por los que ha discurrido la Física en su progreso.

Con estas consideraciones hago punto final para que pueda hacer uso de la palabra mi querido colega Prof. Juan Cabrera, a quien agradezco vivamente la gentileza de apadrinarme en este solemne acto.

HE DICHO