

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

DISCURSO

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN

POR EL

Excmo. Sr. D. José María Otero de Navascués

Y

CONTESTACIÓN

DEL

Excmo. Sr. D. José María Torroja y Miret

EL DÍA 6 DE JUNIO DE 1945



MADRID

Domicilio de la Academia: VALVERDE, 22

Teléfono 12529

1945

DISCURSO

DEL

Excmo. Sr. D. José María Otero de Navascués

EXCMOS. SEÑORES, SEÑORAS, SEÑORES:

Este afán de buscar las últimas causas de los fenómenos, que en los que por vocación, actividad profesional o ambas cosas a la vez dedicamos nuestras facultades al estudio de la Filosofía Natural, provoca un hábito tan arraigado que constituye casi como una segunda naturaleza, me ha llevado a tratar de explicar el hecho, para mí tan inesperado como preñado de responsabilidad, de mi elección para ocupar este sitio.

Desechando, *a priori*, eventuales merecimientos por mis trabajos, ya que de acuerdo con el símil de Newton he pagado el más mínimo hallazgo, concha en la playa infinita del conocimiento, con el descubrimiento de océanos de mi ignorancia, no encuentro más que dos hipótesis posibles para explicar el hecho que trato de analizar.

Constituye la primera la bien cimentada tradición científica que disfruta la Marina, a la que me honro en pertenecer, así como la justa gloria conquistada, en el lustro que lleva de existencia, por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, verdadero Adelantado de la Ciencia e Investigación nacionales, de cuyas actividades modestamente participo, tradición y gloria que han de realzar la personalidad de sus más oscuros colaboradores, del mismo modo que el rayo del sol, al difractarse en el polvo de la atmósfera, lo nimba de bellos colores y lo hace visible.

Pero además de esta causa, que me hace disfrutar de congruo de vuestro favor, al serme imputados los méritos científicos de las colectividades a que pertenezco, veo otra que tal vez haya contribuido más, a que hoy me vea entre vosotros, y es la tutela benévola que tantos miembros de esta Casa han

ejercido y ejercen sobre mi vida científica; así, volviendo al recuerdo de mis años de formación, veo mi proyecto de fin de carrera fundado en un meritísimo trabajo recién publicado a la sazón, del que era autor un Académico. Entre los componentes de esta Corporación figura, asimismo, el que separándome del cultivo de la técnica dirigió mis pasos hacia la Filosofía Natural, encauzando durante largos años mis estudios y formación; otro de vosotros me inició en las tareas investigadoras antes de marchar al Extranjero, donde coincidí en la misma Facultad de un famoso centro de investigación con uno de vuestros miembros más jóvenes, cimentando allí con él una firme amistad, y por último varios de vosotros desarrolláis vuestra tarea científica e investigadora en el mismo Centro que lo hago yo y habéis sido, con vuestro ejemplo siempre y muchas veces con vuestro paternal consejo y cariño, acicate para mis modestos trabajos, difuminando sus muchas faltas y realzando sus escasos méritos, tanto dentro como fuera de nuestra patria.

En estas condiciones nada tiene de extraño que el cariño, contagioso como todo lo bueno y lo malo, os llevase a suplir la carencia de méritos propios, convirtiendo en realidad este llamamiento a colaborar en vuestras tareas.

A tan grandísima merced ha de corresponder una gatitud a la Academia pareja a ella, y al expresarla públicamente en esta ocasión, para mí tan solemne, me permitiréis lo haga extensivo, por lo antes dicho, a la Marina, a quien soy deudor de toda mi formación científica, y al Consejo Superior de Investigaciones, quien colocándome siempre muy por encima de mis méritos, ha hecho posible mi modesta labor investigadora.

Me encuentro, pues, en el mismo sitio y coyuntura por la que todos habéis pasado y salvado, con la tranquilidad de aquel justo, que acompañado de sus buenas obras, en vuestro caso superabundantes méritos científicos, se presenta al Supremo Tribunal, mientras que yo me hallo semejante al humilde pecador que todo lo tiene que fiar en la Infinita Misericordia.

Mi confusión es aún mayor al venir a llenar el hueco causado por el fallecimiento de aquel gran sabio e inolvidable maestro de tantos químicos españoles, Excmo. Sr. D. Angel del

Campo y Cerdán. Sin haber tenido la dicha de tratarle con asiduidad, el diario contacto y la intimidad con muchos de sus colaboradores y discípulos más destacados, en cuya vida y obra tiene siempre reflejos la del Maestro, han permitido que su figura fuese para mí casi familiar.

Así como la grandeza de una nación puede medirse por la huella perdurable que su genio imprime sobre los otros pueblos, la fecundidad de una vida humana puede valorarse por la calidad de los frutos que su influencia hace germinar en el círculo social en que actúa, y con este criterio no cabe duda que la vida de Del Campo ha dado frutos de bendición desde el triple punto de vista de maestro, investigador y hombre.

Como maestro ha dejado una pléyade de discípulos que hoy llenan nuestras Universidades y Laboratorios, poniendo en práctica sus enseñanzas y métodos, llevando impregnados no tan sólo la fría técnica, sino aquel calor vital y profunda honradez científica y profesional que fueron su patrimonio. Pero la influencia que ejerció en la enseñanza no se redujo exclusivamente a su cátedra y laboratorio. Con conciencia clara de lo que la realidad del país exigía y con el tesón que da el conocimiento profundo de una Verdad, contribuyó decisivamente al cambio en el plan de estudios de la Sección de Químicas de nuestras Facultades de Ciencias, dándole la estructura que desde 1922, y con ligeras y recientes variaciones, tiene en la actualidad.

Como hombre de Ciencia tuvo la gloria Del Campo de fundar la Escuela de Espectroscopistas, que en sus dos ramas de análisis espectral y análisis espectroquímico han sido de gran fecundidad, dando a conocer ventajosamente el nombre de España entre los más famosos cultivadores de dichas especialidades. Su labor en este aspecto se escalona entre los años 1909 y 1919, fundandò y dirigiendo la Sección de Espectrografía del Laboratorio de Investigaciones Físicas del Instituto Nacional de Ciencias Físico-Naturales, hasta su transformación en 1931, organizando allí los primeros cursos de análisis espectral, creando un vivero de investigadores y contribuyendo decisivamente a los descubrimientos que dieron el espaldarazo definitivo a la Escuela de espectroscopistas españoles.

Pero tanto como en estos aspectos, la figura de Del Campo tuvo influencia por su sencilla personalidad humana, cuyas cualidades de bondad, desinterés y auténtico señorío, fueron espejo para sus discípulos y ejemplo para compañeros y colaboradores. Estas dotes humanas suyas, que le atrajeron el amor de tantos cultivadores de las ciencias, se pusieron de relieve, en forma fuertemente emotiva, cuando al celebrar recientemente la Real Sociedad Española de Física y Química, de la que fué presidente y cuya vicepresidencia ostentaba al ocurrir su fallecimiento, una sesión de homenaje a su memoria, vimos surgir de toda España trabajos científicos de discípulos de Del Campo, que si por una parte mostraban la fecundidad de su escuela, indicaban por otra el cariño y veneración al maestro.

Elegido en 1927 como miembro de número de esta Real Academia, tomó posesión en el año siguiente, leyendo un meritísimo trabajo sobre el sistema periódico de los elementos químicos. Representó a España en varios Congresos internacionales, y era miembro de la Legión de Honor Francesa, siendo numerosas sus publicaciones científicas. ¡Descanse en paz!

* * *

EVOLUCION DE LOS CONCEPTOS FISICOS SOBRE EL FENOMENO DE LA VISION

Reglamentariamente mi discurso ha de versar sobre un tema científico, y para usar de vuestra benévola atención he escogido el de la evolución del pensamiento físico sobre algunos aspectos del fenómeno de la visión.

Muchas razones me han inclinado a ello, y no es la menos importante el que aún tratándose de un tema de carácter general, comprende dicho estudio alguno de mis temas de investigación preferidos, con lo que, al menos al tratar de asuntos en cierto modo familiares, pongo previamente de mi parte todos los elementos para que este trabajo, que siempre ha de quedar muy por bajo de lo que la Academia merece en tal oca-

sión, alcance el máximo nivel que mis escasas fuerzas consientan.

El fenómeno de la visión, en su sentido más amplio, esto es, ver e interpretar lo visto, es de gran complejidad, interviniendo en él factores físicos, fisiológicos y psíquicos, que desgraciadamente pocas veces son considerados simultáneamente, y su estudio armónico constituye ciencia aparte, cuya síntesis no se ha realizado hasta hace poco más de un lustro por Luckiesh y Moss en su *Science of Seeing*.

Por la visión, la energía radiante seleccionada por el ojo se convierte en luz, hecho que se olvida con demasiada frecuencia, ya que, como hace notar Heisenberg (1), un ciego de nacimiento puede aprender y comprender toda la Óptica, sin que todo este estudio le proporcione el más mínimo conocimiento de lo que es la luz y el color.

¡Luz! Palabra sublime con que la voz del Creador disipó por primera vez las Tinieblas del Caos primigenio, convirtiendo la Tierra de "inanis et vacua", según las palabras del Génesis, en centro capaz de albergar la vida y el Hombre.

La Humanidad siempre ha considerado la Luz como algo básico, y los conceptos primarios de luz y tinieblas están tan anclados en lo más profundo de la mente de los pueblos, que sus raíces filológicas, como hace notar Seegert (2), han permanecido casi inalteradas en todas las lenguas de tronco indogermánico desde los remotos tiempos en que estos pueblos vivían en el hogar común, y así nuestra Luz española es Lux en latín, Lumière en francés, Luce en italiano, Lutsch en ruso, en la acepción de rayo luminoso; la misma voz en búlgaro; Liknos en griego, restringido, sin embargo, a la acepción de mantial luminoso; Licht en alemán, Ljus en las lenguas nórdicas, Light en inglés, mientras que nuestra noche es Nox en latín, Nuit en francés, Notte en italiano, Nosti en viejo búlgaro, Notsch en ruso, Nacht en alemán, Nahts en viejo gótico, Nat en danés, Night en inglés y Nyx en griego. Son, además,

(1) W. HEISENBERG.—Zur Geschichte der Physikalischen Naturerklärung. Ber. Sächs. Akad. Wiss. 85, 1933.

(2) SEEGERT.—Das Licht in der Gedankenwelt der Völker. *Das Licht*. 5-7, 1935.

innumerables las locuciones, refranes y modismos que relacionan en todas estas lenguas, siempre con completo paralelismo, el nacer y la vida con la Luz, y el morir y la muerte con la noche. Es como si ante este fenómeno de la Luz creada por Dios como uno de los supremos dones del hombre, la Torre de Babel, con sus terribles premisas y consecuencias que hoy contemplamos horrorizados, cesase de dividir a los pueblos y éstos, al unísono, saludasen hermanados al Creador.

El estudio del fenómeno de la visión ocupó la mente de los filósofos y científicos más eminentes desde los tiempos más remotos, considerándolo cuestión crucial de toda la Optica, pudiendo afirmarse que hasta que no se resolvió en forma definitiva el problema de su mecanismo, la Optica, como tal ciencia, no pasó de un estado embrionario, careciendo de base y sentido todas las teorías de la Luz como ente físico y abstracto, pudiendo considerarse la Optica fisiológica como el tronco principal de aquella ciencia, de la cual fueron desgajándose la Optica geométrica primero y la física más tarde.

Pronto, sin embargo, comenzaron los físicos a desentenderse de la Optica fisiológica, culminando esta tendencia en el pasado siglo, que, imbuído totalmente de un mecanicismo materialista, miraba con prevención al fenómeno luminoso, que no permitía, por su índole necesariamente subjetiva, ser encuadrado en los modelos mecánicos en boga, llegándose hasta el absurdo de iniciarse con Euler el método de tratar objetivamente y prescindiendo por completo del ojo, último juez, en definitiva, del antejo y el microscopio, instrumentos que al no ser más que servidores y auxiliares de aquél, han de formar necesariamente cuerpo con el órgano visual, y si se prescinde en su construcción de éste, las consecuencias pueden ser catastróficas, como tendremos ocasión de considerar más adelante.

El desdén de los físicos por la Optica fisiológica, hizo que esta ciencia fuese cultivada casi exclusivamente por fisiólogos y psicólogos a quienes faltaba el necesario atuendo físico y matemático para poder abordar con éxito muchos de sus problemas, siendo necesario que surgiesen genios como los de Young, Helmholtz y Gullstrand, que a su profesión inicial

de médicos, unían una formación física y matemática de calidad excepcional, para que aquella ciencia saliese del estancamiento en que estaba postrada y alcanzase el nivel con que la recogió el siglo xx.

Hoy las cosas han cambiado radicalmente: Las trágicas peripecias ocurridas al tratar de explicar con los modelos clásicos algunos fenómenos de la Física, principalmente en el desarrollo de las teorías Cuántica y de la Relatividad, han sido el “memento homo” con que la Providencia ha querido abatir la soberbia del físico que en la segunda mitad del siglo xix, ebrio de materialismo, veía con sonrisa de triunfo cómo todos los fenómenos ópticos que surgían al conjuro de hábiles experimentadores, se encuadraban maravillosamente en el modelo electromagnético; y hoy el físico ha tenido que renunciar para siempre a una completa objetividad de los fenómenos, poniendo al principio de la indeterminación una barrera infranqueable al conocimiento íntimo de las cosas. Con esto se ha despejado el camino para que no desdeñe el enfrentarse con problemas en los que células y tejidos sustituyen a la materia inerte y en los que la objetividad ha de obtenerse con números estadísticos.

Otros hechos han desviado hacia la óptica fisiológica la atención de los estudiosos de la Física; me refiero al gran desarrollo que modernamente han alcanzado algunas aplicaciones de aquella ciencia en los que el fenómeno visual juega un importante papel; citemos la fotometría, la luminotecnia, la ciencia del color y la óptica instrumental. Los cultivadores de las mismas han tenido que enfrentarse con problemas de óptica fisiológica de una importancia extraordinaria en la valoración cualitativa y cuantitativa del fenómeno físico en unidades sensoriales, y hoy, en el fragor de la contienda, se han desenvuelto considerablemente, y con fines casi estrictamente militares, algunos capítulos de la Óptica fisiológica, como es el de la visión nocturna, tan importantes para marinos, aviadores... y aun para casi todos los habitantes de los países beligerantes, sumergidos en las tinieblas en cuanto llega la noche.

Los estudios aplicados y las investigaciones sobre óptica fisiológica pura, nos han proporcionado mayores conociemien-

tos sobre el fenómeno de la visión. La marcha es más rápida; la Humanidad tardó muchos siglos en averiguar que en el fondo del ojo se formaban las imágenes del mundo exterior, y hoy los nuevos fenómenos se encadenan en sucesión vertiginosa, pero la meta está lejana. Todavía nos debatimos en dudas sobre la esencia íntima de la percepción de los colores, la fisiología de la acomodación, los límites y el origen de la agudeza visual, los valores umbrales y otros muchos problemas. Por ello, conviene no despreciar la obra de las generaciones que nos precedieron, pues de su estudio detenido hemos de sacar provechosas enseñanzas. Hijo de historiador, desde la infancia aprendí que la Historia es la maestra de la vida, y la del conocimiento científico en una determinada dirección ha de ser siempre sumamente provechosa; por ello, al limitar mi estudio a algunos aspectos físicos y químicos de la visión, recorreré brevemente las etapas históricas que nos han llevado a nuestro estado actual de conocimientos, con la ventaja de que los antiguos, en sus teorías, encerraban una poesía y belleza de que carecen las áridas especulaciones de nuestros días.

Al bosquejar este periplo histórico, es tan poco lo que se sabe de los conocimientos ópticos de las civilizaciones que precedieron al período helénico, que necesariamente hemos de comenzar por él.

El fenómeno de la visión en los griegos.

Los filósofos griegos del período helénico propiamente dicho (siglo VI al IV a. de J.), consideraban dos escalones fundamentales en el conocimiento: El superior (“episteme”), que les había de permitir entrar en la esencia íntima de las cosas, y otro inferior (“dianoia”) con el que buscaban las leyes de la naturaleza, investigando lo permanente en el devenir de los fenómenos. A este segundo grado, aun dándole importancia, lo consideraban tan sólo como el prelude de la sinfonía propiamente dicha constituida por el “episteme”.

Heisenberg pone de manifiesto en un acertado ejemplo, la

diferencia entre “Episteme” y “Dianoia” (1), considerando un hombre justo a quien conocemos bien y que ha realizado una mala acción, cuyos móviles, en un principio, nos parecen incomprensibles. Podemos, para resolver el enigma, hacernos aclarar los detalles por aquellos que conocen lo sucedido, y, una vez en posesión de todos los datos, podemos ir comprobando los argumentos, y después de un detallado examen, concebir por qué ha realizado esa mala acción. A esa concepción corresponde el “Dianoia”. O bien, podemos de pronto sentirnos iluminados, como si un velo hubiese caído delante de nuestra vista y juzgar: este hombre tuvo que obrar de esta manera. Este modo del conocimiento puede corresponder a lo que Platón denomina “Episteme”. Esta distinción es sobremañera importante en el estudio de los fenómenos, ya que la filosofía natural moderna ha renunciado a la primera para contentarse con la segunda. Esto es, estudia las leyes y renuncia a las cosas.

Por lo dicho, al tratar de comprender los fenómenos en su esencia íntima, para los griegos, óptica y visión estaban estrechamente enlazadas, siendo necesario que una teoría de la visión llevase superpuesta una teoría de la luz.

Fuera de este punto de vista fundamental, existen otros dos hechos, que es preciso tener en cuenta al estudiar las teorías de la visión de los griegos. El primero es el defectuoso conocimiento que éstos tuvieron, hasta Galeno, de la anatomía del ojo, y el segundo, la ignorancia casi absoluta en que nos hallamos del verdadero significado que los filósofos griegos daban a los diversos conceptos técnicos de sus teorías, significado muchas veces alterado por el criterio de traductores y copistas y que discreparía posiblemente de la acepción vulgar del vocablo, de tal modo que hoy nos encontramos ante un texto griego poco más o menos como el traductor de una obra técnica, que, aun conociendo bien el idioma original, fuese completamente lego en las materias de que trata.

En cuanto a los orígenes del pensamiento filosófico griego, por lo que al fenómeno de la visión se refiere, es lo más

(1) W. HEISENBERG.—Loc. cit.

probable que sus conocimientos proviniesen de Babilonia, análogamente a lo atestiguado por Herodoto para otras ramas de la Física, siendo por otra parte difícil llegar a una filiación directa por la costumbre de los filósofos, singularmente de los oradores de Escuela, de no citar a los predecesores que les habían suministrado el material de partida.

Al tratar de explicar el fenómeno de la visión, los griegos siguen, con ligeras variantes, cuatro modelos o escuelas que podemos resumir así:

1.^a La luz es una emanación del ojo que se dirige a los objetos vistos. (Escuela pitagórica.)

2.^a La visión está producida por una emanación de los objetos que hiere al ojo, provocando la sensación luminosa. (Escuela atomística o de Demócrito.)

3.^a El fenómeno luminoso está provocado por dos emanaciones: Una, que parte del ojo y va a los objetos, y otra, de naturaleza distinta, que, partiendo del objeto, impresiona el ojo.

4.^a La visión se provoca por una modificación que sufre el medio interpuesto entre los cuerpos y el ojo.

Como buenos filósofos, agotan todas las hipótesis posibles.

Los representantes de la primera Escuela tienen su primer definidor en Arquitas de Tarento, contemporáneo de Platón. Arquitas, recogiendo parcialmente las ideas de Empedocles, sostiene que la luz proviene exclusivamente de un fuego invisible que sale de los ojos. La idea de este fuego invisible proviene, sin duda, de la creencia de los hindús de que el ojo es de naturaleza ígnea. A estas emanaciones, cuyo contacto con los objetos mirados, revelaban sus formas y colores, las llama Arquitas rayos visuales, denominación que perduró hasta el siglo XVII.

La doctrina pitagórica tuvo un extraordinario auge, siendo su crédito muy superior al de las otras tres, y a ella se adhieren casi todos los físicos del mundo antiguo, pudiendo decirse que durante quince siglos no tuvo rival, siendo preciso remontarse a Al-Hazen para encontrar otra que le superase, en lógica primero, y en crédito más tarde. Euclides la perfeccionó, considerando a los rayos visuales como un cono que,

con sus vértices en el ojo y con sus generatrices a modo de hilos sensibles, provocaban en su contacto con los cuerpos la sensación luminosa. Para Euclides, los rayos son ligeramente divergentes, quedando algún vacío entre ellos, explicándose de este modo el hecho de que, cuando tratamos de buscar un objeto pequeño, una aguja en el suelo, por ejemplo, no lo encontramos en seguida, aunque miremos al sitio en que suponemos está, pues para verla es preciso que uno de los rayos visuales tropiece con él.

Euclides, por otra parte, cree encontrar en el hecho de la forma globular del ojo un apoyo a la doctrina pitagórica, ya que, salvo la vista, todos los sentidos que operan con emanaciones exteriores: gusto, tacto y olfato, aparecen localizados en sitios entrantes y, en cambio, el ojo es convexo para ayudar a la emanación de rayos visuales. Otro pitagórico, Alkmaion, da la primera anatomía del órgano visual; y en el hecho de que al oprimirnos un ojo se produce lo que en la actualidad llamaríamos fosfeno luminoso, encuentra un argumento a favor de la teoría pitagórica, afirmando que la sensación es producida por el fuego visual, que tiende entonces a salir del ojo.

Claudio Ptolomeo es el último gran seguidor de la doctrina pitagórica en el mundo antiguo, transmitiéndola con pocas variaciones a la Edad Media.

Esta teoría del rayo visual domina, como hemos dicho, todas las demás, debiendo buscar esta preponderancia en su sencillez y en el defectuoso conocimiento de la anatomía del ojo que tenían los antiguos, ya que suponían que la sensación visual, en analogía con los otros sentidos, era transmitida por contacto en la superficie exterior del ojo, y con esta premisa les era muy difícil a los partidarios de las doctrinas de emisión, el explicar cómo en las emanaciones o emisiones de los cuerpos se conservaban las formas y colores de los mismos hasta llegar al ojo.

Por otra parte, es notable el hecho de que, comenzando con la literatura india, todas las lenguas del orbe están llenas de imágenes poéticas que relacionan al ojo con astros, fuego, etc.,

y dándole atributos de brillo y fulgor que presupone una naturaleza ígnea y emisiva.

Casi al mismo tiempo que la doctrina pitagórica, se abre paso la de la escuela atomística, representada fundamentalmente por Leucipo y Demócrito. Según el primero, cualquier percepción es de carácter táctil y todos los sentidos son una variedad del tacto. Como el alma no puede salir de nosotros para tocar los objetos exteriores, es preciso que aquéllos manden al alma algo que los represente; esto es, imágenes “eidola”, sombras o simulacros, que se agitan en la superficie de los cuerpos y pueden desprenderse de ellos para hacer llegar al ojo la forma, el color y el resto de sus cualidades. Su discípulo, Demócrito, da una variante de esta teoría en el sentido de que estas emanaciones o imágenes actúan previamente sobre el aire circundante y a través de él llegan al ojo, donde por su naturaleza sólida y continua se imprimen sobre el mismo, llegando al alma.

Las imágenes o “eidola” son los átomos, y el sol ciega, porque su “eidola” está compuesta de átomos ígneos.

Esta doctrina estaba fundada principalmente en la observación de las imágenes del mundo exterior que se forman por reflexión en la superficie de la córnea, y tal vez los fenómenos de espejismo y de calima, muy frecuentes en Grecia, con sus imágenes temblorosas de los objetos lejanos, contribuyeron a reforzar la creencia de los simulacros o eidola, desprendiéndose de los objetos y marchando a imprimirse sobre el ojo.

La doctrina atomística tuvo menos difusión que la de la escuela pitagórica, siendo su principal dificultad la explicación de la conservación de formas, posición relativa y colores de las imágenes en su largo camino del objeto al ojo.

A esta doctrina se adhirieron, sin embargo, Teofrasto y Epicuro, recogiendo Platón en sus diálogos como la opinión de su minoría. En ella, críticos benévolos, han creído poder saludar un anuncio de la teoría corpuscular de la luz tal como la desarrolló Newton.

Ya desde un principio existía una tendencia consistente en conciliar ambas teorías, haciendo necesarias dos emana-

ciones para que la visión de los objetos pudiera realizarse. Empedocles de Agrigento es el primero que postula esta doctrina, afirmando que la luz es emanación del fuego externo que llega al ojo como el sonido al oído y el olor al olfato, pero al lado de esto considera necesario otro flujo: el del ojo al objeto.

Del encuentro de ambos, nacen las formas y colores engendrados en el camino entre el ojo y el objeto. Existen, pues, dos flujos, uno objetivo y extrasensorial en el que van en potencia formas y colores, y otro subjetivo, que partiendo del ojo, da vida y permite percibir aquéllos. Platón se adhiere a la doctrina de Empédocles y, según él, del ojo fluye continuamente, mientras está abierto, una luz interna indispensable para la visión y que fuera del ojo se asocia íntimamente con una luz externa cosanguínea, que puede provenir del sol o de los objetos luminosos e iluminados. Donde la luz externa falta, se extingue el rayo visual.

Galeno, último representante de esta doctrina, sustituye este rayo visual, cuya existencia niega, por un humor visual que al tocar el aire proporciona la unión con el objeto.

Por último, la cuarta doctrina tiene en Aristóteles su fundador y campeón más destacado. Para él, el medio entre el ojo y el cuerpo, que denomina "diáfano", es lo esencial para la visión. El diáfano, en la oscuridad, tiene esta propiedad tan sólo en estado potencial, siendo preciso para que actúe un manantial de luz exterior. La luz es, pues, la "entelequia" o el alma del diáfano, y el color un proceso secundario, que únicamente la visión hace posible. Esta doctrina, pese a la inmensa autoridad del Estagirita en otros campos de la Filosofía, cayó en el olvido, recogiénola tan sólo algunos autores árabes.

Todas estas doctrinas de base experimental tan pobre se prestaban a una crítica fácil, y así vemos cómo los partidarios de una escuela atacan los puntos débiles de la doctrina contraria, poniéndolos de manifiesto con más o menos donaire. Aristóteles arguye en contra de los pitagóricos, preguntándoles cómo es posible que, si de los objetos sale fuego a modo de una linterna, no se vea en la oscuridad. Por otra parte, afirma que los rayos visuales por analogía con el fuego y la llama, deben ser calientes y secos, y extinguirse, por tanto, en la

humedad y el frío. En este caso, el rayo visual debería apagarse en un día de lluvia o en invierno, tiempo en que deberíamos de gozar de las tinieblas más profundas.

Tampoco los atomísticos salen bien parados: Aristóteles pone de manifiesto con exactitud, que la causa fundamental de su doctrina, esto es, el ver una imagen del mundo exterior en la pupila, es debido a la reflexión en una superficie convexa, y en cuanto a los platónicos, les arguye que es absurdo sostener que se ve por algo que sale del ojo, extendiéndose hasta los astros o hasta que se une con alguna otra cosa que va a su encuentro, ya que sería más lógico admitir esta unión desde el principio en el ojo mismo, si bien no se comprende el significado de esta yuxtaposición de luz y luz, ni cómo podría verificarse.

Otras dificultades eran cogidas al vuelo por los opositores, usándolas como argumentos de sus propias doctrinas; así, por ejemplo, fué objeto de múltiples discusiones lo que debería ocurrir al mirarse dos personas a los ojos: Los enemigos de la doctrina pitagórica aseguraban que el fuego visual debería impedir estas miradas, mientras que sus defensores, en el hecho de la molestia psíquica que representa el mantener fija la vista sobre los ojos de otra persona que nos mira y que obliga a apartar la vista, encontraban un argumento, ya que entonces el rayo visual más fuerte habría vencido al más débil.

De todas estas doctrinas, la más generalizada es, como hemos dicho, la pitagórica, que pasó a Alejandría y fué la universalmente aceptada hasta la Edad Moderna.

Como último representante del mundo antiguo, hemos de citar de nuevo a Galeno, ya que su más perfecto conocimiento de la anatomía del ojo había de facilitar grandemente la obra de Al-Hazen: En efecto, Galeno describe la estructura del ojo, poniendo en evidencia la función del nervio óptico en la visión, dándole el papel más importante en la misma, ya que lo considera el canal a través del cual pasa el fluido visual que proviene del cerebro, en analogía con los flúidos afines que llegan a todos los órganos de los sentidos para hacerles sensibles. El fluido visual a través de la retina que constituye el fondo del ojo, debería difundirse en el humor vítreo,

alcanzar el cristalino y hacerlo sensible; esto es, apto para sentir la luz que proviene del exterior.

Por otra parte, Galeno, gran anatómico, describe las diferentes túnicas y humores del ojo, distinguiendo entre los últimos correctamente el humor acuoso, el cristalino y el vítreo, ocupando el cristalino la parte central del globo ocular y separando las distintas túnicas, los humores unos de otros y del exterior. La obra de Galeno es importantísima, ya que su descripción anatómica más completa ha de permitir la obra del gigante de Bassora: Al-Hazen.

Las teorías de la visión del mundo árabe y medieval.

El amplio contacto de los árabes con el mundo griego, hizo que sus filósofos estuviesen familiarizados con las diferentes doctrinas de aquél, doctrinas que los físicos árabes hicieron suyas con ligeras modificaciones, si bien no existió entre ellos la preponderancia absoluta que la doctrina pitagórica tuvo en el mundo antiguo, siendo frecuente los partidarios de la doctrina atomística, y, sobre todo, de la aristotélica, a la que se adhirieron entre otros, nuestro Averroes, y Avicena. Aunque poco originales, la mayoría de los físicos árabes ejercieron una notable influencia sobre sus colegas cristianos de la Edad Media, como por ejemplo el pitagórico Abu-Yusuf-Yakub, Ibn Isac-ibn as Sabba al-Kindi, cuya influencia es bien marcada en Roger Bacon, Vitelio y Leonardo de Vinci. En su doctrina, los rayos del cono visual son compactos, y al central o axial le da una mayor eficacia, lo que le permite explicar el fenómeno de la mayor nitidez de la imagen en el centro del campo.

No quiero cansar vuestra atención exponiendo las diferentes variantes de las doctrinas que poco o nada nuevo añaden sobre lo expuesto por los griegos, bastando indicar que Wiedemann y Hirschberg han hecho detenidas investigaciones sobre la óptica de los árabes, haciendo la exégesis de veintisiete autores, cuyos escritos sobre óptica han llegado a nuestras manos en todo o en parte, y que no tendrían mayor importancia si entre ellos no existiese Ibn-Al-Haitam, dado a conocer con el nombre de Al-Hazen por sus traductores. Este gran polí-

grafo del que su biógrafo y contemporáneo Ibn-Abi-Usaibia, cuenta no menos de ciento veintitrés obras, escribió su magno libro sobre óptica en la última parte de su vida y puede considerarse como el verdadero fundador de la óptica fisiológica.

Desgraciadamente el texto original árabe que debió escribirse hacia 1030, no se ha encontrado a pesar de los esfuerzos de varios investigadores. Su traducción latina, que sirve de base a la edición de Risner de 1572 (1), procede probablemente del siglo XIII, y va acompañada de las obras de Vitelio. De esta edición impresa se conservan también poquísimos ejemplares, algunos de los cuales están en nuestra Biblioteca Nacional, circunstancia que me ha permitido obtener buena parte de estas notas. Wiedemann pudo comprobar, comparando la traducción latina de la edición de Risner con el manuscrito del físico persa Kamal-ad-Din Abul-Hasan al-Farisi, cuyas cuatro quintas partes van dedicadas a la óptica de Al-Hazen, que en la edición latina faltan los cuatro primeros capítulos, y el quinto está muy reducido, estando compuesta la obra de siete libros de los que los tres primeros son extraordinariamente importantes desde el punto de vista de la óptica fisiológica.

Al-Hazen, en su obra, demuestra conocer a fondo las diferentes escuelas y doctrinas de los griegos, y singularmente la pitagórica, adoptada por la mayor parte de sus contemporáneos. A pesar de ello, rompe con los moldes antiguos, y confirmando su razonamiento con la experiencia, sigue un método que en su rigorismo nos parece completamente moderno. Hasta él, los filósofos no dan gran valor al experimento para confirmar sus teorías, mientras que Al-Hazen funda sus especulaciones únicamente sobre la experiencia.

En el primer capítulo del primer libro, lanza su primera proposición revolucionaria, esto es: "La luz por sí misma y el color iluminado, hieren al ojo." Proposición que acaba con los rayos visuales y crea como base de la luz un ente objetivo y extrasensorial.

Demuestra su tesis con una serie de experiencias, tales como

(1) *Opticae Thesaurus libri septem nunc primum. Editi-Frid. Risner. Basilea, 1572.*

mirar un objeto como el sol o un manantial de luz fortísima, y comprobar que no puede verse bien, porque los ojos duelen a causa de la luz enviada por el manantial. Hace la misma experiencia observando el sol por reflexión a través de un espejo, con el mismo resultado, y de ahí deduce que hay algo que tiene que ir del objeto luminoso o iluminado al ojo, ya que, de no ser así, éste sufriría mirando a todos los objetos, lo que no sucede. Otras experiencias conducentes al mismo fin, son realizadas por Al-Hazen; hoy las llamaríamos de imágenes remanentes o secundarias; esto es, mirar fijamente a una apertura fuertemente iluminada y comprobar que se sigue viendo la imagen aunque se vuelva la vista hacia la parte oscura de la habitación, cosa inconcebible con la hipótesis de los rayos visuales. Con ello desaparece la idea fundamental de la escuela pitagórica; pero contrariamente a la crítica de las escuelas griegas rivales que destruían sin construir, trata de dar vida a una doctrina que les permita explicar el fenómeno de la visión sin recurrir a las imágenes emitidas o "eidola" de la escuela atomística o sus derivadas. Por otra parte, era preciso salvar la objeción de una emisión desordenada de partículas que no podrían conservar el color y la forma de los cuerpos. Para ello, parte de la estructura del ojo descrita por Galeno, y en el capítulo quinto de su libro, describe dicha anatomía (figura 1), distinguiendo el humor acuoso, el vítreo y el cristalino en el centro del ojo, y las túnicas concéntricas con él, y considerándole como órgano propio de la visión, de acuerdo con la doctrina de algunos de sus predecesores y contemporáneos.

Con estas premisas lanza en el capítulo siguiente su proposición para explicar el fenómeno de la visión, diciendo: "La visión tiene lugar por los rayos emitidos del objeto hacia el ojo."

Para probar este aserto, parte de que la luz sale de los objetos luminosos y obra sobre el ojo de acuerdo con las experiencias anteriormente expuestas, y como el ojo siente la luz, no se trata más que de explicar cómo se realiza esta sensación, de tal manera que lleguen al alma formas y colores. Es preciso hacer notar que Al-Hazen, a pesar de las investigaciones que más adelante realiza, conoce mal la ley de la refracción,

y, por tanto, no le es posible realizar una construcción de la marcha de rayos dentro del ojo, aun en su forma más elemental. Salva esta dificultad por la propiedad que conoce de que, rayos normales a las diferentes túnicas concéntricas, las atraviesan sin sufrir desviación alguna, y a estos rayos normales les da un papel preponderante y son los que le aseguran la proyección punto por punto de cada elemento del objeto, hasta llegar a través de las túnicas al cristalino. De esta forma, Al-Hazen resuelve genialmente las dificultades de la escuela atomística y consigue que los rayos que desde el objeto hieren al ojo, transmitan fielmente las imágenes del mundo exterior, sean los objetos grandes o pequeños, hasta llegar al elemento sensible del ojo, que él juzga es el cristalino.

Esta detención de los rayos luminosos en el cristalino, colocado según la doctrina de Galeno en el centro del ojo, empaña algo la gloria de Al-Hazen, según hace notar Ronchi en sus comentarios a la doctrina del sabio árabe (1), objeción de tanto más peso cuanto que Al-Hazen conocía perfectamente el papel fisiológico importantísimo del nervio óptico; pero el papel central asignado al cristalino lo exigía así, ya que, de atravesarlo los rayos luminosos, éstos proyectarían sobre las túnicas posteriores una serie de imágenes invertidas y todo el edificio tan primorosa y cuidadosamente realizado, se vendría abajo. Por ello, aunque con repugnancia, Al-Hazen tiene que considerar que el cristalino es el elemento sensible del ojo y que los rayos luminosos se imprimen en él, haciéndole sufrir cuando la presión es grande, y dejando huella que tarda un tiempo finito en borrarse si las sensaciones luminosas son fuertes y persistentes. Otras dificultades de menor monta son solventadas con habilidad por Al-Hazen, siendo una de ellas el gran campo visual del ojo, que nos permite ver objetos que salen ampliamente de la zona abarcada por las normales a la córnea, que contornean la pupila. Esto lo explica Al-Hazen por refracción en la primera superficie de los rayos oblicuos, afirmando que la visión tiene siempre lugar por refracción, afirmación de enorme transcendencia, cuya importancia no se

(1) VASCO RONCHI.—*Storia della Luce*.—Zanichelli. Bologna, 1939.

OPTICAE
THESAURVS.

ALHAZENI
ARABIS
libri septem, nunc primum
editi.

EIVSDEM liber DE CREPUSCULIS
& Nubium ascensionibus.

ITEM
VITELLONIS
THVRINGOPOLONI
LIBRI X.

Omnes instaurati, figuris illustrati & aucti, adiectis etiam in
Alhazenum commentarijs.



Cum privilegio Caesareo & Regis Galliae ad scripturam

BASILEAE,
PER EPISCOPIOS. M D LXXII.

**Triplicis visus, directi, reflexi & refracti, de
quo optica disputat, ar-
gumenta,**



Contraportada del «Opticae Thesaurus», de Al-Hazen.

le escapa, por lo que insiste en su originalidad, afirmando que nadie antes que él ha expuesto tal doctrina. Del mismo modo explica el hecho de no perturbar sensiblemente la visión un pequeño obstáculo, una aguja, por ejemplo, colocada ante la

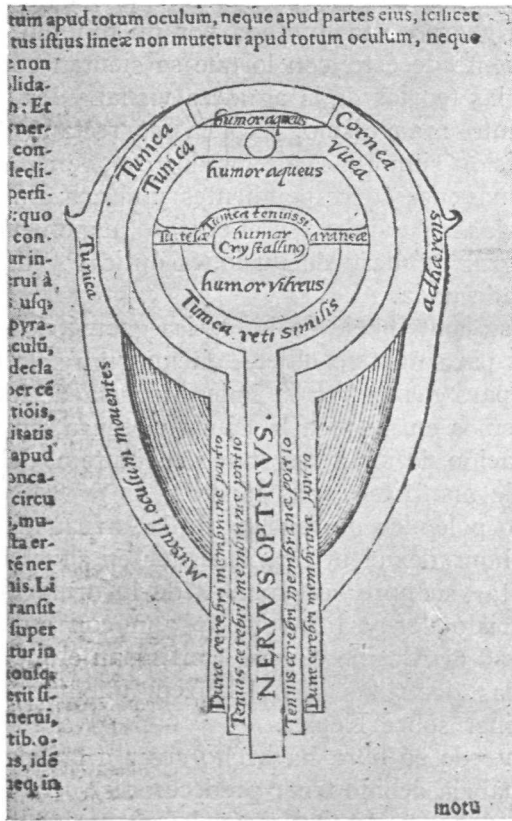


Figura 1.ª

Dióptrica del ojo según Al-Hazen. *Opticae Thesaurus* (Biblioteca Nacional).

pupila. Naturalmente sería pedir demasiado si pensásemos que esta originalidad le lleva a desprenderse por completo de catorce siglos de escuela griega; por ello vemos en sus doctrinas algunas concesiones, aunque pequeñas y de carácter más bien

psicológico, recordando algunos conceptos de Galeno y aun de los pitagóricos, cuando afirma que el ojo para ver tiene que tener una especial disposición.

No se ciñe a lo expuesto la contribución del sabio árabe a la óptica fisiológica; expone, además (cap. II, libro I), que la visión de un cuerpo está limitada por un mínimo esplendor y tamaño aparente de éste, con lo que se sientan correctamente las bases de las teorías de la agudeza visual y los valores umbrales absolutos: asimismo, explica correctamente en el libro III la visión simultánea de los dos ojos, exigiendo la formación de imágenes correspondientes y el cruzamiento de las cadenas nerviosas de ambos en el cerebro, exponiendo con perfección un gran número de ilusiones ópticas y dándoles una explicación adecuada.

Aunque su contribución a la Óptica geométrica y física no es de interés para nuestro objeto, citemos tan sólo que en una experiencia para demostrar la independencia de los rayos luminosos tenemos en germen la cámara oscura, cuyo mecanismo de formación de imágenes, tan semejante al del ojo, ha de ser puesto de manifiesto más tarde.

El acento polémico de muchas de las afirmaciones de Al-Hazen y su honradez científica, rarísima en aquella época, que le lleva a citar siempre sus fuentes de información, como lo hace con Aristóteles y Ptolomeo y aun con autores árabes como Abu Sad al Ala ibn Suhail, confirman el mérito y originalidad de las doctrinas de Al-Hazen, que tanta influencia habían de tener sobre Kepler.

Lo ingente de su obra ha hecho creer a críticos que necesariamente habría debido tener predecesores; pero los más perfectos conocedores de la Óptica árabe, como los citados Wiedemann y Hirschberg, afirman su originalidad, no encontrando más filiación que las teorías luminosas de los miembros de una sociedad científica secreta, que floreció en el siglo x en Bassora, patria de Al-Hazen, denominada Ijuan as-Safa (los hermanos de la pureza), quienes postulaban una luz emitida por los cuerpos, capaz de atravesar las substancias transparentes, tomar de ellas el color y venir después a herir al ojo. A estos hermanos de la pureza les parecía ridícula la doctri-

na de los rayos visuales, y es posible que sus postulados sirviesen de punto de partida a su coterráneo.

Para encontrar una anatomía del ojo más perfecta que la de Al-Hazen, con un cristalino colocado, no en el centro del ojo, sino en el sitio que verdaderamente ocupa, es preciso recorrer más de cinco siglos y llegar al "Visione" de Fabricio

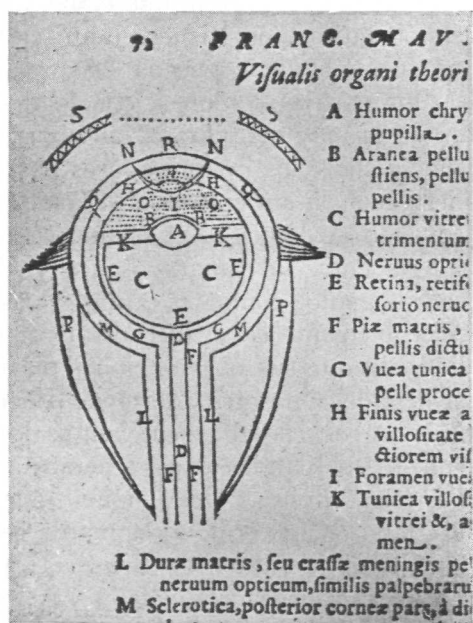


Figura 2.^a

El globo ocular según Maurolico «Photisme». Lyon 1613.

ab Acuapendente y a la obra de Maurolycus de "Lumen et umbra", ya que los autores cristianos del medioevo, no logran liberarse hasta dicha fecha del pensamiento griego.

De ellos citaremos al franciscano Roger Bacon (1214-1284), quien, si bien en Optica fisiológica apenas realiza labor apreciable, es indudablemente el que descubre la cámara oscura, obteniendo imágenes del sol sobre el fondo de la misma y recomendando tal artificio para la observación de los eclipses.

Contemporáneo suyo es el monje Vitellio, nacido de padre polaco y madre turíngia, quien hacia 1271 vive en Italia en la ciudad de Viterbo. Allí seguramente escribe su tratado de óptica, que no es otra cosa que un trasunto de la obra de Al-Hazen con mejor atuendo físico y matemático, pero sin nada nuevo original (1). A pesar de que sigue paso a paso las proposiciones del sabio árabe, no le cita en su manuscrito; pero el recopilador de la obra de Al-Hazen, que como ya dije fué impresa en su versión latina por Risner, junto con la obra del monje polaco, le juega la mala pasada de anotar cuidadosamente en ambas los pasajes comunes, con lo que la originalidad de Vitellio queda muy mal parada; su obra, sin embargo, tuvo gran influencia sobre los investigadores posteriores, quienes le citan con frecuencia sin citar a Al-Hazen.

El gran Leonardo de Vinci es el primero que hace notar la estrecha analogía entre la cámara oscura y el ojo, siendo muy posible que su genio, como en tantas otras cosas, profundizase considerablemente en el mecanismo físico del fenómeno de la visión, sin que sus observaciones dispersas en manuscritos hayan llegado a nosotros de modo fidedigno.

La anatomía progresa notablemente entre los siglos XIII y XVI, singularmente en Flandes, y así tenemos en el P. Maurolico de Mesina, y en su obra "De Visione" (2), una descripción y corte del globo ocular (fig. 2), tomada, según dice, de la Anatomía de Andrés Vesalius, de Bruselas (3). La última parte de la obra de Maurolico, terminada el 8 de mayo de 1554, contiene una teoría física de la visión y en ella equipara el cristalino a una lente de vidrio, y afirma, por primera vez,

(1) La crítica moderna considera a Vitellio como el primer traductor de Ibn el Haithan.

(2) FR. MAUROLICO: "De Visione". Lyon, pág. 69. Existen otras tres ediciones: la primera, con el nombre de "Photisme de Lumine et Umbra", fué impresa en Venecia en 1575; la segunda en Mesina, en 1613, y la otra en Lyon, en 1613. Las notas y la figura 2 están tomadas de esta última.

(3) La obra de Andrés Vesalius, en su edición de 1543, contiene el esquema del ojo de la figura 3, sacada de un ejemplar existente en la Biblioteca Nacional, en el que el cristalino ocupa el centro del ojo, según el modelo de Galeno. Es posible que en la primera edición (1575) del libro de Maurolyco (que no ha llegado a mis manos), se utilizase este modelo de Vesalius, sustituyéndole por otro más moderno en la edición de 1613.

que los rayos se refractan en él y lo atraviesan, pero circunscribe la acción sensible al cristalino, pues de lo contrario, afirma, todo se vería del revés.

El noble napolitano Juan Bautista della Porta, coloca una

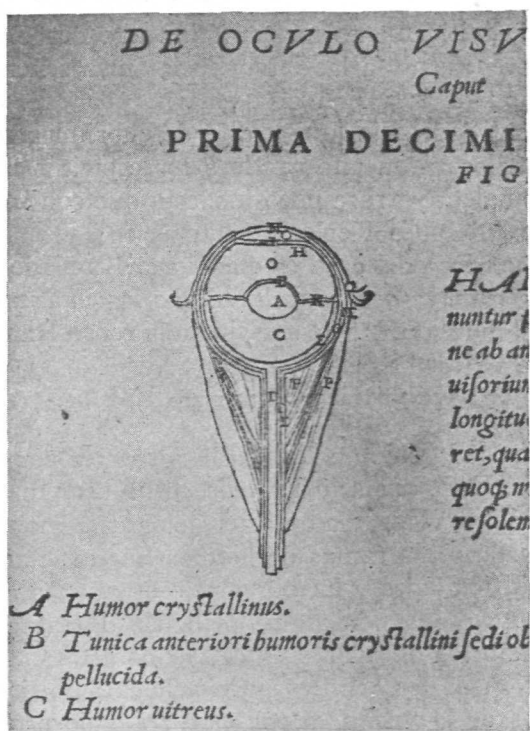


Figura 3.^a

Corte del ojo según la Anatomía de Andrés Vesalius, de Bruselas
(1543)

lente en la cámara oscura con lo que las imágenes aumentan en luminosidad, y describe la completa analogía entre esta nueva cámara y el ojo en su libro *Magia Naturalis* (1).

(1) J. H. Baptista della Porta: "*Magia Naturalis*". Edición de Ruán, 1650. (Existe otra edición idéntica a la anterior. Nápoles, 1589.)

Ahora bien, influenciado por sus predecesores y con el pie forzado de que el cristalino debía ser el lugar donde se produjese la sensación, considera que las imágenes se forman sobre él, asimilando la pupila a la lente de la cámara oscura y el cristalino a la pantalla, colocando aquél en el centro del ojo. Porta está muy orgulloso de su teoría, afirmando que con ella se dirime definitivamente una cuestión que desde la antigüedad había preocupado a las inteligencias más señeras, esto es, la localización de la visión al formarse imágenes del mundo exterior, dentro del ojo (1), y este descubrimiento que él ha hecho, “complacerá en alto grado a los espíritus ingeniosos”. Teoría incompleta y frase poco modesta que con ironía implacable atacará después Kepler.

Lo más curioso del caso es que Porta, fundado en su analogía con la cámara oscura, admite que las imágenes sobre el cristalino están invertidas, lo que sin duda representa un avance.

La dióptrica ocular de Kepler.

Y llegamos al genio que había de descorrer por completo el velo: Kepler. Este, que se complacía en no usar más título que el de matemático, viene a la óptica fisiológica como tantos otros cultivadores de otras ramas de las ciencias exactas naturales. Ha tenido dificultades y ha observado anomalías al medir los ángulos subtendidos por algún planeta, al tratar de encontrar las distancias angulares entre varios astros, así como en la observación de los eclipses, y lo achaca a ilusiones ópticas o a defectos de la visión, y por esto trata de profundizar el modo y manera en que ésta tiene lugar. Para ello se funda principalmente en la obra de Vitellio, que él cree debe ampliarse y completarse, surgiendo su libro sobre *Optica*, que él modestamente denomina “*Ad. Vitellionem Paralipomena*” (2).

(1) Hinc. Philosophis et Opticis patet quam fiat visio loco, ac intrinseci dirimitur quaestio, sic antiquitatis exaggerata, nec alio utrumque artificio demonstrare poterit. Intromittitur per pupillam fenestrae foraminis instar, vicemque obtinet tabulae crystalinae sphaerae portio in medio oculi locata quo scio ingeniosis maxima placiturum. “*Magia Naturalis*”. Libro XVII, capítulo VI, pág. 563.

(2) *Ad. Vitellionem Paralipomena quibus Astronomiae pars optica*. Francfort, 1604.

En esta obra fundamental se ocupa en su parte quinta, capítulo V, del problema de la visión. Se da cuenta que para su estudio es preciso partir de datos anatómicos ciertos mejores que los usados por Vitellio, que califica de oscuros e

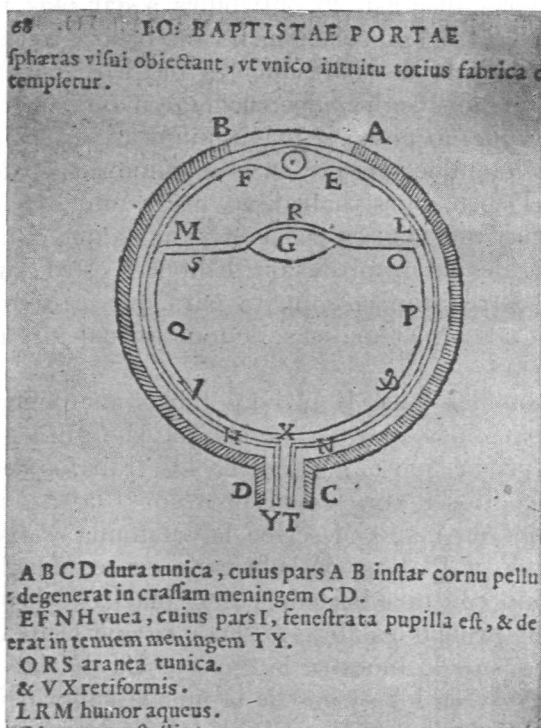


Figura 4.^a

El ojo según Juan Bautista della Porta (Nápoles 1589).

inexactos, y hace un programa de trabajo que pudiéramos señalar como típico en una investigación: 1.º Estudio de los elementos anatómicos del ojo. 2.º Exponer en su conjunto su teoría de la visión. 3.º Comprobarla con modelos y experiencias en su conjunto y en cada una de sus partes. 4.º Sacar las consecuencias prácticas de la teoría.

Para su primer objetivo, y dado que no es anatómico, cede

la palabra a los mejores de su tiempo con tal galanura, que no puedo por menos de recoger aquí sus palabras, que son un ejemplo de cómo debe delimitarse una investigación física cuando el tema lleva mezclados problemas de las ciencias de la vida. Kepler dice así “Contribuirá a dar más fe a mi razonamiento el traer a colación, no mi propia experiencia sobre el ojo, sino la de sobresalientes médicos, para que no se me pueda argüir de incompetencia al manifestar mi propia opinión, ya que no poseo la más mínima experiencia en diseción, dado que nunca las presencié ni como espectador ni como ayudante. Deben, pues, hablar en lugar mío hombres de reconocidísima autoridad en la materia, hasta que el negocio esté en los umbrales de mi profesión. Entonces éstos, sin duda con gusto, me entregarán la lámpara para que, a mi vez, les ilumine en las cosas matemáticas, de todo lo cual juzgarán los entendidos.” (1).

Como fuentes toma Kepler las tablas anatómicas de Félix Platers, aparecidas en 1583, de las que la figura 5 nos muestra una reproducción (2), así como los trabajos de su amigo, el anatómico Jessen von Jessen, profesor a la sazón en Praga.

Con ellos en mano, describe la anatomía y fisiología del ojo siguiendo a Platers, descubriendo en seguida la similitud del cristalino con una bola de vidrio macizo o llena de agua. Citemos sus propias palabras: “Todo lo que se ha dicho sobre el cristalino, nos lo muestra la experiencia diaria en las esferas de vidrio y en los globos de la misma substancia llenos de agua clara. Pues si alguno, con una esfera de cristal o de agua, se sitúa frente a la ventana y coloca un papel blanco detrás de la esfera a una distancia de alrededor de un radio de su

(1) *Conducit ad fidem demonstratione, quam sum allaturus, conciliandam, non propria sed praestantissimorum medicorum publica de oculo afferre experientia. Quid si manq; me quis aut malae fidei arguerit, quasi stabiliendae propriae opinioni intentum aut imperitiae Sectionum, quarum nunquam antea neque Spectator fuerim neque administer. Loquantur igitur pro me viri receptae autoritatis de materia ipsis nottissima: quod negocium ad meae professionis limites fuerit devolutum. Tunc enim haud granatim et mihi lampada tradent quo adilla in Mathematica legitime sum prelatum de quo peritorum erit judicium. Ad. Vit. Paralipomena V. cap. V, págs. 158 y 159.—Francfurt, 1604.*

(2) La figura está sacada directamente de la obra de Plater, uno de cuyos ejemplares se encuentra en la Biblioteca Nacional.

borde, se dibujan sobre el papel clarísimamente, pero en posición invertida los vidrios de la ventana, con sus marcos de madera y plomo que los limitan.” Más adelante añade: “Ahora bien, como el cristalino pertenece a las lentes convexas y es más denso que los medios que le rodean, como el agua dentro del vidrio es más densa que el aire, todo lo que deduzca-

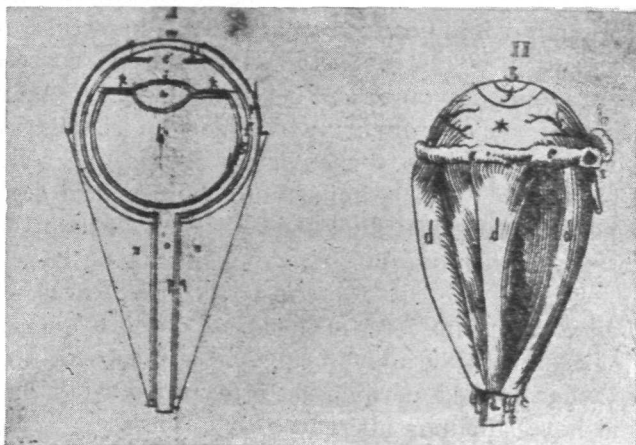


Figura 5.^a

El ojo según el anatómico Félix Platers, de Bruselas. (La figura está reproducida directamente de las Tablas Anatómicas de Platers. Bruselas, 1583.)

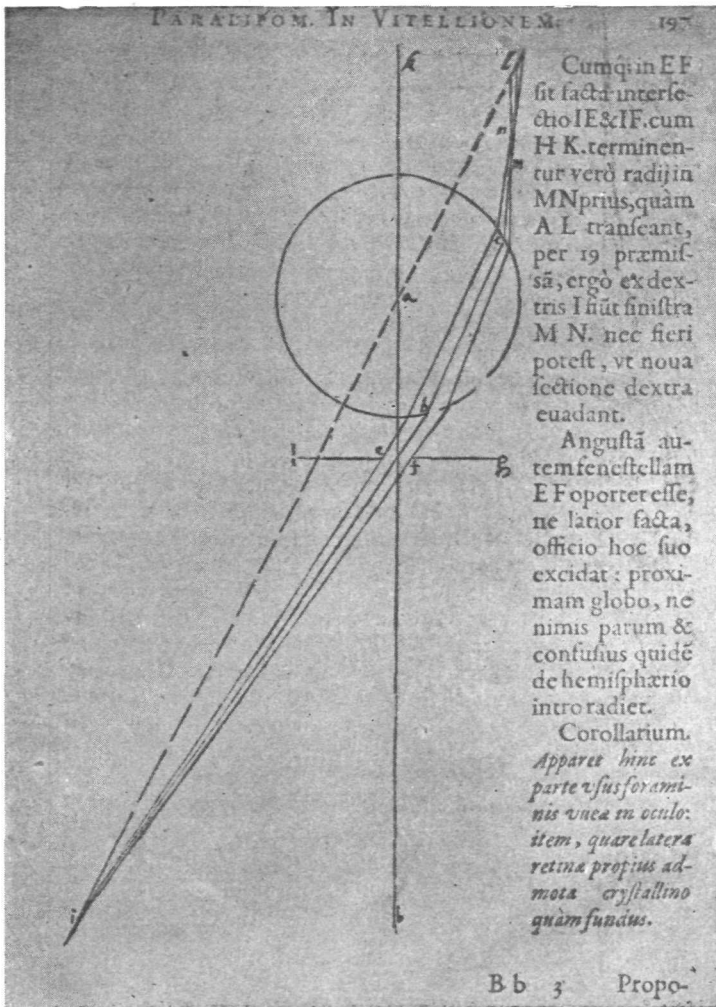
mos y nos muestre la esfera de vidrio, tendrá validez para el cristalino siempre y cuando tengamos en cuenta la clase especial de su convexidad, que le dará propiedades distintas de las de la esfera cuya convexidad es diversa.”

Hace en la esfera del vidrio una serie de marchas de rayos para las distintas posiciones del objeto, usando una ley de refracción aproximada, esto es, considerando el ángulo de refracción proporcional al de incidencia para valores pequeños de éste. En estas construcciones observa la cáustica y que las imágenes de objetos que subtienden desde la bola un gran campo son confusas. Hasta ahora todas estas observaciones las había hecho ya Porta, aunque sin la acabada construcción geométrica y marcha de rayos de Kepler; pero éste da un paso

más y coloca justo ante la esfera de vidrio una pantalla con una pequeña apertura circular con su plano orientado perpendicularmente al eje de los rayos de luz, comprobando entonces que, “si el diafragma es más pequeño que la esfera, se formará una imagen de la mayor parte del campo visual sobre el papel colocado detrás de la esfera en el último lugar (esto es, en el vértice de la cáustica), donde se cortan los rayos que parten del punto luminoso; la imagen está invertida, pero en su parte central es pura y neta”. Discute con corrección el fundamento óptico-geométrico del fenómeno, y al observar que los rayos que entran con oblicuidad en el diafragma se cortan delante del plano perpendicular al eje que contiene la imagen paraxial, llega a la importante consecuencia de que ello explica parcialmente la utilidad del orificio de la úvea en el ojo, y asimismo por qué las paredes laterales de la retina están más cerca del cristalino que el fondo del ojo (1). Operando con diafragmas mayores y menores, observa que a mayor dimensión, corresponde mayor claridad y menos nitidez de la imagen, achacando la pérdida de esta propiedad a la acción de lo que hoy llamamos aberración esférica.

En la proposición XXVII y a base de estas experiencias, describe, por primera vez, el estado de refracción de un ojo miope, y en la XXVIII aclara, también por primera vez, la acción correctora de los vidrios cóncavos y convexos, poniendo de relieve que con los primeros se lleva el punto de cruce de los rayos que estaban delante de la retina a ésta, ocurriendo lo mismo con los segundos, para los rayos que se cortarían detrás de la retina. A este descubrimiento le da Kepler la importancia que merece, insistiendo en la originalidad de su descubrimiento, pues “a pesar de que Porta había prometido traer claridad a la Óptica, no he encontrado esa claridad por más que he buscado en las librerías”. “Era notable”—añade—“que, estando tan difundida la aplicación práctica de estas cosas (se refiere a las gafas), había permanecido oculto su fun-

(1) *Apparet hinc ex parte usus foraminis uvea in oculo item, quare retinae propius admittit crystalino quam sensus.* (Véase fig. 6.)—Loc. cit. Proposición XXIII, pág. 197.

Figura 6^a

Reproducción de una página del Paralipomena de Kepler que describe el papel de la pupila y la función de la curvatura de la retina.

AD VITELLIONEM
PARALIPOMENA,
Quibus
ASTRONOMIÆ
PARSOPTICA
TRADITVR;

Potissimum
DE ARTIFICIOSA OBSERVATIO-
NE ET ÆSTIMATIONE DIAMETROKVM
deliquorumq; Solis & Luna.

CVM EXEMPLIS INSIGNIVM ECLIPSIVM.

Habes hoc libro, Lector, ipter alia multa noua,

*Tractatum luculentum de modo visionis, & humorum oculi
vsu, contra Opticos & Anatomicos.*

AVTHORE
IOANNE KEPLERO, S. C. M.
Mathematico.



FRANCOFVRTI,
Apud Claudium Marnium & Heredes Ioannis Aubrii

15 Anno M. DCIV.

Cum Privilegio S. C. Maiestatis.

damento científico". El mismo, antes de conocer el mecanismo de la visión, se había torturado en vano, buscando explicación a la acción correctora de los vidrios de gafas, y su amigo y protector, el barón de Dietrichstein, no le dejó reposo durante tres años hasta que lo hubo aclarado.

Una vez en posesión de la verdadera teoría, Kepler discute y pone de manifiesto los errores de los partidarios de la formación de la imagen en el cristalino. Esta teoría, que los escritos de Al-Hazen y Vitellio habían difundido, era entonces la más aceptada por filósofos y médicos, quienes conociendo el papel del nervio óptico, se veían forzados a admitir que sus ramificaciones llegaban a empalmarse con el cristalino a través de los procesos ciliares, sin que hubiese para ello evidencia anatómica alguna. Kepler ataca esta doctrina desde el punto de vista de la óptica geométrica. En efecto, como ya dijimos, Al-Hazen daba una importancia fundamental a los rayos que inciden normalmente sobre los medios refringentes del ojo, responsables de una proyección punto por punto del objeto sobre el cristalino. Kepler demuestra, que evidentemente los rayos que se desvían poco de la normal, harán el mismo efecto sobre el cristalino, y entonces tendremos sobre un punto de éste rayos provenientes de otros varios del objeto, con lo que la proyección en cada punto será borrosa. Por otra parte, ataca que las imágenes proyectadas sobre el cristalino pueden ellas solas introducirse en el nervio óptico y provocar la sensación luminosa. El considerar que el sentido de la vista opera por una especie de impresión de las imágenes sobre el cristalino, en analogía a lo que ocurre con el tacto, no sería posible más que si la luz y el color actuaran lo mismo que el calor y no instantáneamente; pero dado que, evidentemente, estos agentes únicamente provocan mínimas cantidades de sensación calorífica y actúan sólo un instante sobre el ojo, es imposible que impresione por contacto a una membrana del cuerpo. Y, a continuación, distinguiendo con toda claridad entre el estímulo luminoso, cuyas incidencias son patrimonio del físico y la sensación y percepción que lo son del fisiólogo y psicólogo, añade: "No es, pues, una membrana ni un nervio, sino, por el contrario, una materia espiritual, qui-

zá algo divino, quién recibe la luz y la percibe correctamente. Ya he discutido antes que esto no puede en modo alguno ser investigado por los ópticos.” (1).

No le queda a Kepler más dificultad que la de explicar cómo la proyección invertida de los objetos sobre el fondo del ojo no impide que los veamos en su posición normal. Este era el obstáculo que habían reputado infranqueable Al-Hazen, Vitellio y Maurolyco; Kepler, a quien no se le ocultaba la importancia de la objeción, trata al principio de solventarla por un segundo cruce de los rayos luminosos antes de llegar a la retina. Pero como esto es geoméricamente imposible, usa un hábil razonamiento, demostrando que en las imágenes invertidas se conserva la misma posición relativa de los objetos, y dado que el centro de la perspectiva visual es el centro del globo ocular (descubrimiento éste de Kepler, que fué olvidado durante mucho tiempo), la única posibilidad para que los movimientos del ojo sigan correctamente al estímulo retiniano es el que las imágenes estén invertidas. Explicación tal vez algo especiosa, pero perfectamente plausible.

Hasta ahora Kepler no ha hecho más que ir exponiendo analogías entre su globo de vidrio con el diafragma que le sirve de pupila de entrada y el ojo humano. Con este modelo ha ido explicando todos los fenómenos de la dióptrica ocular y los hasta entonces misteriosos de los vidrios correctores de los defectos visuales. Ha afirmado varias veces que en el fondo del ojo se forman las imágenes invertidas del mundo exterior y que en la retina se cruzan los haces de rayos que, partiendo de cada punto del objeto contornean la pupila, así como que este cruce de rayos en la retina es lo fundamental del fenómeno de la visión, pero no nos ha resumido su teoría, que ha quedado diseminada en proposiciones y fenómenos aislados. Para hacerlo, saca a colación las pretensiosas frases de Juan Bautista della Porta, que antes reseñamos, en las que el noble napolitano se enorgullece de haber puesto fin al misterio del

(1) Non itaque tunica ac nervus quidem, sed spiritus imo aliquid fortasse divinius est quod lucem suscipit et persentiscit quod supra negavi a opticis investigare posse.—Kepler. *Loc. cit.*, cap. V, pág. 204.

fenómeno de la visión, explicándolo por la analogía del globo ocular con la cámara oscura provista del lente de la que era inventor, pero suponiendo que las imágenes se formaban sobre el cristalino. Kepler le dice: “Verdaderamente nos has hecho felices, eminente maestro secreto de la Naturaleza, al hacer desaparecer del mundo toda controversia sobre si la visión tiene lugar por recepción o emisión de rayos.” Y después de hacer un recorrido magníficamente ceñido y conciso sobre las distintas teorías de la visión y sus puntos débiles, y señalar que Porta, a pesar de que conoce bien los fenómenos de la refracción en las esferas de vidrio, no ha indicado para nada en toda su obra que las imágenes ópticas en el ojo se forman precisamente por refracción, termina diciendo: “Si tú, ingeniosísimo Porta, a tu teoría hubieses añadido que la imagen en el cristalino es todavía muy borrosa principalmente si el orificio de la pupila está muy abierto y que la visión no tiene lugar por el contacto de la luz con dicho humor cristalino, sino mediante su ulterior contacto con la retina, y que mediante este ulterior avance de los rayos, se separen más y más los que partían de distintos puntos, mientras que los que proceden del mismo punto del objeto se concentran, siendo la retina precisamente el lugar en que todos ellos se reúnen en un punto que garantiza la formación de una imagen neta y que mediante este cruce de los rayos tiene lugar la inversión de la imagen, pero que por su reunión se obtiene su completa nitidez; si tú, te digo, hubieses añadido esto a tu teoría, habrías aclarado completamente el proceso de la visión.”

Con esto quedaba descrito por primera vez lo que a tantos cerebros insignes había torturado; no quedaba más que una comprobación experimental directa, ya que no hay que olvidar que Kepler operaba siempre con su esfera de vidrio provista de pupila artificial, y esto no era más que un modelo, y aunque en algún pasaje de su obra afirma (1) que se ha probado teórica y prácticamente que la imagen del objeto o del campo

(1) *Demonstratum est rationibus et experimentis certissimis, pictorum rei seu hemispherii Statui ad cavum parietem retiformis sublae plena confusione omni radiorum.*

visual se proyecta sobre la pared cóncava de la retina, no existe ninguna evidencia de que él hubiese realizado experiencias con ojos enucleados, pareciendo lo más probable que aquellas a las que se refiere el pasaje fuesen las del globo de vidrio.

Esta prueba experimental la suministró poco después el paisano de Kepler, Padre Cristóbal Scheiner, de la Compañía de Jesús, quien en su obra "De Oculus", escrita en 1619, es decir, quince años después de la aparición del Paralipomena, recoge y amplía toda la doctrina kepleriana, realizando posteriormente dos experiencias decisivas: la primera fué construir un gran globo de varios pies de diámetro, en cuya pared colocó una lente convexa de foco apropiado, comprobando al colocarse dentro de él, que sobre la pared posterior se formaban las imágenes del mundo exterior con mucha más nitidez que si la superficie de proyección hubiese sido un plano, experiencia que se realizó con el mecenazgo del Archiduque Alberto Maximiliano de Austria y en su palacio de Insbruck, hacia el año 1615.

Al comentar esta experiencia en su obra "Rosa Ursina", dice: "De aquí se deduce con qué misericordia, Dios el Creador del ojo, ha previsto para su naturaleza que la imagen de las formas exteriores no se recoja sobre una membrana plana, sino cóncava, y ello para cuidar más del ojo, creyendo yo que su concavidad no será esférica, sino que tendrá una curvatura apropiada." (1).

Más adelante, y en la misma obra, describe el P. Scheiner el "experimentum crucis", esto es, la evidencia de la formación de las imágenes en la retina con las siguientes palabras: "que los rayos se cruzan... lo he visto aquí, en Roma, en el año del jubileo (1625) de la manera más neta, observando cómo surgía invertida la imagen de una candela por el cruzamiento de los rayos sobre el fondo de un ojo, del que había eliminado la esclerótica", añadiendo que esta experiencia la había realizado con un ojo humano en presencia del Padre Nicolás Zucchi (2).

(1) GR. SCHEINER.—"Rosa Ursina".

(2) GR. SCHEINER.—Loc. cit.

Con esto queda cerrado el ciclo que comenzó con las especulaciones de los pitagóricos. Las imágenes del mundo exterior reflejadas en la córnea, y que, según la doctrina atomística, provocaban la sensación luminosa, tardaron 1.300 años en recorrer los once milímetros que la separan del centro del ojo, lugar en que Al-Hazen colocaba el cristalino y la sensación, y 600 años más en recorrer los otros once milímetros hasta el fondo del ojo. Y esta lenta evolución de veinte siglos en el pensamiento científico, que debe hacernos reflexionar sobre la pobreza de nuestros conocimientos, se realizó a pesar de haberse ocupado del problema de la visión hombres como Euclides, Ptolomeo, Aristóteles, Al-Hazen, Roger Bacon y Leonardo de Vinci. Esto hace aún mayor la gloria de Kepler.

Por lo demás, aunque las ideas de Kepler y el P. Scheiner tuvieron general aceptación, todavía hubo recalcitrantes hasta principios del siglo pasado, que negaban la existencia de las imágenes en el fondo del ojo, y los últimos defensores de una visión provocada por la imagen reflejada en la córnea, transnochados seguidores de la doctrina atomística, son los ingleses Plagge y Reade, suponiendo este último que los nervios de la retina llegaban hasta la superficie corneal.

Terminada esta corta excursión por los campos de la historia de la óptica, permitidme pasar a exponer brevemente algunos hechos que la investigación moderna ha puesto de relieve al considerar el ojo en su triple aspecto de instrumento óptico, receptor de radiaciones y analizador cromático.

El ojo como instrumento óptico.

El modelo de la cámara oscura de Leonardo de Vinci con los sucesivos perfeccionamientos de della Porta y el P. Scheiner, había "inventado" un ojo a imagen y semejanza de ella; podría decirse con Oscar Wilde que la naturaleza imitaba al arte, y cuando Daguerre y Niepce aprovecharon la cámara de della Porta en su aplicación a la fotografía, el paralelismo se populariza, de tal modo que se convirtió en clásico. En esta cámara ocular, completamente llena con sus medios refringentes, tenemos, prescindiendo de la córnea, un sistema de tres

lentes convergentes pegadas, constituídas por el humor acuoso, el cristalino y el vítreo, pudiendo considerarse constantes el índice de refracción del primero y el tercero, siendo su valor medio 1,336 y variable de 1,386 a 1,404 el del cristalino, constituido por varias capas que como en una cebolla rodean a un núcleo central, creciendo el índice de la periferia al centro. El cristalino varía su forma en el proceso acomodativo, aumentando su convergencia. Un diafragma cuya apertura puede variar de 2 a 8 milímetros está colocado justo ante él.

Cuando en 1841 Gauss en su "Dioptrische Untersuchungen" fijó las propiedades de la zona paraxial de los sistemas ópticos, singularmente las de los puntos y planos principales y se trató de aplicar por Moser estas doctrinas al ojo, se tropezó con las dificultades inherentes a la falta de homogeneidad del cristalino y a no ser rigurosamente esféricas las tres lentes oculares; esto llevó a Listing, precisamente hace cien años, a introducir su ojo esquemático, a base de índices medios y superficies esféricas, con el que, si bien paraxialmente se reproducen las propiedades ópticas de un ojo promedio, permitiendo fijar posición de puntos y planos principales y nodales y, por tanto, distancias focales, asuntos éstos de gran interés en la corrección de ametropías, su aplicación da resultados completamente falaces para otros fines, como, por ejemplo, la investigación de las aberraciones, hecho que se olvida con demasiada frecuencia.

Gullstrand, que poseía mejores datos sobre las propiedades ópticas del cristalino, singularmente sobre las variaciones de su índice en el mecanismo intercapsular de la acomodación, dió los datos de un ojo esquemático más perfecto que el de Listing, sustituyendo al cristalino por un sistema simétrico compuesto de dos pares de meniscos divergentes y un núcleo central cuyos radios variaban en el proceso acomodativo.

Según él, el ojo tiene una potencia media que varía de 58,64 dioptrías para el ojo acomodado al infinito a 70,57 para su máxima acomodación, estando los puntos principales a + 1,348 y + 1,602 mm., respectivamente, de la cresta de la córnea para el caso de acomodación al infinito, tomando los valores de + 1,772 y + 2,086 mm. para el ojo acomodado al máximo.

Las distancias focales son — 17,1 mm. la anterior u objeto y + 22,8 la distancia focal imagen. La posición de los puntos nodales que es de gran interés, pues nos sirve para fijar el campo visual y ser, por tanto, los centros de perspectiva para el ojo fijo en su órbita, están a una distancia de + 7,078 y + 7,332 del vértice corneal, esto es, cerca de la cresta posterior del cristalino, suponiendo el ojo enfocado al infinito.

Una vez definido físicamente nuestro ojo para conocer su rendimiento, será preciso estudiar sus características geométricas y físicas, es decir, apertura, campo, aberraciones, poder separador, profundidad de foco y medios de enfoque.

La apertura del ojo varía con el tamaño de la pupila que, a su vez, depende de la iluminación, como hicieron notar Vinci y della Porta (1) y de las distancias del objeto, hecho que es descubierto por Scheiner (2), siendo los valores extremos los de 2 mm. a plena luz y 8 mm. en completa oscuridad, dato este último que, en colaboración con Durán, pude comprobar con medidas directas y sin luz visible alguna, fotografiando el ojo con luz infrarroja de acuerdo con la técnica de Nagel.

Estos tamaños de la pupila de entrada nos hacen variar la relación de apertura del ojo, definidora de la luminosidad, de $\frac{1}{8,6}$ a plena luz a $\frac{1}{2,1}$ en la oscuridad, rendimiento comparable al de un objetivo de buena calidad (de cámara tipo Leica o Contax), pero que no tiene nada de particular.

El campo, en cambio, es enorme: para el ojo fijo o en su órbita no está limitado más que por los salientes nasal, temporal y orbicular, alcanzando, según Hartridge, 60° en dirección nasal, 100 en temporal, 50 hacia arriba y 70 hacia abajo. Es decir, 160° en sentido horizontal y 120° en vertical, debiendo advertir que, por determinadas propiedades de la retina, este campo es incoloro en su borde, apareciendo, a partir de la periferia, primero los colores azules, más tarde los rojos y por último los verdes.

Si se considera que los más modernos objetivos, gran an-

(1) "De Refractione".—Libro III. Prop. VI, pág. 74.—Nápoles, 1533.

(2) "Oculus sive fundamentum...", pág. 31.—Insbruck, 1619.

gulares, tales como el Hypergon de Goerz o su variante el Topogon de Zeiss llegan tan sólo a campos de 140° y 100° , respectivamente, y eso para aperturas mucho menores que las del ojo, ya que no alcanzan más que $\frac{1}{22}$ en el primero y $\frac{1}{6,3}$ en el segundo, se ve que, pese a la mucha menor agudeza visual existente en cuanto salimos del centro del campo, el ojo es un maravilloso instrumento óptico.

El estudio de las aberraciones de nuestro sistema ocular ha sido siempre difícil, en primer lugar, porque en muchas ocasiones las pérdidas de agudeza visual retiniana son mucho mayores que las que originarían la acción de las aberraciones y las enmascaran, y por otra parte, la dificultad de conocer directamente y en vivo los índices y dispersiones de algunos medios oculares, así como sus radios de curvatura, hace el cálculo de las aberraciones de resultados dudosos, si éstas no han podido determinarse por vía directa.

El ojo esquemático da para la aberración esférica un tipo de aberración de apertura simple, es decir, creciendo en función cúbica con la altura de incidencia; sin embargo, las medidas, ya clásicas, de Ames y Proctor (1) dan para la aberración esférica un tipo de curva de quinto orden, con un máximo de la misma para una apertura pupilar de unos 3 mm., tendiendo, a partir de ella, a la sobrecorrección.

Esta cuestión de la medida de la aberración esférica del sistema óptico del ojo ha tenido para nosotros singular importancia, ya que en un principio creímos deber achacar la miopía nocturna, fenómeno del cual hablaremos más adelante, a dicha aberración. Más adelante se aumentó este interés al defender por otras causas esta misma hipótesis uno de vosotros. Para nuestro objeto interesaba más que la aberración esférica en sí, la determinación experimental difícil y delicadísima del desplazamiento del plano de proyección ocasionado por aquélla. Para ello, y en colaboración con el profesor Durán, realizamos una serie de experiencias con ojos atropinizados, ob-

(1) AMES Y PROCTOR. JOUR.—Opt. Soc. Amer. 5,22. 1922. Existe una notabilísima crítica de Boegehold en el Zeitschrift für ophth. Op. 10,87. 1922.

teniendo curvas del tipo de la de Ames y Proctor; es decir, subcorregidas hasta 3 mm. de apertura pupilar, tendiendo a la sobrecorrección desde dicha apertura hasta los 8 mm.

Como quiera que al ojo atropinizado se le puede argüir lo mismo que al ojo muerto que sus medios han sufrido traumatismos y variaciones que implicarían resultados poco acordes con los que se hubieran obtenido con un ojo normal, mi colaborador doctor Cabello (1) realizó una serie de experiencias conducentes a fijar las variaciones del plano de proyección a partir de la pupila de 3 mm., encontrando desplazamientos máximos de un cuarto de dioptria, lo que nos indica claramente que la aberración esférica ocular es completamente insignificante en el proceso de formación de las imágenes.

No puede decirse lo mismo de la aberración cromática; Newton fué el primero que la observó en su propio ojo, y su estudio teórico llevó a Euler a disentir de la doctrina de aquél referente a la imposibilidad de obtener sistemas acromáticos por la combinación de dos vidrios.

Su investigación y medida ha sido objeto de múltiples trabajos, destacando entre ellos los de los investigadores americanos ya citados y los del Dr. Polack (2), que sensiblemente concuerdan con ellos. Los resultados indican una dispersión de 2 dioptrias desde la raya C del hidrógeno a la G' del mercurio, resultados comprobados por Cabello en el trabajo citado. El ojo, que enfoca de día sobre una zona espectral muy vecina e inferior a la raya D del sodio, queda ligeramente hipermetrope para el rojo y 1,5 dioptrias miope para el violeta, debido a la mayor dispersión para las longitudes de ondas cortas. Ahora bien; para luz blanca la mucha mayor sensibilidad de la retina a las longitudes de onda medias hace que la aberración cromática ocular apenas sea perceptible, no sucediendo lo mismo cuando predominan en el manantial luminoso las ondas cortas como, por ejemplo, en la iluminación con lámparas de vapor de mer-

(1) "Las causas de la miopía nocturna. Medida directa de influencia de la aberración esférica y de la aberración cromática combinada con el efecto de Purkinje." An. F. y Q. XLI, 395. 1945.

(2) POLACK (A).—"Le chromatisme de l'oeil". Bull. Soc. Ophthalm., 9 bis, p. 498. 1923.

curio, en las que puede hablarse con toda propiedad de una miopía cromática.

La mayor agudeza visual obtenida con luz de sodio se explica también perfectamente por la eliminación de la aberración cromática del ojo.

El coma o aberración esférica fuera del eje está considerablemente disminuido por la colocación de la pupila casi en posición isoplanática. Como quiera que las condiciones de isoplanasia y situación de las pupilas datan de hace poco más de veinte años, puede verse con qué torpeza y retraso hemos imitado también en este caso a la Sabiduría Divina.

El astigmatismo sobre el eje entra dentro del cuadro de los defectos visuales normales, y es debido, como se sabe, a diferentes curvaturas en los distintos meridianos corneales, no teniendo su estudio interés para nosotros.

El astigmatismo de pincel oblicuo es también pequeño. Existe siempre en la visión foveal por no coincidir el eje foveal con el principal, siendo su cuantía de $1/4$ de dioptria. La conveniente curvatura de la retina favorece la eliminación de esta aberración para ángulos mayores. Investigado por Ames y Proctor no encontraron hasta 20° valores superiores a -1 dioptria, tanto para el haz sagital como para el meridional, tomando como superficie de referencia no el plano normal al eje óptico, sino el plano de proyección, esto es, la retina. Anteriores investigaciones de Matthiessen realizadas hasta ángulos mayores, daban un astigmatismo de $-4,56$ dioptrias a 60° y de $-17,56$ a 90° del eje, es decir, correspondiendo a un campo de 180° , cifras que aun siendo elevadas, sobre todo la última, es preciso considerar en relación con el enorme campo alcanzado que, como ya dijimos, es muy superior al del mejor objetivo fotográfico actual. Estas cifras de Matthiessen nos parecen, sin embargo, demasiado elevadas, y sería interesante que con los medios de la investigación moderna fuesen revisadas.

La curvatura de campo es ligeramente superior a la de la retina, ya que los astigmatismos sagital y meridional se mantienen siempre del mismo signo, siendo la superficie sagital la más próxima a la del fondo del ojo.

Como dato curioso hace notar Argentieri (1) que, aplicando la teoría Seideliana de tercer orden al ojo esquemático, resulta que la curvatura media de la superficie focal viene a tener un radio de $-11,68$ cm., radio que coincide con la curvatura de la retina, fijada en $-11,33$ cm. por el anatómico Lo Cascio.

La distorsión ocular ha sido poco estudiada, sobre todo por la dificultad de realizar medidas directas, y únicamente se sabe es de forma de barrilete, debido indudablemente a la forma del globo ocular.

En conjunto las características geométricas del ojo nos definen un sistema no igualado por objetivo fotográfico alguno, sin que aberraciones anormales empañen estas características.

El poder separador viene definido físicamente por un lado, por el fenómeno de la difracción, y por otro lado, por las aberraciones, singularmente la esférica y cromática. La combinación de ambos factores ha dado lugar a interesantísimos estudios de Strehl y más modernos de Lopicque (2) y Schober y Jung (3), en los que se calcula el reparto de las iluminaciones de la imagen retiniana de un punto alejado situado sobre el eje y que emite luz blanca.

Lopicque llega a la consecuencia de que la concentración máxima de la energía luminosa, esto es, la máxima intensidad de la figura de difracción espúrea de Airy se obtiene cuando el ojo que recibe la radiación emitida por un manantial blanco puntual queda enfocado para la longitud de onda de 5.800 \AA . Schober y Jung, por el contrario, estiman que cuando el manantial es una mezcla de algunas radiaciones monocromáticas, caso típico en la emisión de una lámpara de vapor de mercurio, el mejor rendimiento se obtiene cuando predominan en la radiación las longitudes de onda comprendidas entre 5.500 y 5.780 \AA .

Ambos siguen una marcha teórica en todo análoga, valorando algo desigualmente los factores de apertura pupilar y

(1) D. ARGENTIERI.—"Optica Industriale". Hoepli. Milán, pág. 411. 1942.

(2) CH. LAPIQUE.—"Etude sur la formation des images retiniennes". Rev. d'Opt. 15,4. 121. 1936.

(3) SCHOBEL UND JUNG.—"Zeitschrift für Technische Physik". 3,84. 1936.

criterio del poder separador, lo que explica sus pequeñas diferencias. El asunto, complejo y de gran interés, tanto desde el punto de vista de la óptica ondulatoria y geométrica como de la fisiológica, espera una resolución definitiva.

La teoría de Lápique, por otra parte, explica en forma muy satisfactoria los fenómenos de irradiación desde un punto de vista puramente físico y obtiene resultados completamente análogos a los que se hubieran obtenido operando rigurosamente con ondas aberrantes en vez de esféricas.

El poder separador del ojo desde un punto de vista puramente ondulatorio conduciría a valores crecientes al aumentar el tamaño pupilar. De día para una pupila de dos milímetros de diámetro nos arrojaría un valor de unos 72 segundos, valor netamente superior al encontrado en medidas directas y que confirma, una vez más, lo artificioso del criterio de Rayleigh para la medida de tal constante, ya que con él se considera alcanzado el poder separador para dos manantiales puntuales, cuando el primer mínimo del espectro de difracción de Fraunhofer de un manantial, coincide con el máximo fundamental del otro, y en este caso, en la figura de difracción compuesta existe una diferencia de intensidad entre la parte central y los bordes que está todavía lejos del umbral diferencial del ojo para intensidades medias y grandes. Las aberraciones en el caso de visión central (foveal) no empeoran el poder separador ondulatorio que define el del ojo considerado como instrumento óptico. Algunos autores consideran que la aberración esférica puede perjudicar el poder separador ocular para pupilas superiores a 4 mm.; pero como quiera que hemos podido comprobar experimentalmente, por las medidas de Cabello ya citadas, que el máximo desplazamiento del plano de proyección, aun para pupilas de 8 mm. no es mayor de un cuarto de dioptría con relación a la pupila de 3 mm., toda acción de la aberración esférica puede considerarse despreciable para la agudeza visual que queda definida por factores anatómicos, fisiológicos y ondulatorios de los que hablaremos más adelante.

Aplicando las pertinentes fórmulas de la óptica geométrica, el ojo posee una profundidad de foco de 0,15 dioptrías para

una pupila de 4 mm. de diámetro, suponiendo una agudeza visual de 1'; llegándose a valores de 0,3 dioptrías para pupila de 2 mm. y la misma agudeza visual. Tal profundidad de foco no le permitiría observar con nitidez más que el espacio comprendido entre el infinito y 3,5 ms., a partir del cual se verían a plena luz borrosos los objetos. Como muchas tareas visuales precisan enfoques mucho más cortos, existe para obviar este inconveniente el mecanismo de la acomodación.

Al gran observador que era Scheiner no se le escapó que el mecanismo acomodativo tenía que estar ligado al cristalino, emitiendo en su "Oculus" la hipótesis de que los procesos ciliares aseguraban el correcto enfoque de la imagen sobre el fondo del ojo por un movimiento del cristalino en dirección del eje óptico del ojo. En el mismo pasaje da como hipótesis alternativa el que el enfoque pueda también realizarse por un cambio de la curvatura del cristalino (1), con lo que, como en tantas otras cosas, se adelantó en varios siglos a los conocimientos de su época.

Tuvo gran boga la hipótesis de que el enfoque del ojo estaba producido por cambio de curvatura de la córnea, hasta que Young realizó su famosa experiencia, anulando la refracción corneal por contacto con el agua que llenaba un recipiente de fondo curvo y transparente que colocaba sobre el ojo, comprobando que, a pesar de ello, la acomodación subsistía en toda su potencia.

El mismo Young pudo realizar la experiencia casi heroica, favorecida por tener los ojos muy salientes, de medir con un compás de puntas romas la distancia entre los polos anterior y posterior de su propio ojo, para comprobar que en la acomodación no sufre variación alguna la longitud de aquél, y eliminadas una a una todas las hipótesis contrarias, hubo de volver a la segunda alternativa de Scheiner, postulada también por Descartes, ya que la primera, desplazamientos del cristalino en dirección del eje óptico, pudo probar Tschering que no

(1) SCHEINER.—"Oculus sive...". Part. I, Cap. X, pág. 23, "humores ipsos praesertium Crystalinum et vitreum vel in anteriora vel posteriore compellant: figur anique Crystalini nonnihil vel attenuent, vel conglobent."

bastaba en modo alguno para explicar la amplitud de acomodación del ojo joven.

La variación de curvatura de las caras del cristalino pudo comprobarse directamente por Langenbeck y Helmholtz, observando las imágenes catodióptricas de Purkinje y sus desplazamientos y cambios de magnitud.

Con ello no cabe ya duda alguna de que el cambio de curvatura del cristalino asegura la función acomodativa, pero en la fisiología de la misma existen aún incertidumbres, ya que dos teorías diametralmente opuestas tratan de explicar el fenómeno.

Partiendo de un cristalino sostenido por las fibras de la zónula como un insecto atrapado en el centro de una tela de araña, las dos teorías de la acomodación explican, por procesos opuestos, el cambio de curvatura de las caras del cristalino.

Según Helmholtz, cuyas ideas fueron ampliadas más adelante por Gullstrand; para el ojo acomodado al infinito, las fibras de la zónula ejercen una tracción en sentido centrífugo tirando del ecuador cristalino. Para el enfoque a distancias más cortas se va relajando paulatinamente la tracción zonular y el cristalino por elasticidad va adquiriendo una forma cada vez más abombada, hasta llevar la imagen del objeto sobre la retina. Gullstrand asocia a este efecto otro que se verifica en el interior del cristalino, consistente en una modificación de la forma por un desplazamiento intracapsular de las partes superficiales que, más plásticas que el núcleo, se dirigirían hacia las regiones ecuatoriales de la lente.

Tscherning es de opinión, por el contrario, que en reposo tiene el cristalino su forma más aplastada. La tracción centrífuga de la zónula originaría un abombamiento de la parte central del cristalino, por ser allí el sitio donde las capas fibrosas tienen una mayor densidad, mientras que la parte periférica apenas cambiaría su curvatura. El efecto sería el mismo que el de una membrana muy elástica, de forma circular, que rodease como una bolsa a un cuerpo esférico concéntrico mucho más duro y que al estirarse se adaptara a la forma del cuerpo

interno, poniendo de manifiesto la mayor curvatura de éste.

Tscherning funda su teoría principalmente en el cambio de signo que según él sufre la aberración esférica del ojo al pasar del estado de reposo o de relajamiento acomodativo al de máxima acomodación.

Estas dos teorías que mutuamente se excluyen, se disputan todavía el favor de los fisiólogos, si bien en los últimos cinco años parece existir una ligera tendencia a favor de la de Helmholtz-Gullstrand, debida fundamentalmente a experiencias realizadas con ojos albinos, en los que el iris es casi transparente y permite observar todo el cristalino. La principal causa de duda es la incertidumbre que todavía reina sobre el mecanismo fisiológico del movimiento de los músculos ciliares, que rige el de las fibras zonulares.

Es un hecho de sobra conocido que la capacidad acomodativa disminuye al aumentar la edad, siendo su ritmo de tal precisión, que algunos oftalmólogos creen poder deducir de la amplitud de acomodación la edad exacta de los sujetos.

Al estudiar los valores umbrales de la miopía nocturna, pudo descubrir mi colaborador profesor Durán, y presentar por vez primera, en la sesión del 5 de julio de 1943, a la Real Sociedad Española de Física y Química (1), dos hechos muy notables referentes a la facultad acomodativa: el primero es el descenso paulatino de ella al disminuir la cantidad de luz, de modo que un ojo adaptado a un campo de esplendor igual a 3 apostilb y que mira a un objeto de contraste suficiente, conserva todavía una amplitud de acomodación de 5 dioptrías, amplitud que se reduce a 2,5 dpt. si el esplendor baja a 0,03 asb., y pierde por completo su facultad acomodativa al llegar aquél a valores de 0,0005 asb., quedando entonces el ojo enfocado a 50 cm. Este hecho de la pérdida del poder acomodativo al disminuir el poder luminoso, fué también deducido por el profesor Palacios por consideraciones teóricas realizadas sobre los primeros resultados de nuestras in-

(1) An. Fis. Quim. XXXIX, pág. 555.—1943.

vestigaciones de miopía nocturna, dándole el nombre de presbicia nocturna (1).

El segundo es la comprobación inequívoca de la existencia de acomodaciones negativas, o sea, la posibilidad de enfoque de objetos virtuales colocados detrás del ojo en una cuantía de hasta + 1,5 dioptrias. Con ello carece de sentido hablar de un cristalino en reposo cuando está acomodado al infinito, y este hecho de que al cesar todo estímulo luminoso cuando nos encontramos casi en plena oscuridad y tocando prácticamente el valor umbral, quede el ojo enfocado con una refracción que promedia los valores extremos de la acomodación, se adapta mejor a la doctrina de Helmholtz-Gulstrand, sin que decida inequívocamente a favor de ella, dado que, aun forzando algo las cosas, el fenómeno puede encuadrarse también en la teoría de Tscherning.

En la facultad acomodativa tiene el ojo, como hace notar Ronchi (2), un precioso auxiliar para determinar la distancia del objeto visto y la curvatura de la onda que llega al ojo. Siendo el órgano visual sensible a variaciones de la acomodación de 0,25 de dioptrias y suponiendo el ojo trabajando a plena luz, esto es, con una apertura pupilar de 2 mm., la aplicación de las fórmulas de la óptica ondulatoria nos dice que en ese caso la diferencia de las flechas de las ondas que llegan al ojo, es igual a $\frac{\lambda}{4}$, o sea, que la capacidad del ojo de apreciar diferencias de acomodación de 0,25 de dioptrias, se traduce en una facultad de apreciar flechas de $\frac{\lambda}{4}$ en los trenes de onda que llegan al ojo, sensibilidad que muy pocos esferómetros pueden alcanzar. Examinando desde otro punto de vista la cuestión no parece tan brillante, ya que, siendo el tope de sensibilidad 0,25 dioptrias, podremos suponer que el infinito fisiológico de distancia comienza para 5 metros, lo mismo que de la agudeza visual máxima de 60 segundos, podremos definir fisiológicamente como punto a todo objeto de tamaño aparente inferior a esa magnitud.

(1) "Investigación y Progreso".—9-10, pág. 257. 1943.

(2) V. RONCHI.—"Lezioni di Ottica Ondulatoria". Zanichelli. Bologna, 1940.

Hemos hablado del enfoque del ojo a plena luz, y de acuerdo con Lapicque, consideremos que en esas condiciones el ojo cuando enfoca a infinito, acomoda sobre una radiación de unos 5.800 Å.

El problema de cómo queda enfocado el ojo cuando la iluminación disminuye y entramos en la visión crepuscular y nocturna, que había pasado completamente inadvertido, pudimos resolverlo en colaboración con el profesor Durán al descubrir en 1941 el fenómeno de la miopía nocturna por el que todos los ojos emétopes se tornan miopes de una cuantía media de -2 dioptrías, cuando el estímulo luminoso desciende por debajo de cierto límite. El nuevo fenómeno comprobado después por buen número de investigadores, ha sido objeto de múltiples teorías que trataban de explicar los hechos observados (1). La causa más importante reside en el mecanismo acomodativo y se debe a quedar el ojo automáticamente acomodado a -2 dioptrías al descender el estímulo y aproximarse al umbral absoluto, como ya dijimos.

Esta causa contribuye con un 62 por 100 a la cuantía de la miopía observada; la aberración esférica influye escasamente con un 12,5 por 100, debiendo achacarse el resto a la aberración cromática del ojo combinada con el efecto Purkinje. el Dr. Cabello, en su tesis Doctoral, pudiendo determinar experimentalmente estas aportaciones.

La importancia práctica de la miopía nocturna es grande, pues su compensación permite mejorar notablemente la agudeza visual nocturna multiplicándola, y al ser tenida en cuenta en los instrumentos de observación nocturna mejora su rendimiento hasta en un 1.300 por 100 (2).

(1) OTERO-DURÁN.—An. Fis. Quim. XXXVII, pág. 459, 1941. XXXVIII, pág. 236, 1942. XXXIX, pág. 567, 1943.

DURÁN.—An. Fis. Quim. XXXIX, pág. 555, 1943.

VASCO RONCHI.—"Optica VIII", 2, pág. 153. PALACIOS, loc. cit. y su discurso de ingreso en la Real Academia de Medicina.

CABELLO.—An. Fis. Quim. XLI, 4. Existen, además, trabajos de SCHUPFER (Florencia) y STIPA (Berlín).

(2) OTERO-CABELLO.—An. Fis. Quim. XI, 385, pág. 281, 1944, y JIMÉNEZ-LANDI y CABELLO, XXXIX, pág. 597, 1943.

En un reciente trabajo, Yves le Grand (1) hace un estudio sobre la visión nocturna, deduciendo que entonces el ojo al comodarse al infinito lo hace para una λ de 5.100 Å, de acuerdo con el fenómeno de Purkinje, desplazamiento cromático que contribuye en la forma ya dicha a la miopía nocturna.

No deberíamos terminar este capítulo sin referirnos al papel de la retina en la agudeza visual, que modifica notablemente los valores obtenidos para el poder separador del ojo considerado como instrumento óptico, del mismo modo que el tamaño del grano en la placa o película fotográfica puede determinar el poder separador y superponerse al que difracción y aberraciones nos dan para el objetivo; pero este asunto está tan ligado al papel del ojo como receptor de radiaciones, que es preferible discutirlo allí.

El ojo como receptor de radiaciones.

De las radiaciones solares que llegan a la superficie de nuestro planeta solamente la zona comprendida entre 4.000 y 8.000 Å llega a impresionar plenamente el elemento fotosensible del ojo, constituido por la retina. Todo el infrarrojo de longitud de onda superior a 15.000 Å es absorbido, creciendo regularmente la transmisión para la región comprendida entre 15.000 y 9.000 Å. En los 7.700 Å llega a la retina el 94 por 100 de la radiación, continuando la transmisión hasta el extremo violeta del espectro visible, en donde las radiaciones comienzan a ser absorbidas en fuerte proporción hasta 3.200 Å, punto por debajo del cual las radiaciones no llegan a ser apreciables por ser detenidas por el cristalino o por la córnea. El ojo no es impresionado más que por la zona de radiaciones, que tienen una transparencia análoga en el aire, más o menos enturbiado, que nos rodea. Si fuese transparente para zonas más amplias, el aspecto de los objetos cambiaría constantemente. El primero es el menos transparente a la radiación ultravioleta, por lo que con la afakia queda expuesta la retina

(1) YVES LE GRAND.—“Etudes sur la Vision Nocturne”. *Rev. D'Optique*, 17-11-1942.

a la acción nociva de ésta, que tiende a coagular las proteínas y a la formación de flóculos.

La iluminación de la retina viene determinada por la fórmula de la fotometría:

$$B' = k_0 \cdot B \sin^2 \theta$$

en la que k_0 nos representa el coeficiente de pérdida por absorción, dispersión y reflexión; B es el esplendor del manantial luminoso y θ es el semiángulo subtendido por la pupila desde la fovea, ángulo prácticamente constante en la visión nocturna.

En el caso de manantiales puntuales o cuasi puntuales, el máximo de concentración de la energía luminosa se realiza sobre la retina, por lo que si el manantial tiene una gran intensidad puede provocar la destrucción de los tejidos en dicha región, sin que padezca, por el contrario, el segmento anterior del ojo. Esto explica el escotoma central de la ceguera solar.

Por el contrario, si el manantial es extenso, la concentración de las radiaciones tienen lugar antes de la retina, hacia el polo posterior del cristalino; por ello, un campo de nieve, el cielo de verano o un baño de metal en fusión e incandescente pueden provocar lesiones en el cristalino.

La retina es la región fotosensible del ojo, pudiendo asimilarse a la capa metálica de una célula fotoeléctrica. De su estudio anatómico, en el que las observaciones de Cajal todavía son normativas, puede deducirse la existencia de tres regiones distintas: una intermedia, constituida por la capa de conos y bastones, órganos fotosensibles propiamente dichos, y donde se inicia el impulso nervioso; otra anterior a ella, compuesta de capas de células nerviosas y fibras neurales que se empalman y se relacionan antes de unirse al nervio óptico, y, por último, una tercera capa, situada al otro lado de la de conos y bastones; esta última, que atraviesa la luz proveniente de la pupila, contiene el epitelio pigmentario de carácter carotenóide, y que en muchos animales tiene una gran riqueza en xantofila. La misión de este epitelio puede estar conectada a la formación de la púrpura visual, conteniendo en algunos casos gránulos de pigmentos negros que tienden a evitar las reflexiones internas en los ojos cuando éstos han de trabajar en

condiciones muy diversas de iluminación. En ojos de animales que, por el contrario, hacen una vida predominantemente nocturna, estos gránulos están substituidos por el llamado tapetum, que al reflejar la luz la lleva de nuevo a actuar sobre la capa de conos y bastones, tendiendo de este modo a un máximo aprovechamiento del estímulo luminoso.

Los órganos fotoreceptores, conos y bastones, semejantes en su forma, es posible diferenciarlos con relativa facilidad si la retina que los contiene es de tipo mixto; es decir, si presenta inequívocamente ambos tipos. En retinas unitarias, o lo que es lo mismo, de un solo tipo de elementos fotosensibles, la distinción es mucho más difícil, y únicamente el progreso de nuestros conocimientos sobre las diferencias en los impulsos eléctricos desarrollados en la retina nos acercará más a una exacta diferenciación.

La experiencia diaria nos muestra una notable diferencia entre los fenómenos visuales cuando la iluminación es alta o baja. Si se investiga a diferentes niveles luminosos cualquier tipo de capacidad visual, se encuentra un límite que podemos fijar alrededor de 0,1 lux que separa dos zonas en que la correlación es completamente distinta. La visión con altos niveles luminosos o visión diurna nos aparece ligada con una gran agudeza visual, una perfecta percepción cromática y una sensibilidad máxima del ojo en el espectro normal y equienergético para una longitud de onda de 5.550 Å. Por debajo de los 0,1 lux tenemos, por el contrario, agudezas visuales pequeñas, visión acromática y sensibilidad espectral máxima para 5.100 Å aproximadamente.

Todo sucede, pues, como si en el ojo hubiese dos mecanismos visuales distintos, uno apto para visión nocturna y el otro para la diurna, y la diferenciación histológica de conos y bastones, juntamente con el descubrimiento de Schultze, que observó por primera vez que los animales de caza nocturna tienen un tipo de retina con bastones predominantes mientras que los de caza diurna lo tienen de conos, llevó a la teoría de la duplicidad, que, iniciada por el mismo Schultze, recibió con Parinaud y von Kries su desarrollo y enunciación más perfectas, siendo en la actualidad casi universalmente admitida.

Según ella, es preciso asignar a los conos, cuya concentración es máxima en la mácula y exclusiva en la fóvea, disminuyendo su presencia conforme nos alejamos del centro de la retina, la visión precisa de formas y el sentido cromático, mientras que los bastones, mucho más sensibles a la luz, son responsables de la visión a bajas luminosidades y no proporcionan sensación cromática alguna. El paso de un tipo de visión a la otra tiene lugar gradualmente mediante un proceso de adaptación, cuya duración coincide con la del crepúsculo en latitudes medias, de tal modo que el ojo queda preparado para la noche cuando ésta llega.

En la actualidad esta teoría de la duplicidad tiene como punto débil la interpretación de los fenómenos que hacen entrar en juego a la retina periférica. En estas regiones, aunque existen relativamente pocos conos y debía esperarse un tipo de visión de bastones o escotópica, no ocurre esto, y la retina se comporta de la misma manera que la central o fotópica, pero con una sensibilidad muy disminuída. Por otra parte, la falta de evidencia anatómica que permita asegurar que las sensaciones cromáticas de la visión fotópica pasan al cerebro a través de conductos neurales distintos de los atravesados por los impulsos nerviosos, que llevan la sensación acromática, es también uno de los escollos más peligrosos de la duplicidad.

Ramón y Cajal creía que estos caminos nerviosos distintos existían, y pudo describir células bipolares de bastones que sólo estaban en contacto con aquéllos, y células bipolares de conos que conectaban solamente estos receptores. Sin embargo, un trabajo reciente de Polyak no ha confirmado esta observación, creyendo que, aunque hay caminos separados para los impulsos que pasan desde ciertos conos (1), no existen para todos los bastones.

Los bastones o elementos fotosensibles de máxima sensibilidad están caracterizados por un valor liminal o umbral de aquélla que alcanzan únicamente después de un tiempo de adaptación. El estudio de este valor umbral tal como lo hemos

(1) POLYAK.—S. Arch. Ophthal. N. Y. 15. 477, 1936.

definido, o valor umbral absoluto, y el referente al mínimo contraste apreciable para cada iluminación o umbral diferencial, es de suma importancia para el conocimiento del ojo como receptor de radiaciones.

Para su investigación se procura tipificar las condiciones exteriores usando pupilas artificiales, puntos de fijación que nos permitan estudiar una determinada zona de la retina, sometiendo al manantial a un régimen de destellos mediante un metrónomo que corte a intervalos fijos el flujo luminoso, o permitiendo que tan sólo uno de éstos impresione al órgano mediante el uso de obturadores cuya velocidad pueda variarse a voluntad. Metrónomos y obturadores tienen como principal misión hacernos independientes de la luz propia de los medios oculares o caos luminoso.

Las condiciones de la experiencia deben escogerse de tal modo que el observador tenga la posibilidad de enunciar un juicio preciso y definido de presencia o ausencia del estímulo luminoso en condiciones fácilmente comprobables.

En las primeras determinaciones de los umbrales absolutos se seguía el criterio de fijarlos por la determinación de un valor promedio entre los obtenidos en series de observaciones. Más adelante, cuando las investigaciones de Barnes, Stiles y Burberg permitieron asegurar que muchas de las fluctuaciones observadas tenían naturaleza cuántica, se ha preferido fijar los valores umbrales por curvas que representan la probabilidad de obtener una observación correcta para niveles luminosos distintos, considerando como valor umbral el probable, o sea el correspondiente a una iluminación que proporcionaba una probabilidad de 50 por 100.

Las experiencias para determinar los valores umbrales absolutos que hoy merecen mayor garantía se realizaron con destellos de duración de 0,01 segundos, o inferiores, usando una luz verde monocromática de 5.100 Å. La visión es indirecta, ya que la parte foveal, compuesta sólo de conos, daría un valor umbral considerablemente superior. En estas condiciones el destello arroja al ojo una energía de 50 cuántos.

Por la teoría corpuscular de la luz, son de esperar en el emisor variaciones de la raíz cuadrada de esta cantidad, produ-

ciendo análoga incertidumbre en el receptor. pero las fluctuaciones son aun mayores, como tuvieron ocasión de experimentar Hecht, Shlaer y Pirenne (1), que obtuvieron valores de 50 a 148 cuántos para siete observadores. A la retina llegan energías mucho más pequeñas, ya que el 50 por 100 de la radiación es absorbida por las pérdidas de absorción, dispersión y reflexión en los medios del ojo, y la púrpura retiniana absorbe únicamente el 20 por 100 de la radiación que llega a ella, con ello que las fluctuaciones cuánticas en la retina oscilan de 5 a 14 cuántos.

Con estos valores, aplicando la fórmula de probabilidad de Poisson, los investigadores citados calcularon las curvas correspondientes, que coinciden perfectamente con los resultados experimentales.

De Vries (2), hace dos años, dió valores umbrales aun menores, considerando que basta un cuanto de luz para que exista estímulo y percepción luminosa, fundamentando su aserto en que sólo una parte de la púrpura visual (alrededor del 14 por 100) es activa, de acuerdo con las medidas de Granit, y que el resto forma un depósito que suministra la substancia fotosensible según va siendo necesaria. El número de bastones excitados en el ángulo límite de validez de la ley de Riccò y el carácter unívoco de sensación a percepción, así como las características anatómicas de las conexiones nerviosas de los bastones, las utiliza De Vries en apoyo de su tesis.

Si sus afirmaciones son ciertas y un solo cuanto de luz es capaz de provocar una percepción luminosa, no cabe duda que el ojo es un receptor de radiaciones de sensibilidad insuperable.

Las conclusiones de los autores citados pueden aplicarse a zonas del espectro distintas de las correspondientes a la sensibilidad máxima del ojo en visión nocturna, utilizada en las experiencias de Hecht y sus colaboradores, siendo en aquel caso mayor la energía cuántica de la emisión, ya que será preciso entonces multiplicar dicho valor por el coeficiente de sen-

(1) HECHT, S. SHLAER, S. AND PIRENNE, M. H., 1942.—J. GEN PHYSIOL. 25, 819.

(2) DE VRIES, 1943.—"Physica" 10, 7, 553.

sibilidad espectral para la zona en estudio, que será siempre inferior a la unidad de acuerdo con las curvas aprobadas internacionalmente, cuyo valor, que no es más que convencional, será preciso corregir para cada observador análogamente a lo que se realiza en la fotometría de precisión.

Del mismo modo puede aplicarse lo dicho a los conos, siendo entonces, como es natural, muchísimo mayores los valores umbrales objetivos, así como a los umbrales diferenciales, si bien en estos casos las comprobaciones directas son más difíciles.

El estudio de los umbrales diferenciales entre dos campos que emiten luz de distinta longitud de onda en regiones parafoveales distantes unos cinco grados de la fovea realizados por Walters y Wright (1), han permitido diferenciar netamente las curvas referentes a conos y bastones correspondientes a la variación de los valores umbrales desde muy bajas iluminaciones, hasta entrar de lleno en la visión diurna. La curva presenta dos tramos perfectamente definidos correspondientes a la visión de conos y bastones, con una zona de transición caracterizada por efectos de sumación.

Estos efectos de sumación, de carácter aún no bien determinado, permiten a veces reducir los valores umbrales, designándose entonces con el nombre de sumación fisiológica. En otros casos, la sumación se verifica exclusivamente porque en las fluctuaciones cuánticas es posible que el segundo estímulo rebase el umbral provocando sensación, mientras que el primero se ha perdido; en este caso la sumación se denomina de probabilidad, pudiendo determinarse por las pertinentes normas. Por último, Pirenne ha estudiado recientemente los efectos de sumación binocular que permiten rebajar los valores umbrales (2).

El estudio de las curvas de visibilidad en las diferentes zonas de la retina, desde 0 grados (visión foveal) hasta 10 grados, permiten obtener curvas que representan los valores umbrales para las diferentes longitudes de onda en las distintas zonas. Todas estas curvas, de forma parabólica, y cu-

(1) WALTERS, H. V., y WRIGHT, W. D., 1943.—Proc. Roy. Soc. B. 131-340.

(2) PIRENNE, M. H., 1943.—"Nature", Lond., 152-698.

yos vértices marcan la sensibilidad máxima del ojo para las zonas retinianas en estudio, tienen un punto de contacto de todas sus ramas en el rojo, lo que parece indicar que los umbrales parafoveales del rojo pueden ser determinados en todo o en parte por los conos.

La anatomía de conos y bastones y la de sus conexiones neurales, cuando éstas se conocen con seguridad, proporciona otra propiedad notable de la retina: la agudeza visual. Los elementos fotosensibles actúan como los granos de la emulsión fotográfica, pero con la diferencia de que en la retina no tienen un tamaño uniforme, siendo mínimo el de los conos para la fóvea y existiendo en esta región una conexión nerviosa única para cada cono; éstos, según la comparación de Lythgoe, actuarán en el cerebro como el cuadro de una central telefónica, encendiéndose la bombillita correspondiente al impresionarse cada uno, siendo preciso para obtener dos percepciones distintas que entre cada dos conos impresionados quede uno neutro, ya que de otro modo no podríamos diferenciar la sensación de un manantial no puntiforme y que excita a dos conos contiguos de la de dos manantiales diversos muy próximos entre sí.

La agudeza visual determinada por el diámetro de los conos de la fóvea coincide bastante bien con la del ojo en buenas condiciones de iluminación, por lo que esta teoría de la agudeza visual anatómica es admitida sobre todo para la visión foveal, si bien tiene también sus puntos débiles, como, por ejemplo, al tratar de explicar las alineaciones de un nonius que se realizan con ángulos hasta cinco veces inferiores al de la agudeza visual anatómica.

Fuera de la fóvea, y tanto para conos como para bastones, no existe conexión nerviosa única, sino que unos y otros, y singularmente los últimos, aparecen agrupados en batería, ocasionando con ello agudezas visuales muy inferiores a las obtenidas para la visión foveal.

Como se conoce exactamente el número de fibras del nervio óptico, que no pasa de 500.000, y siendo el número de conos superior a 6.600.000, existe una evidencia de que no todos los conos pueden conectarse a una única fibra. La conexión

en batería se impone, y la medida de la agudeza visual diurna en las diferentes zonas de la retina permite calcular fácilmente el número necesario de fibras nerviosas que sirven a cada una y capaz de explicar la agudeza visual allí existente. De esta forma Lythgoe (1) pudo deducir que en la parafovea una fibra servía a cuarenta conos.

Un cálculo análogo hecho para los bastones usando medidas de agudeza visual nocturna, asignaba doscientos bastones por fibra. Se han invertido los papeles, y no es ya la anatomía la que predice y explica una agudeza visual, sino la medida física de la agudeza la que prevé una anatomía.

El hecho ya conocido de que al disminuir la iluminación decrece la agudeza visual, ha sido estudiado experimentalmente repetidas veces, siendo las medidas modernas de más confianza las realizadas por Siedentopf, Meyer y Wempe, corregidas, para tener en cuenta el fenómeno de la miopía nocturna, por Jiménez-Landi y Cabello (2). Las curvas obtenidas tienen una forma de S con valores asintóticos para bajas y altas iluminaciones; todo parece, pues, indicar que la agudeza visual a bajísimas luminosidades tiende a un valor límite correspondiente al valor umbral, valor límite que Danjon y Couder fijan en doce minutos, sin que sus medidas sean por la técnica empleada de absoluta garantía.

Tenemos, pues, una retina que desde el punto de vista de la agudeza visual funciona como mosaico de piedras pequeñísimas en su centro y de mucho mayor tamaño en la periferia, en donde no podrán recogerse más que rasgos toscos.

Sería interesante asociar a este cuadro las imágenes imprecisas, pero no desenfocadas, que nos ofrece la visión de objetos con bajas luminosidades. Estos trazos que nos faltan en la imagen nocturna, varían constantemente de lugar, y pueden achacarse a que siendo el punto fisiológico de un tamaño muy superior en la visión nocturna al correspondiente a la visión diurna, y por otro lado, permaneciendo constante el tama-

(1) LYTHGOE.—*Proc. of the Phys. Society.*—50, 3-322.—1938.

(2) JIMÉNEZ-LANDI y CABELLO.—*An. Fis. Quím.* 39, pág. 597, 1943.

ño aparente del objeto, la experiencia que rige la interpretación de la sensación y que se resiste, por tanto, a operar con puntos de tamaño distinto de día y de noche, nos da una imagen final hecha a trazos.

De Vries, en su trabajo citado, da una interpretación cuántica al fenómeno, ya que por variaciones estadísticas habrá zonas de la imagen en que cerca del umbral no llegue el cuánto necesario para provocar la sensación, y esta zona aparecerá en negro en la imagen, variando su lugar estadísticamente y provocando la sensación de recorte.

El mecanismo del paso del estímulo cuántico a la excitación nerviosa implica la necesidad de un intermediario fotoquímico, ya que en contra de las teorías fotoeléctricas, fototérmicas y fotomecánicas, hablan, aparte de la existencia evidente de sustancias visuales, la existencia de un retardo relativamente considerable en la respuesta nerviosa al estímulo luminoso, así como los fenómenos de sumación observados al experimentar la acción del tiempo en los valores umbrales.

El proceso fotoquímico puede sintetizarse, suponiendo que en las células del sentido luminoso existan sustancias fotosensibles que se descomponen al recibir la luz; los productos de la descomposición causan la excitación nerviosa, que es tanto más fuerte y enérgica cuanto más intensa y rápida haya sido la descomposición de la sustancia visual; es decir, cuanto mayor haya sido la intensidad o más activa la frecuencia.

La teoría de la duplicidad sugiere la existencia de dos sustancias visuales; de ellas, la correspondiente a los bastones fué descubierta por Boll hace más de sesenta años, recibiendo por su coloración característica el nombre de púrpura visual.

La púrpura existe tan sólo en los bastones, creyéndose que es absorbida por la envuelta o parte exterior de ellos, sin que existan, sin embargo, pruebas definitivas. Esta hipótesis, además de ser sugerida por otros hechos, explicaría el por qué los peces que viven en aguas muy profundas, cuentan en su retina con enorme número de finísimos bastones, cuya existencia, si bien no puede producirles una gran agudeza visual, por la conexión en batería arriba dicha, serviría para almacenar grandes cantidades de púrpura necesaria para aprove-

char al máximo las pequeñas cantidades de luz que llegan a esas profundidades.

No existe púrpura alguna en los conos ni en los bastones de la parte periférica de la retina, pudiendo ser causa esto último del carácter fotópico de la visión periférica antes mencionado.

La púrpura pierde su color si se la expone a la luz, y si la retina está viva y sana lo regenera en la obscuridad. La púrpura es soluble en sales biliares y en otros reactivos; purificada su solución es roja con tinte azul, y, una vez desecada, presenta al microscopio una coloración violeta casi negra. En solución la púrpura palidece en pocos segundos; pero en este estado, la regeneración en la obscuridad no se verifica más que parcialmente.

La composición química de la púrpura es en el momento actual todavía muy discutida, siendo lo más probable que tenga dos constituyentes distintos. Sobre la existencia de uno de ellos existe casi unanimidad, asignándole una naturaleza proteínica, si bien no todas sus propiedades acusan este carácter.

El otro constituyente es para unos un carotenoide al que se le ha dado el nombre de retineno, producto de composición imprecisa y que regeneraría la púrpura en la obscuridad. La existencia de este retineno es postulada principalmente por Wald, Pickels y Hecht, mientras que otros investigadores, singularmente Krause, asocia la proteína a un lípido amarillo dorado que poseería las propiedades de un carotenoide.

El peso molecular determinado en ultracentrífuga es de 100.000, mientras los métodos de difusión dan como valor probable un submúltiplo de 810.000.

La fijación del proceso fotoquímico de decoloración y regeneración de la púrpura choca con dificultades bioquímicas, ya que no siendo casi nunca posible un estudio en vivo, hemos de operar con soluciones que pueden estar impurificadas por productos provenientes de epitelio y que son muy difíciles de aislar de la púrpura. Por ello no ha sido posible fijar con exactitud el coeficiente de extinción molecular; los experimentos de decoloración registrados fotoeléctricamente haciendo pasar

luz monocromática a través de una célula de vidrio que contiene la púrpura y recogiendo la radiación transmitida en una célula fotoeléctrica, han permitido a Lythgoe y sus colaboradores medir la velocidad de la decoloración y con ella determinar el producto de la eficiencia cuántica y el coeficiente de extinción molar. Con este valor en mano, Lythgoe ha demostrado que la eficiencia cuántica es la unidad, es decir, que cada cuánto de luz absorbido decolora una molécula de púrpura visual. Resultado que refuerza la teoría de De Vries, de la que ya nos hemos ocupado.

Fuera de ello el mecanismo de las reacciones está todavía en tela de juicio. Las curvas de absorción de la púrpura antes de su decoloración en el proceso intermedio denominado "naranja visual" y en el final o amarillo visual, han sido determinadas por Wald; pero la marcha continua de su máximo desde unos 5.020 \AA hacia las longitudes de onda largas no permite deducir con certeza la existencia de especies químicas distintas bien definidas. Según el mismo Wald, el ciclo reactivo sería aproximadamente: púrpura retiniana, luz, retineno más proteína, vitamina A más proteína, y púrpura. El papel de la vitamina A, indispensable para la regeneración, como lo comprueba la hemeralopía avitaminósica, es todavía muy discutido, ya que, mientras unos investigadores consideran comprobada su presencia en la púrpura, otros, sin negar su papel, relegan su existencia al epitelio.

La completa concordancia entre las curvas de absorción espectrométricas de la púrpura y la curva de luminosidad escotópica, constituyen la mejor prueba del papel de la púrpura en la visión nocturna y su fijación topográfica en los bastones.

Durante mucho tiempo se buscó en vano una substancia fotosensible que, a semejanza de la púrpura, nos explicase el proceso de la visión diurna. Esta substancia se escapó durante muchos años a la labor investigadora, siendo la principal causa el que en contraposición con la púrpura debería tratarse de un compuesto transparente, ya que su curva de absorción espectral habría de coincidir con la de sensibilidad cromática en la visión fotópica, y la observación de una eventual coloración sólo sería posible con el ojo adaptado a la obscuridad.

circunstancias en las que el ojo pierde por completo su sentido cromático.

No quedaba más remedio que un estudio por fotometría objetiva o visual acromática del eventual proceso degenerativo y regenerativo de la substancia de los conos, y esto lo ha realizado recientemente Von Studnitz.

Para ello utilizó retinas de animales que se compusiesen casi exclusivamente de conos, escogiendo la tortuga denominada por los naturalistas "testudo greca". Las primeras experiencias las realizó aislando las retinas después de una larga adaptación a la obscuridad, eliminándolas de sus pigmentos y colocándolas ante la apertura de un fotómetro de Pulfrich, realizando todas estas operaciones únicamente con luz roja. Sometida la retina a la acción de la luz blanca, se comprobó que la radiación recogida por el fotómetro crecía con el tiempo de irradiación, comprobándose con ello la existencia de una substancia visual en los conos.

La naturaleza química de la substancia visual de los conos es todavía muy oscura, así como su proceso de regeneración. Lo único que se sabe es que este proceso es mucho más rápido que en la púrpura.

Los espectros de absorción y la curva espectrofotométrica de la substancia visual de los conos, presenta una absorción máxima en la región de máxima sensibilidad espectral diurna. Von Studnitz, en los años 1941 y 1942, logró comprobar que la substancia de los conos no es única, sino una mezcla de tres substancias distintas correspondientes al rojo amarillo y azul, que absorben predominantemente zonas distintas y corresponden a tipos de conos diversos. El máximo citado anteriormente pertenece a la substancia visual del amarillo y da el núcleo para la curva de sensibilidad espectral fotópica.

Esta novísima aportación de Von Studnitz nos lleva de la mano a considerar algunos de los aspectos de la visión cromática.

El color ha sido el último baluarte de los partidarios de una teoría completamente subjetiva de la visión. Como hace notar Ronchi, la luz que nace como ente objetivo y extrasensorial al principio del siglo XVII, todavía en dicha época está

desprovista del atributo del color que únicamente las clásicas experiencias de Newton hacen entrar en la Física.

Pero estas posiciones perdidas las defiende duramente el cultivador de las ciencias de la Vida y también el poeta y el filósofo, que no se resignan a ver degradarse en fórmulas y fríos números las sensaciones, a la vez puras y complicadas, del color.

Tal vez las críticas más certeras contra las teorías físicas de los colores las ejerció Goethe en su famosa controversia con la doctrina de Newton. De esta obra del gran poeta, tan injustamente olvidada durante años, se mostraba su autor tan orgulloso, que llegó a decir: "No me hago gran ilusión de lo que he producido como poeta. En mi época han vivido buenos poetas, y antes que yo, poetas mejores todavía; y después que yo vendrán otros; pero he de alabarme, en cambio, de haber sido el único de mi siglo que ha sabido acertar en la difícil ciencia de la teoría de los colores, lo que me da motivo para sentirme superior a muchos."

Goethe parte de principios y conceptos que el físico rechaza. El color para él es una mezcla de luz y obscuridad, y no concibe que la luz clara del día, pristino fenómeno natural, pueda rebajarse a ser definida como un fenómeno compuesto. Goethe reprocha a Newton, y en general a los físicos, de que, al residuo de esa luz clara, después de torturarla haciéndola pasar a través de rendijas, diafragmas y prismas, se le denomine fenómeno natural. Es—dice—como si los arquitectos quisiesen hacer pasar sus palacios y castillos por bosques y montañas.

En realidad la discrepancia es fundamental: Mientras que Newton, como físico, consigue que los colores sean accesibles a medidas exactas, intentando con ello ordenar matemáticamente al mundo cromático lo mismo que había hecho con la mecánica, Goethe no trata de relacionar el color con la matemática, renunciando expresamente a ello; sin que esta renuncia sea preciso considerarla, como hace notar Heisenberg, sino como renuncia al utensilio matemático, ya que la matemática en algunas de sus más puras formas, tales como la simetría, sirve de base a buena parte de la obra de Goethe.

Goethe, en su teoría, tiene como fin último construir una doctrina que sea útil al artista, singularmente al pintor y al psicólogo, pero por ello automáticamente se coloca en uno de los extremos, contrario al de Newton, siendo preciso para la completa comprensión del fenómeno cromático armonizar Física, Fisiología y Psicología, que es lo que realizaron Young y Helmholtz en su teoría tricromática.

La idea de que los colores podrían resultar de la mezcla de un número restringido de primarios fundamentales era ya tan antigua entre los pintores que sabían obtener los matices más diversos partiendo de un número muy restringido de pigmentos. Leonardo de Vinci fijaba éstos en cuatro, mientras que la mayoría de los físicos del siglo XVIII pensaban no deberían existir más que tres.

Young, en su memoria "Sobre la teoría de la luz y los colores", que leyó ante la Royal Society el 12 de noviembre de 1801, asoció esta idea de los tres colores fundamentales, rojo, amarillo y azul, cuyas frecuencias eran para él proporcionales a los números 8, 7 y 6 a tres sistemas de fibras nerviosas capaces de ser excitada al máximo por las frecuencias fundamentales, disminuyendo la excitación al separarse la onda de dichas frecuencias, pudiendo además con este esquema explicar el daltonismo.

Maxwell comprobó experimentalmente que con tres radiaciones monocromáticas convenientemente combinadas pueden engendrarse todos los matices cromáticos perceptibles por el ojo, que son más de 110, más los púrpuras y grises. Asimismo, Maxwell pudo demostrar que con dos colores tan sólo, se consiguen producir los matices que percibe un daltónico.

Helmholtz completó esta teoría, suponiendo la existencia de tres sustancias fotosensibles, que respondían a zonas espectrales distintas y cuyos colores fundamentales eran el verde, el rojo y el violeta. Discípulos de uno y otro sabio formularon matemáticamente la teoría, consiguiendo Abney trazar teóricamente las curvas espectrales de las tres sensaciones fundamentales y que eran capaces de explicar los fenómenos cromáticos, no solamente normales, sino también los observados

en individuos ciegos de un color o completamente acromáticos, experiencias que se han considerado como la piedra de toque fundamental de todas las teorías cromáticas.

Frente a esta teoría de Young-Helmholtz, propuso Hering su doctrina de los pares de colores reversibles, que fué ampliada y completada por sus discípulos, logrando gran número de adeptos sobre todo entre psicólogos y fisiólogos y fundada principalmente en conceptos netamente psicológicos. La teoría de Hering no puede explicar los fenómenos fotoquímicos visuales, y tampoco tiene base anatómica ni fisiológica, siendo netamente empírica y cuya exégesis se sale de los límites que me he trazado.

El aislamiento de las sustancias visuales de los conos y la determinación de sus curvas de absorción espectral hechas por von Studnitz y que coinciden casi exactamente con las previstas teóricamente por la teoría de Young-Helmholtz, han dado una maravillosa comprobación a esta teoría, no restando más que encontrar anatómicamente la diferencia entre los órganos receptores cromáticos, que, prevista por Cajal, no ha podido lograrse todavía de modo indiscutible.

* * *

Voy a terminar, señores: Por lo expuesto se comprende lo injusto de aquel juicio, falsamente atribuído a Helmholtz, de quien se asegura que al considerar algunos de los defectos del órgano visual desde un punto de vista estrictamente físico, afirmó que si un óptico hubiese intentado venderle un instrumento tan defectuoso, se lo hubiera rechazado indignado.

Por el contrario, si consideramos al ojo maravillosa máquina fotográfica con sistemas ópticos capaces de obtener buenas imágenes de objetos situados prácticamente a cualquier distancia, y con ángulos y aperturas mayores que los alcanzados hasta hoy por la técnica más depurada, con un poder separador que alcanza el límite teórico y que coincide maravillosamente con el propio de su placa sensible: la retina; si además se observa que este aparato, prácticamente sin aberraciones, reacciona ya a un cuánto de luz, mínimo paquete óptico-

energético posible, y que todavía funciona sometido a la enorme energía luminosa del sol; que el proceso de revelado, latencia de las imágenes y reacciones químicas que provocan las corrientes nerviosas que transmiten el cuadro exterior se realizan en tiempos cortísimos y con rendimientos próximos a la unidad, que a plena obscuridad y cuando ya el enfoque nos sería útil, por las ametropías nocturnas queda el ojo enfocado a la distancia de la mano extendida, contribuyendo así a nuestra seguridad; que este mismo maravilloso instrumento nos permite la síntesis y análisis de multitud de matices cromáticos, y si pensamos que el hombre, al imitar toscamente los atributos de este único instrumento, ha tenido que recurrir a un buen número de procesos y aparatos distintos como la cámara fotográfica, toda la gama de emulsiones sensibles que en su diversidad no cubre la escala de sensibilidad que abarca la retina, la fotografía en colores, el telémetro estereoscópico calcado de la visión binocular, y la célula fotoeléctrica, que si quiere acercarse a la sensibilidad absoluta del ojo es preciso dotarla de complicadísimos dispositivos amplificadores; si consideramos esto —digo—, no tenemos sino que humillarnos ante la Divina Sabiduría, que ha sintetizado en un solo organismo, regalo de su Infinita Bondad al hombre, tantas y tantas maravillas.

Y en este cuadro, ¿qué papel le queda al investigador?...

Mucho hemos hablado aquí de Kepler, genial descubridor de tantos fenómenos visuales, y así como él, al encontrar las leyes que rigen el movimiento de los planetas, veía en su sencillez una huella de la Armonía de la Obra del Creador, el investigador, al ir descubriendo nuevos fenómenos que se encadenan y enlazan, dando aún mayor belleza al cuadro de la filosofía natural, ha de considerar el fruto de su trabajo como un don divino que le permite levantar la punta del velo que aún oculta aspectos del plan grandioso de la creación y el poder abismarse por primera vez en su belleza y armonía constituirá su gloria y su premio.

He dicho.

CONTESTACIÓN

DEL

Excmo. Sr. D. José María Torroja Miret

Excmos. Sres. Académicos:

Señoras y señores:

Una vez más recibo el honroso encargo de contestar, en nombre de la Corporación, al discurso de ingreso de un nuevo Académico. Y, como en la última, el que hoy llega a nuestras filas es un distinguido marino de guerra.

Entonces (1) fué el sabio Almirante de la Armada excelentísimo Sr. D. Wenceslao Benítez Inglott, Director del Observatorio de Marina de San Fernando, a quien yo mismo había presentado como candidato en la Sección de Ciencias Exactas, a la que pertenezco, reparando con ello la injusticia que representaba la ausencia durante largo tiempo del “botón de ancla” en los estrados de las Reales Academias.

Hoy es un Comandante de Artillería de la Armada, no menos distinguido, el Excmo. Sr. D. José María Otero Navascués, adscrito a la Sección de Físicas, por lo que en su presentación no pude tener parte, aunque sí —y con satisfacción plena— en su elección, y para designarme padrino suyo en este acto, el Presidente de la Academia ha tenido que acordarse de cierto modesto trabajo mío, publicado hace veintidós años en Salamanca y ampliado hace pocos días en la Universidad de Oporto y cuyo tema guarda cierta relación con el del interesante discurso que acabáis de oír.

Entre las fechas de ingreso del Almirante Benítez y del Comandante Otero, otros tres ilustres marinos han recibido análoga distinción: el General de Ingenieros de la Armada

(1) 5 de mayo de 1943.

D. Juan A. Suances, en esta Academia; el Almirante Estrada, en la Española de la Lengua y el Capitán de Navío Guillén, en la de la Historia.

Congratulémonos de ver reincorporada a las tareas académicas, por nombres tan señeros, a la Marina de Guerra española, a la que tanto deben las Ciencias y las Letras en los tiempos pasados y presentes y de quien mucho esperan en los venideros y volvamos a centrar nuestra atención en el héroe de la fiesta que estamos celebrando.

* * *

Hijo del cristiano y culto Marqués de Hermsilla, fundador en 1911, con otros ilustres historiadores, de la *Revista de Historia y Genealogía españolas*, nació el Excmo. Sr. D. José María Otero Navascués en 1907, ingresando a los quince años, con el número 1, en la Academia de Artillería de la Armada, de la que cinco años más tarde salía con el mismo honroso puesto, con un notable proyecto de fin de carrera que versó sobre el tema "Instalación siderúrgica para utilizar la hematites roja del devónico leonés-asturiano".

Apenas terminados sus estudios académicos, comienza a completarlos en los Laboratorios metalúrgicos de los Talleres de Precisión de Artillería, de Madrid y Factorías de Trubia y Reinosa y en el Laboratorio de Investigaciones Físicas, con los Profesores Palacios y Scherrer, haciendo en la Facultad de Ciencias un curso de Mecánica Química.

Con esta base, va pensionado a Zurich, en cuya Escuela Politécnica trabaja sobre Cristalografía de rayos X, con Scherrer y sobre Metalografía, con Ros.

En los años siguientes, hasta 1933, labora en el Instituto de Optica de Berlín, bajo la dirección del profesor Franz Weider y visita repetidamente los más importantes establecimientos científicos de Alemania.

Regresado a España en 1934, funda el Laboratorio de Optica de la Marina, y sale nuevamente para asistir al II Congreso de la Asociación Optica Italiana y al Internacional del

Alumbrado, que se celebró en Berlín y Karlsruhe y en el que desempeñó la Secretaría de la Comisión española.

A su regreso, es nombrado profesor de Óptica Física y Jefe de Estudios de la especialidad de Óptica para Oficiales de Marina e Ingenieros Civiles en el Instituto de Ampliación de Estudios e Investigación Industrial.

Apenas comenzada en Madrid la negra noche de la dominación roja, se ve en grave peligro, y ha de acogerse a uno de los refugios bajo pabellón extranjero, que de mala gana toleró aquélla, como resto de caballerosa tradición medioeval, hoy desaparecida.

Al fundarse en 1940 el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Otero es nombrado Vocal de su Patronato de "Alfonso el Sabio" y Secretario del Instituto "Alonso de Santa Cruz".

Creada en éste, a propuesta de su Subdirector e ilustre compañero nuestro, D. Julio Palacios, una Sección de Óptica, a la que pronto es incorporada la ya existente de Espectroscopia, Otero ocupa su Jefatura.

Al llegar a este momento, la actividad de nuestro compañero irrumpe en los más diversos campos, y mi labor como biógrafo suyo es agobiadora.

El Ministerio de Marina le encarga de organizar, junto con el Capitán de Fragata D. Alfredo Guijarro, un Laboratorio y Taller de Experiencias Físicas de aquel Departamento, y seguidamente le nombra Subdirector del Laboratorio y Taller de Investigación del Estado Mayor de la Armada, en el que se fabrican toda clase de aparatos ópticos de precisión para la Armada: anteojos, sextantes con tolerancias no superiores a las admitidas por el Almirantazgo británico para los de la clase A, gemelos comparables con los de la casa Zeiss, aparatos para dirección de tiro de varios tipos, y actualmente hasta un ecuatorial para la cátedra de Astronomía de la Escuela Naval de Marín.

Convencido de que, como decía Von Rohr, para tener una buena industria óptica es indispensable disponer de un cuerpo de buenos calculistas que posean, no sólo los necesarios conocimientos de óptica y de matemáticas, sino también el instinto

o golpe de vista para plantear con acierto el problema en cuya solución se ocupan, Otero lo ha formado en España, utilizando elementos valiosos de su Sección del Instituto "Alonso de Santa Cruz" y del Laboratorio de la Armada, y a él se deben en gran parte los éxitos logrados hasta la fecha en este interesante y difícil ramo de la técnica moderna.

En la Sección de Óptica del Instituto "Alonso de Santa Cruz" trabajan en la actualidad nueve post-graduados y catorce auxiliares y se han publicado desde 1940: 29 Memorias originales sobre diversas ramas de la Óptica geométrica, Física, Instrumental y Fisiológica; sobre Fotometría y Cálculo de sistemas, y de ella han salido ya dos Catedráticos de Física de Universidad, tres tesis doctorales de Ciencias Físicas y tres Tenientes de Armas Navales (por oposición entre Doctores, Licenciados e Ingenieros Civiles).

No deja, entretanto, nuestro nuevo compañero de redactar muchos e importantes informes sobre nuevos aparatos ópticos y de mando a distancia de la Artillería, no pudiendo yo ahora, por su índole reservada, reseñarlos.

Y como broche y remate —hasta hoy— de la brillante labor de Otero, ha descubierto recientemente, en unión de D. Armando Durán, Catedrático de Óptica de la Central, el fenómeno de la miopía nocturna, de que acaba de darnos cuenta en el discurso que con todo entusiasmo hemos aplaudido.

* * *

Llegado a este punto me veo obligado, por imperativo del Reglamento de la Corporación y del uso tradicional en esta Casa, a glosar de algún modo el trabajo del que dentro de breves instantes será nuestro ilustre compañero, y en el que, como habéis oído, su sólida formación científica le ha permitido desarrollar cumplidamente el difícil tema de la "Evolución histórica del pensamiento físico sobre el fenómeno de la visión", en su triple aspecto psíquico, fisiológico y físico.

Las dotes de investigador histórico que de su padre heredó D. José María Otero brillan en la síntesis que ante nuestros ojos ha hecho desfilar de los conocimientos y de los errores

que en el fenómeno de la visión tuvieron los sabios de las diferentes épocas, desde los griegos, con Arquitas de Tarento, Euclides, Leucipo y Galeno, pasando por el genial árabe Al-Hazen y los monjes medioevales Roger Bacon y Vitellio, hasta el gran Leonardo de Vinci, que descubre la analogía del ojo humano con la cámara oscura.

Magnífica ha sido la exposición de la *dióptrica ocular* de Kepler, genio científico que sabe plantear perfectamente el problema y aplicar a él sus más extraordinarias dotes de matemático y los conocimientos de los fisiólogos que en su auxilio llamó para realizar la indispensable labor de conjunto.

En todo este recorrido histórico, Otero se vale de los textos originales, salvando no pocos errores de copia y traducción que aun en obras excelentes suelen encontrarse.

El estudio del ojo como instrumento óptico es quizá lo más completo y moderno que sobre el tema se ha escrito hasta el día, y en él incluye notables investigaciones efectuadas por él y por sus discípulos, en especial el fenómeno de la *miopía nocturna*, descubierto en unión de su colaborador D. Armando Durán al estudiar los valores umbrales de la percepción visual.

Visión nocturna.

Al estudiar el funcionamiento del ojo humano con grande y pequeña iluminación, todo sucede —dice Otero— como si en él coexistieran dos mecanismos visuales distintos, uno para aquélla y otro para ésta.

La teoría de la duplicidad establecida por Parinaud (1) y Von Kries (2), de la que nos ha hablado el recpendario, asigna funciones distintas a las dos clases de órganos receptores existentes en la retina. Según ella, a los conos les está encomendada la visión diurna, mientras que los bastones han de cumplir su cometido con baja luminosidad. En apoyo de esta

(1) PARINAUD.—C. R., 93, 286, 1881; 99, 241 y 937, 1884; 101, 821 y 1,078, 1885.—*Ann. d'Ocul.*, 112 y 228, 1894.—*Arch. d'Ophth.*, 16 y 87, 1896.

(2) VON KRIES.—*Ber. Freiburger Naturf. Ges., Aug.*, 1894.—*Zs. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorg.* 12 y 81, 1896.—*Gracfes Arch.*, 42, III, 95, 1896.—*Klin. Monatsbl. f. Augenheilk.*, 70 y 77, 1923.—*Lumner. Phys. Zs.*, 14 y 97, 1913.

teoría se han aducido diversas pruebas, destacándose entre los fenómenos que la confirman el de Purkinje. Este fenómeno destaca la influencia del grado de iluminación sobre la sensibilidad cromática del ojo, en el sentido de que al disminuir el esplendor del objeto los rayos de longitud de onda más corta ganan en claridad relativa, mientras que los de longitud de onda mayor la pierden. El mismo Purkinje (1) describe los colores de las primeras luces del amanecer diciendo que al principio, cuando la luz es apenas perceptible, sólo se percibe lo negro y lo gris; los colores vivos como el rojo y el verde aparecen casi como negros, y durante mucho tiempo el amarillo no puede distinguirse apenas del rosáceo, siendo el azul el primer color que puede distinguirse sobre el fondo gris formado por los colores que todavía no se perciben.

Las diferencias existentes entre la visión diurna y la crepuscular están perfectamente acusadas, pudiendo decirse que la segunda está caracterizada por los hechos siguientes: percepción mínima de los colores, disminución de la agudeza visual, corrimiento de la sensibilidad espectral relativa hacia las longitudes de onda menores, aumento de campo visual y una mayor agudeza y sensibilidad para la visión periférica.

Al disminuir la luz y acercarse a la obscuridad se entra en la zona llamada de visión nocturna, caracterizada también por la existencia del fenómeno de la miopía nocturna, a cuyo descubrimiento y estudio va unido el nombre de nuestro nuevo compañero y de su colaborador el profesor Durán. No cabe señalar una frontera perfectamente delimitada entre la visión crepuscular y la nocturna, ya que dentro de ésta se encuentra el límite inferior del fenómeno de Purkinje, en que se ha perdido toda sensación cromática, mientras que la miopía nocturna, en su aspecto de pérdida del poder de acomodación, comienza a presentarse en iluminaciones de 0,01 asb., valor que cae dentro de la visión crepuscular.

Merece la pena describir el fenómeno de la miopía nocturna, por ser el que caracteriza un tipo de visión en el que el

(1) PURKINJE.—*Beob. u. Vers. z. Physiologie d. Sinne.*—B. d., 2, Berlin, 1825.—*Mag. f. d. ges. Heilk.*, 20, 199, 1825.

estudio más importante que se ha realizado lo ha sido por compatriotas nuestros. Además, en el discurso que acabáis de oír a nuestro nuevo compañero ha querido hablar poco de su tarea investigadora y justo es que sea reseñada.

El fenómeno que nos ocupa fué hallado, como tantos otros descubrimientos, buscando algo completamente distinto; por eso es interesante hablar de su génesis, aunque sólo sea brevemente.

Desde tiempo atrás se había observado una notable discrepancia entre la ley teórica que relaciona el rendimiento fotométrico de un instrumento telescópico y el diámetro de su pupila de salida con los resultados experimentales, siendo siempre los rendimientos obtenidos para grandes pupilas notablemente inferiores a los que, según la teoría, debieron obtenerse.

Dada la importancia teórica y práctica del problema, se decide Otero a abordarlo, realizando con sus colaboradores series de medidas con las mínimas cantidades de luz necesarias para que el ojo pueda tener grandes diámetros pupilares. En las realizadas con gran escrupulosidad por la Dra. Piedad de la Cierva observa una serie de anomalías que se presentan de un modo sistemático, que parecían indicar que el ojo no tiene su máxima eficiencia cuando está enfocado al infinito, sino cuando acomoda a distancias menores. Intuyendo la importancia de lo observado, abandona el primitivo proyecto, que más tarde ha de ser resuelto por el mismo, y realiza, en íntima colaboración con el hoy catedrático D. Armando Durán, una serie de estudios sistemáticos que pronto les conducen al fin buscado: el descubrimiento de un notable defecto visual que tiene el ojo cuando trabaja cerca de los umbrales absolutos de la visión, defecto equivalente a una miopía de dos dioptrías que nos afecta a todos por igual. Es interesante señalar el hecho de haberlo sufrido la Humanidad sin haber sido descubierto hasta fecha tan reciente.

Interesante es también mostrar a vuestra atención, para subrayar más el mérito del descubrimiento, que en estos últimos años han sido muchos los que en el campo de la óptica

fisiológica han abordado el estudio de la visión con bajas luminosidades, sin que ninguno haya llegado a descubrir nada tan importante e interesante como el fenómeno que por españoles ha sido dado a conocer.

La miopía nocturna puede definirse del siguiente modo: cuando el esplendor del objeto contemplado por un ojo con poder de acomodación normal, o el de su campo circundante, es muy pequeño, disminuye considerablemente la distancia del punto remoto. Esta distancia, expresada en dioptrías, tiene para ojos emétopes un valor de -2 ; es decir, que un ojo normal se hace miope en esa cuantía, mientras que un ojo hipermetrope de dos dioptrías se hace emétrope en la obscuridad. El estudio de las causas de este fenómeno ha motivado varios trabajos en los que, con las vacilaciones propias de toda nueva teoría, se ha ido acotando el estudio de los factores determinantes hasta llegar al que hoy está admitido como más probable, que es el de la pérdida del poder acomodativo.

La aberración esférica, causa que inicialmente parecía como la más probable del fenómeno, fué estudiada por Otero y Durán de forma tan definitiva que Ronchi consideró como suficiente para demostrar que por sí sola no era capaz de explicar aquél. Esta misma hipótesis fué definitivamente desechada después de los trabajos experimentales del colaborador de Otero, Dr. D. José Cabello, que fijaron su participación al fenómeno en cuantía inferior a $1/4$ de dioptría.

Vasco Ronchi (1), Director del Instituto de Optica Italiana, en un trabajo sobre las causas de la miopía nocturna, aventura la hipótesis de que la aberración cromática del ojo, combinada con el efecto de Purkinje, sea la causa que pueda explicar el fenómeno. Los trabajos realizados en la Sección de Optica del Instituto "Alonso de Santa Cruz", que dirige nuestro nuevo compañero, no dejan lugar a duda de que la hipótesis anterior, de mecanismo ingenioso y sencillo, sólo puede ser causante de una parte pequeña de la totalidad del fenómeno; es decir, que la causa principal de éste ha de ser otra. En apoyo

(1) V. RONCHI.—"Le cause della miopia notturna."—*Optica*, febrero 1943, página 153.

de la hipótesis de los autores de que fuese la acomodación la causa fundamental de aquél vino el trabajo de Durán (1) sobre los valores umbrales, en el que por primera vez se demuestra que la amplitud de acomodación va disminuyendo al decrecer el esplendor de la mira, existiendo una acomodación negativa de 1 a 1,5 dioptrías. Estas medidas de Durán hacen pensar que todo sucede como si el ojo, al no recibir estímulo luminoso alguno, quedase acomodado a — 2 dioptrías; es decir, que el ojo en la llamada visión de reposo trata de representar los objetos a corta distancia acomodándose ligeramente.

La miopía nocturna parece indicar, a causa de la pérdida del poder de acomodación señalado, que la teoría de acomodación de Gullstrand-Helmholtz tiene más visos de verosimilitud que la de Tscherning, aunque la prueba no sea concluyente del todo. La importancia del fenómeno se hace notar en el estudio del rendimiento fotométrico de los instrumentos teniendo en cuenta la miopía nocturna. La ganancia lograda al tener en cuenta el nuevo fenómeno puede suponer de un 200 a un 300 por 100, cifra muy superior a todas las ventajas que puedan obtenerse por procedimientos físicos o geométricos aplicados a la fabricación o cálculo de sistemas. Así el propio Otero (2) ha podido consignar que en un instrumento cuyas lentes tenían sus caras cubiertas de láminas antirreflectoras se obtenía una mayor ventaja teniendo en cuenta la miopía nocturna. Desde un punto de vista oftalmológico, ha deducido el Dr. Carlos Costi varias conclusiones que presentó en la Asamblea de la Sociedad Oftalmológica Hispano-Americana celebrada en Valencia en el año 1943 (3).

En el Extranjero también ha despertado interés extraordinario el estudio del fenómeno. La lectura de los dos primeros

(1) A. DURÁN.—“Los valores umbrales de la miopía nocturna.”—*Anales de Física y Química*, 39, página 579, 1943.

(2) J. M. OTERO Y J. CABELLO.—“Una comprobación experimental de la importancia del factor fisiológico en el rendimiento de los aparatos ópticos.”—*Anales de Física y Química*, 40, 281, 1944.

(3) C. COSTI.—“La miopía nocturna. Sugerencias de interés oftalmológico.” XXXI Asamblea de la Sociedad Oftalmológica Hispano-Americana.—Valencia, septiembre de 1943.

C. COSTI.—“Sobre la miopía nocturna.”—*Arbor*, número 2, página 242.

trabajos publicados por sus descubridores ha dado lugar a que el profesor Ronchi, antes citado, publicase un trabajo muy interesante, del que ya hemos hablado, tratando de explicar sus causas. En él, después de reconocer la importancia grande que tiene el fenómeno en el estudio del rendimiento fotométrico de los instrumentos, hace una crítica elogiosa de los trabajos de nuestros compatriotas. Considera el tema de tanto interés, que pide a Otero le envíe separatas para poder iniciar con sus discípulos un estudio sistemático del fenómeno. La vida azarosa de Italia en estos últimos tiempos no nos ha permitido conocer los resultados obtenidos por la Escuela del sabio profesor Ronchi, ya que sólo tenemos una breve referencia dada por él mismo de que el Dr. Schupfer, profesor de Oftalmología de la Universidad de Florencia, ha publicado un trabajo sobre la miopía nocturna.

La Sociedad para el Fomento del Instituto de Optica de Berlín invitó a Otero a dar una conferencia, que hubo de ser presentada por el doctor Stipa, Jefe de la Sección de Optica Fisiológica del Instituto, por no haber sido posible el viaje de aquél a la capital alemana. En la discusión intervinieron, entre otros, Kühl y Flügge, cuyos trabajos sobre temas de la visión son tan apreciados en Alemania. El tema interesó tanto, que el propio Stipa ha realizado varios trabajos sobre la miopía nocturna, habiendo tenido que enviar el Instituto de Optica de Berlín fotocopias de los trabajos de nuestros compatriotas a diferentes partes de Alemania que las solicitaban ante el interés que tenía para ellos el fenómeno recientemente descubierto.

Sir James French, el gran óptico escocés, tuvo pronto conocimiento del mismo, y sin duda, a través de él o de sus colaboradores, pasó a los especialistas del Almirantazgo británico, quienes con fecha 6 de junio del pasado año, lo introdujeron en forma de reglas prácticas en sus normas para la vigilancia y visión nocturna, de vital importancia en la guerra marítima.

Las características de la visión nocturna que acabamos de reseñar han traído como novedad fotométrica la creación de nuevas unidades de esplendor de iluminación que estén de acuerdo con las mínimas cantidades de luz que han exigido los

oscurecimientos antiaéreos de las ciudades de los países beligerantes (1).

En efecto, tomado como unidad fundamental el esplendor cuya expresión analítica es la siguiente:

$$B = \frac{1}{M} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda,$$

en la que: V_{λ} representa el coeficiente de sensibilidad espectral de los conos con valor igual a la unidad para $\lambda = 5550 \text{ \AA}$.

S_{λ} el flujo energético espectral por unidad de superficie del emisor para una temperatura cromática de 2360° K . expresadas en watos por cm^2 .

M el equivalente mecánico de la luz cuyo valor es $1,55 \times 10^{-3}$ watos por lumen para la visión diurna

vemos que en dicha visión variarán los valores de V_{λ} y del coeficiente M , la primera, porque debido al fenómeno de Purkinje, la sensibilidad espectral del ojo caracterizada por ella, sufre un desplazamiento hacia las longitudes de ondas cortas, como ya hemos dicho, pasando el λ correspondiente a la máxima sensibilidad de 5550 \AA a 5020 , teniendo, además, ligeras variaciones el perfil de ambas curvas, y M también cambia por la mayor sensibilidad del ojo, en visión nocturna. Por ello tendremos que cambiar los M y V_{λ} por \bar{M} y \bar{V}_{λ} obteniéndose un B distinto que denominaremos \bar{B} .

(1) "Bekanntmachung der DLTG über die Einführung von Dunkelleuchtdichte und Dunkelbeleuchtungsstärke."—*Das Licht*, 10, 103, 1940.

K. S. WEAVER.—"The visibility of radiation at low intensities."—*J. Op. Society Amer.*, 27, 36, 43, 1937.

A. DRESLER.—"Messung und Berechnung von "Dunkelleuchtdichte" und "Dunkelbeleuchtungsstärke."—*Das Licht*, 10, 118-120, 146-147, 1940.

A. DRESLER.—"Grundlagen der "Dunkelleuchtdichte."—*Das Licht*, 10, 113, 1940.

W. ARNDT.—"Lichttechnische Betrachtungen an einigen Aufgaben der Luftschutzverdunklung."—*Licht und Lampe*, 29, 293-294, 309-310, 1940.

O. REEB L.—"Schneider Dunkelleuchtdichte."—*Das Licht*, 10, 37, 1940.

A. DRESLER.—"Dunkelleuchtdichte und Dunkelbeleuchtungsstärke."—*A. T. M. V.*, 420-421, octubre 1941.

Con ello el esplendor nocturno vendrá dado por la fórmula:

$$\bar{B} = \frac{1}{M} \int_{\lambda'}^{\lambda''} S_{\lambda} \bar{V}_{\lambda} d\lambda.$$

Estas consideraciones llevaron a la sección alemana de la Comisión Internacional del Alumbrado a escoger nuevas unidades de esplendor (fundamental) e iluminación (derivada) de tal modo, que el nuevo sistema se empalme, sin solución de continuidad, con el de visión diurna, debiendo el punto de contacto estar inequívocamente situado en la zona de visión nocturna.

Con este convenio, y manteniendo constante la temperatura de color, o efectuando las pertinentes correcciones si ésta cambia, se consigue que los aparatos fotométricos graduados para medir esplendores diurnos, sean aptos para las medidas con bajísimas cantidades de luz.

La unidad de esplendor propuesta por Reeb y aceptada por la Comisión es el Skot del griego σκοτος (obscuridad), que tiene el mismo valor numérico que la milésima parte de un apostilb para la temperatura de color de 2360° K.

Derivada de ella, se usa el Nox como unidad de iluminación, definida por la fórmula:

$$1 \text{ nox} = \frac{1 \text{ skot}}{\rho}$$

en la que ρ representa el coeficiente de remisión.

Las unidades sólo son válidas para superficies irradiadas y para esplendores inferiores a 10 skot.

Agudeza visual.

El estudio biológico de la fisiología de la visión enseña que la agudeza visual o el poder separador del ojo crece con el número de células sensoriales existentes en la retina por unidad de superficie, siempre que estas células estén unidas individualmente al ganglio transmisor del estímulo. Si así no fuese, es

decir, si al mismo ganglio se uniesen varias células, disminuiría por unidad de superficies el número de ellas capaz de intervenir de modo distinto en la visión, perdiéndose, por lo tanto, en agudeza visual. Esto depende, por lo tanto, no sólo de la repartición de las células, sino de su acoplamiento. Sería de esperar que la agudeza visual medida como figura del mosaico de células retinianas hubiese de coincidir con el criterio de *mínimum separabile*; y en efecto, así ha sido, ya que se ha encontrado que el ángulo visual mínimo medido como separación de pieza de mosaico es de 18,5" —74", mientras que el ángulo correspondiente al *minimum separabile* es de 23,3" —64". Esta coincidencia entre la agudeza visual fisiológica y la morfológica, medida sobre la retina, ha sido lograda recientemente.

Las causas de error que existen en la comparación se fundan principalmente en las medidas fisiológicas de la agudeza visual, ya que ésta tiene variaciones grandes con la iluminación y, sobre todo, con el contraste. El estudio de los valores umbrales lleva consigo el estudio de la agudeza visual, cuya variación con la intensidad tiene como explicación más sencilla la dada por Hecht, quien supone que los umbrales de cada uno de los elementos visuales (conos y bastones) son diferentes, y por eso al crecer la intensidad entran en juego, cada vez más, elementos que aumentan progresivamente el poder separador, hasta que llega un momento en que todos están excitados, no obteniéndose, desde este momento, variación de la agudeza visual con la intensidad.

En la agudeza visual intervienen factores físicos, además de los fisiológicos, debiendo ser ambos tenidos en cuenta, ya que el estudio aislado de cada uno de ellos no conduciría a resultados ciertos de no tener en cuenta la totalidad de causas que intervienen. La pupila del ojo, actuando como diafragma de apertura, no sólo tiene la misión de limitar los rayos, sino que introduce efectos de difracción que limitan el poder separador del ojo. Considerando a éste como instrumento, sabemos que en el espacio-objeto su poder separador, que en este caso sería la agudeza visual, vendría determinado por la fórmula

$$\frac{1.22 \lambda}{D}$$

siendo D el diámetro de la pupila de entrada. Según esta fórmula, para pupilas inferiores a 3 mm. el poder separador determinado físicamente correspondería a ángulos mayores que el determinado morfológicamente por separación del mosaico retiniano, mientras que para pupilas superiores a 3 mm. es este último el que sirve de medida.

Schober y Jung (1) abordan el problema desde un punto de vista puramente físico, llegando a consecuencias interesantes, como la de la escasa influencia de la variación del índice debido a las diferentes longitudes de onda en la agudeza visual que, según ellos, viene influido principalmente por los fenómenos de difracción y por el escaso poder de acomodación del ojo en la región de las grandes frecuencias. Para su estudio parten de la teoría que establece Picht de la representación óptica por medio de la difracción. Llegan a la conclusión de que la repartición de intensidades luminosas viene regida por la fórmula

$$I_p = \frac{\pi^2 a^4}{\lambda^2 b'^2 f^2 x^2} (U_1^2 + U_2^2) = \frac{1}{x p^2} (U_1^2 + U_2^2) = \frac{\pi^2 a^4}{\lambda^2 b'^2 f^2 x^2} (C^2 + S^2)$$

en donde los signos tienen el significado siguiente:

$$U_1 = - \sum_{\mu=0}^{\infty} (-)^{\mu} \left(\frac{2x}{\gamma} \right)^{2\mu+1} J_{2\mu+1}(\gamma)$$

$$U_2 = \sum_{\mu=0}^{\infty} (-)^{\mu} \left(\frac{2x}{\gamma} \right)^{2\mu+2} J_{2\mu+2}(\gamma)$$

y

$$C = \cos x \cdot U_1 - \operatorname{sen} x \cdot U_2$$

$$S = \operatorname{sen} x \cdot U_1 - \cos x \cdot U_2$$

(1) H. SCHOBEL Y H. JUNG.—“Die Ursache der verschiedenen Sehschärfe des menschlichen Auges bei weissen und farbigem licht. *Zs. f. tech. Phys.*, 17, 84, 1936.

$J_n(\gamma)$ representa la función de primer orden de Bessel

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x_0 \cdot \frac{a^2}{2 \cdot b' \cdot f'} ; \quad \gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \rho_0 \cdot \frac{a}{b'} ;$$

$$b' = \sqrt{b^2 + \rho_p^2}$$

x e y son las llamadas unidades ópticas, f' = distancia focal, ρ_0 = radio del círculo de dispersión, x_0 = distancia del plano imagen al foco, a = radio de la pupila de entrada.

El estudio de la interpretación de las fórmulas le lleva a la conclusión de que las causas preponderantes de la agudeza visual son los fenómenos de difracción y los momentos fisiológicos; es decir, el diámetro de la pupila y la longitud de onda de la luz empleada.

Claro es que de los resultados unilaterales deducidos por Schober y Jung, lo mismo que sobre los que el mismo tema ha obtenido Lopicque, no deben sacarse deducciones definitivas, ya que el resto de los factores fisiológicos y psicológicos tienen influencia grande en aquéllos. Así ha podido separarse un trazo oscuro que subtiende $4''$, colocado sobre el fondo brillante, aunque en este caso más que un *minimum separabile* se trata del conocimiento de formas.

Por otro lado, French, en el estudio de telémetros de coincidencia, ha llegado a poner en prolongación trazos que subtienden cada uno de ellos $4''$, con un error de $1,1''$. Este hecho que señala French es el mismo que se presenta en la coincidencia de nonius y la explicación de la causa por la que llega a obtenerse poderes separadores tan por debajo de las dimensiones del mosaico retiniano y de los valores dados por la teoría de la difracción, lo que ha llevado a Hering a suponer que en estos casos la dimensión mayor del objeto recubre diferentes células sensibles que quedan impresionadas, sucediéndole a la línea que se va a llevar a coincidencia algo análogo, tomando parte en el fenómeno no dos células, sino varias.

No cabe, pues, estudiar la agudeza visual con un sólo criterio, sino que hay que tener en cuenta todos los factores que

en ella intervienen, y de ahí la complejidad y dificultad del estudio del fenómeno.

Las substancias visuales.

Con su habitual competencia, nos ha hecho D. José María Otero la descripción del ojo como instrumento óptico, estudiando la formación de imágenes en la retina, pero falta conocer el mecanismo de transmisión al cerebro; es decir, la transformación de la imagen en una sensación. Sabemos que los terminales nerviosos son los centros de transmisión, pero nos falta conocer el modo y manera de este paso. La solución de tan arduo problema se presenta llena de dificultades, y tanto su experimentación, delicada, como los resultados obtenidos en ella, pertenecen al dominio de la Óptica psicológica. Pero para el estudio del proceso primario que en la retina se realiza es interesante el conocimiento de las transformaciones fotoenergéticas, que no sólo influyen en el acto de la percepción, sino en el de la adaptación del ojo a las distintas luminosidades.

Los fenómenos que en aquél se desarrollan pueden dividirse en dos grandes grupos: físicos y químicos. Entre los primeros se encuentran la expansión y retracción del epitelio pigmentario como consecuencia de las llamadas fuerzas retinomotrices. Los fenómenos eléctricos, que constituyen la materia de estudio de la electrofisiología de la retina y del sistema nervioso ocular, se presentan dando lugar a la aparición de una fuerza electromotriz que coincide con el desarrollo de las células visuales. Las zonas espectrales actúan modificando el potencial con acción proporcional a su eficiencia cromática. El estudio de los electroretinogramas da elementos de juicio para la investigación del proceso primario en la retina.

De los fenómenos fotoquímicos y de las substancias visuales nos acaba de hablar Otero, que ha dado el ciclo de Wald, sobre el que hoy existe discusión, aunque la existencia de un caroteno con las propiedades de lo que él llama retineno, parecía afirmarse con los experimentos de Brunner, Baroni y Kleinau (1935). Recientemente Krause (1934-1937) considera la púrpura visual como una lipoproteína, quedando la duda de si

contiene o no lecitina o colesterol. Krause y Sidwell (1938) hablan de una proteína y un grupo prostético, separándose en la decoloración el lipoide de la proteína, dando lugar a un derivado caroténico. Sobre el proceso no hay acuerdo. Sería de interés, como señala Von Studnitz, estudiar la púrpura visual como una substancia fotodinámica, lo que quizá pudiera proporcionar más datos sobre este proceso que presenta tantas dificultades.

La substancia de los conos se regenera análogamente a la púrpura visual, pero su proceso no es conocido, pareciendo, en cambio, estar fuera de duda que el ácido fosfórico puede ser un producto de transformación de la substancia visual de los conos.

Vemos, pues, que es mucho lo que aun ignoramos en lo referente a la composición y funcionamiento de las substancias visuales.

Valores umbrales.

La teoría cuántica de los valores umbrales que nuestro nuevo compañero ha expuesto, de acuerdo con los resultados de Hecht y Pirenne y las experiencias y teorías de De Vries, son, sin duda, extraordinariamente sugestivas desde el punto de vista de las teorías físicas de la visión; pero no cabe duda que al lado de estas causas, puramente físico-químicas, los valores umbrales han de estar influenciados por factores fisiológicos y biológicos.

Citemos como ejemplo el hecho de que investigadores americanos e ingleses han encontrado en los valores umbrales absolutos fluctuaciones rítmicas de un período medio de dos a tres minutos, no pareciendo probable que estas anomalías, de carácter muy regular, estén relacionadas con las variaciones físicas de unos siete cuantos, sino que parece más bien tengan un origen fisiológico.

La aplicación cuántica a los umbrales diferenciales parece encontrarse con análogas circunstancias. Investigaciones de Craik y Wright han mostrado que el umbral diferencial no mejora, sino que, por el contrario, empeora ligeramente al ex-

poner un campo fotométrico de zonas contiguas y esplendores ligeramente distintos a niveles luminosos superiores a los que el ojo estaba previamente adaptado, realizando inmediatamente, y antes que éste haya alcanzado su nuevo estado de adaptación, medidas fotométricas. En este caso la teoría cuántica de los umbrales diferenciales exigiría, al ser mayor la concentración de púrpura, y por tanto, el número de cuántos absorbido, un menor umbral, lo que no sucede (1).

Las variaciones fisiológicas y biológicas que puedan influenciar los valores umbrales no son fáciles de determinar ni, por ello, de aislar. Las de corto período, que si existen van envueltas en la dispersión de las medidas, se superponen a las fluctuaciones cuánticas.

En otros fenómenos luminosos, sin embargo, se acusan variaciones de largo período perfectamente caracterizadas. Tal sucede, por ejemplo, con la curva de sensibilidad espectral diurna, en la que modernamente Dresler (2) ha descubierto fluctuaciones periódicas anuales al estudiar las relaciones entre los coeficientes de sensibilidad cromática de algunas líneas espectrales características.

Así, por ejemplo, la relación de los V_λ para las rayas amarillas del sodio y verde del mercurio, así como las de la raya amarilla a la verde del mismo metal, investigadas diariamente durante más de un año, en cabezal fotométrico, con esplendor del campo de unos 30 apostilb, siendo $1,5^\circ$ la amplitud del campo fotométrico y 30° la del circundante, han dado variaciones hasta del 6 por 100 la primera y 2 por 100 la segunda, siendo nimos ambos valores en junio, o sea que en el verano la sensibilidad espectral máxima tiende a correrse hacia las longitudes de onda corta, sucediendo lo contrario en invierno. Superpuesta a esta variación existe otra de menor frecuencia, con un período aproximado de veintinueve días, y que parece coincidir con las fases de la luna.

Estas variaciones, puestas de manifiesto por Dresler, pare-

(1) Discusión sobre la conferencia de Stiles "Current Problems of visual Research". Proc. Phys. Soc. London, 56-329-1944.

(2) A. DRESLER.—*Das Licht*, X-79-1940.

cen acusar modificaciones en la concentración o composición de las substancias visuales, y pudieran tener su paralelo en los valores umbrales.

* * *

El documentadísimo discurso de D. José María Otero Navascués, prueba incontrovertible de la justicia de su elección, os ha dado idea de la complejidad enorme del ojo, y de su funcionamiento, en las condiciones diversas en que se realiza.

Es decir, que en el acto sencillo y casi instintivo que en este instante realizáis de dirigir a mí vuestra mirada para ver si se halla cerca el final de esta lectura —como es ya de sobrada razón—, no sólo intervienen las leyes de la Geometría, de la Física y de la Química, y el funcionamiento fisiológico y psíquico de vuestro organismo, sino también, modificando este último y quizá también aquéllas, la Astronomía, la Meteorología y la Geofísica, introduciendo en un acto, al parecer tan sencillo, de vuestros ojos indiscutibles influencias de la Unidad del Cosmos, cuya complejidad infinita es una prueba más de la sabiduría del Supremo Creador.

He dicho.

Memorias y Publicaciones del Excmo. Sr. D. José M.^a Otero de Navascués

- 1928 Sobre la posibilidad de obtener estructuras martensíticas por temple energético de aceros suaves. Realizado en el Laboratorio Central del Ejército (inédito).
- 1930 Über die Kerbzähigkeit der Stähle bei verschiedene Temperaturen. Zürich 1930.
- 1940 Sobre un nuevo umbralómetro (en colaboración con C. Costi). An. Fís. y Quím. 37-121-1940.
- 1941 Rendimiento fotométrico de sistemas ópticos a bajas luminosidades (en colaboración con A. Durán) An. Fís. y Quím. 37-459-1941.
- 1942 Contribución al estudio de la miopía nocturna (Notas II y III, en colaboración con A. Durán). An. Fís. y Quím. 38-236-1942.
- 1942 Contribución al estudio de la aberración esférica simple, por el método interferencial de las franjas de sombra (en colaboración con J. Catalá). An. Fís. y Quím. 38-5-1942.
- 1943 Influencia del efecto de Purkinje con la aberración cromática del ojo en la miopía nocturna (en colaboración con A. Durán), An. Fís. y Química 39-567-1943.
- 1943 El efecto Stiles erawford y la miopía nocturna como factores determinantes del incumplimiento de la ley fotométrica de $L = KR^2$. An. Fís. y Quím. 39-555-1943.
- 1944 Una comprobación experimental de la importancia del factor fisiológico en el rendimiento de los aparatos ópticos (en colaboración con José Cabello) An. Fís. y Quím. 40-281-1944.
- 1944 Sobre la detección telescopia visual de manantiales luminosos puntuales o casi puntuales. (En prensa para publicar en An. Fís. y Quím.)
- 1945 Desplazamiento de la refracción normal de un ojo y poder de acomodación residual después de ser aquél sometido a la acción de los midriáticos (en colaboración con J. Cabello). An. Fís. y Quím. 41-1945.

- 1945 Agudeza visual con lámparas espectrales (en colaboración con L. Plaza). En prensa para publicar en los An. Fís. y Quím.
- 1945 Amplitud de acomodación en función de la intensidad y longitud de onda de los manantiales monocromáticos (en colaboración con Ríos y A. García-Abrines). En prensa para publicar en An. Fís. y Quím.
- 1943 Orientaciones bibliográficas para el estudio de la Óptica. (Biblioteca Hispana). Sección núm. 1.
- 1944 Desarrollo, estado actual y posibilidades del microscopio electrónico. Publicado en la revista *Arbor*. Tomo I. Enero-febrero 1944.
- 1945 Estudio sobre las ideas de Heisenberg en "Wandlungen in der Exakten Naturwissenschaften". Boletín Bibliográfico del Inst. Al. Cult. Enero-junio de 1945.
-