

# C01

## La luce nelle teorie della visione



La luce naturale non basta da sola affinché l'occhio possa vedere. La luce naturale si intreccia con la "luce della mente" attraverso l'occhio. Se questa commistione non avvenisse ogni luce rimarrebbe misteriosa ed oscura e l'uomo non sarebbe capace di vedere neanche una luce chiarissima.

Il problema principale è che noi non vediamo in realtà la luce, ma solo gli oggetti su cui essa si posa, si riflette e rifrange. Senza gli oggetti non sapremo riconoscere nulla, la luce in se sarebbe invisibile.

La luce naturale è fornita dal sole, ma può intendersi anche come luce che proviene dall'esterno, e quindi comprendere anche le varie tipologie di luce artificiale scoperte dall'uomo. Alla luce esterna fa eco quella interiore, dell'occhio. Solo dalla combinazione delle due riusciamo a vedere. In assenza di una delle due siamo ciechi.

Sono molti i casi di persone non vedenti sottoposte ad operazione per l'acquisizione della vista; in tutti i casi sono sorti innumerevoli problemi, non nell'operazione in se, ma nella educazione alla vista che è un processo lungo e difficile che il neonato sviluppa gradualmente da appena nato. Ogni tipo di apprendimento è normale che avvenga in maniera più veloce, ma soprattutto più semplice, durante i primi mesi e anni di vita come il camminare o il parlare. Se questa opportunità viene a mancare, tentare di sopperire a tale mancanza in seguito è enormemente più difficile e spesso senza buon esito.

Le persone operate rimangono in riabilitazione anche per anni, spesso entrando in fasi depressive fino al rigetto della vista stessa.

La verità è che la vista richiede molto di più che non un semplice organo fisiologico visivo: senza la "luce interiore", cioè senza la capacità di una immaginazione visuale formativa, saremmo ciechi. Certamente l'occhio ha ricevuto la capacità fisiologica di vedere ma esso deve implementare il proprio potere fin dall'inizio proprio attraverso l'atto visivo e la conseguente conoscenza.

Questo è il motivo per cui ridare la vista ad un non vedente è un compito più che del chirurgo, dell'educatore predisposto ad insegnare a vedere e a conoscere il mondo.

Le teorie della visione hanno avuto grandi teorici fin dal periodo clas-

sico, distinti tra scienziati e filosofi che si domandavano quali principi fossero alla base della vista umana.

Inizialmente avviene la graduale conquista del concetto di raggio luminoso e di raggio visivo.

Sembra chiaro come nessuno abbia mai messo in discussione la caratteristica rettilinea dei raggi luminosi (dall'osservazione delle ombre delle nuvole sulla terra dalla sorgente impropria), ne tanto meno della rettilinearità dei raggi visivi.

Gli scritti probabilmente più importanti a noi pervenuti sono l'*optikè* di Euclide (fine del IV – inizio del III sec. a.C.) e l'opera dallo stesso titolo di Tolomeo (II sec. d.C.), testi di carattere scientifico universalmente noti come base di tutte le moderne conoscenze.

È noto anche un testo, commentato tra l'altro da R. Grosseteste (scuola di Oxford), gli *Analitici* di Aristotele in cui la problematica dei fenomeni visivi è ampiamente discussa.

Ad essi vanno aggiunte le teorie sviluppatesi intorno all'argomento che possono sintetizzarsi in due grandi filoni: la teoria estromissiva, e quella intromissiva.

La teoria estromissiva venne formulata da Pitagora (VI sec. a.C.) il quale immaginava i raggi visivi come un fluido emesso dagli occhi; differentemente la teoria intromissiva, del filosofo atomista Democrito (V sec a.C.), ipotizzava che fossero i corpi ad emettere loro simulacri o scorze (o meglio *eidola* in greco, *species* in latino), capaci di contrarsi ed attraversare la pupilla ed infine trasformarsi in immagini.

In entrambi i casi, come già detto, tali raggi visibili erano rettilinei e derivabili per rifrazione o riflessione. Tale distinzione provocò la nascita di due altri grandi filoni di ricerca affiancati spesso all'ottica cioè diottrica e catottrica.

I riferimenti alle teorie estromissiva ed alla sua opposta si ripeterono per secoli e secoli fino alla totale accettazione di quella intromissiva, fortemente sostenuta, da Abu ibn al-Hasan ibn al-Haitham noto in occidente come Alhazen (965 – 1039) il quale, pur accettando tale dottrina, confutò l'esistenza degli *eidola* democritei contraibili sostituiti da infiniti punti di dimensione infinitesimale che non avevano

bisogno di contrarsi per poter passare attraverso la pupilla. Tali ipotesi vennero accettate definitivamente e riprese anche dai successivi ricercatori che troviamo di nuovo in occidente, grazie al ritrovato interesse per le scienze e gli studi dei testi classici e arabi, e precisamente in quella che viene definita la scuola di Oxford con i suoi maggiori esponenti: Robert Grosseteste (1168 – 1253), Roger Bacon (1214/15 – 1294 ca), Johannes Peckham (1240 – 1292). Bisogna ricordare dello stesso periodo anche il famoso monaco salesiano Witelo (Vitellione, 1220/20 – 1300/1314).

La scuola di Oxford sembrò, attraverso le teorie dei suoi esponenti, aver raggiunto la conoscenza assoluta nel campo della visione.

Bisogna dire che gli interessi per i principi fisico-percettivi, fisiologici, psicologici ed ottico-geometrici furono messi da parte con la scoperta della nuova scienza prospettica che provocò una grande esaltazione ed interesse in tutti i grandi esponenti teorici del rinascimento; con l'eccezione di Leonardo da Vinci che in molti suoi schizzi e appunti si cimenta sia nel disquisire delle ombre e del chiaroscuro (soprattutto per la questione della prospettiva aerea), ma anche delle teorie della visione sotto vari aspetti compreso quello fisiologico ed anatomico.

L'interesse per la *perspectiva*, in fondo, era talmente forte che la maggior parte degli altri aspetti grafici vennero messi da parte; in seguito ai trattati di tale periodo (possiamo dire monografici sul tema prospettico) seguirono altri scritti spesso divisi in capitoli, in cui venivano trattati (oltre alle tematiche rinascimentali) anche i temi del colore, delle ombre e del chiaroscuro, della prospettiva aerea e, spesso, anche di scenografia.

Gli interessi per gli aspetti foto-ottici ripresero più tardi con Francesco Mauriloco (1494 – 1575) e il suo *Photismi de lumine et umbra ad perspectivam et radiorum incidentiam facientes* del 1521, in cui, riprendendo le teorie del grande scienziato musulmano Alhazen, affermò che da ogni punto degli oggetti visibili vengono emessi dei raggi rettilinei in tutte le direzioni.

Seguirono gli studi innovativi di Johann Kepler (1571 – 1630) il quale per primo affermò che i corpi materiali sono costituiti da una infinità di

elementi minuscoli tra i quali quelli visibili emettono raggi luminosi in tutte le direzioni; tali raggi sono estesi all'infinito e nel momento in cui intercettano altri corpi opachi e possono essere riflessi o rifratti. Per primo Kepler teorizzò che tali raggi attraversano la pupilla creando un cono opposto a quello visivo con vertice nella pupilla stessa.

Nel 1637 venne pubblicato il testo sulla diottrica di Renè Descartes (1596 – 1650) nel quale viene ipotizzata la teoria corpuscolare della luce (già in realtà accennata da Witelo) poi perfezionata notevolmente da Isaac Newton (1642 – 1727), a cui si oppose Christian Huygens (1629 – 1695) con la sua teoria ondulatoria.

Ulteriori contributi vennero anche dagli scienziati P. Fermat e F. M. Grimaldi nel XVII sec., da T. Young e A. Fresnel nel XIX sec.

Alla fine del XIX secolo sembra ormai affermata la teoria ondulatoria quando il famoso scienziato James Clark Maxwell iniziò i suoi studi su una nuova e sconvolgente teoria che rivoluzionò tutti i fenomeni dell'ottica che si pensava ormai oggettivamente validi. Egli ipotizzò la natura elettromagnetica dei raggi luminosi teorizzando così quella che venne definita la teoria elettromagnetica basata sulle radiazioni.

## 01.1. Le teorie della visione nel mondo classico

Teorie sulla visione vennero ipotizzate fin da quando la filosofia e la scienza divennero basi culturali per una élite di studiosi, i cui testi sono pervenuti fino a noi tramandati nei secoli, anche se, in molti casi, si tratta di frammenti di opere.

Le motivazioni per cui le ipotesi sui motivi della visione iniziarono ad essere fatte nel mondo greco non sono esplicite; sappiamo che tale interesse risale a culture anche anteriori come in quella egiziana, ma un tale sviluppo lo ottennero solo in epoca ellenistica. È certo che la cecità e le malattie degli occhi hanno sempre riscontrato grande interesse tra scienziati e medici. Da questi interessi nacque la scienza della oftalmologia e molti filosofi iniziarono ad analizzare il senso della vista anche da un punto di vista fisico.

Tre diversi approcci erano presenti nella cultura greca: uno di tipo medico, concentrato sulla anatomia e sulla psicologia dell'occhio, nonché delle cure per le malattie oculari; un secondo di tipo fisico e filosofico, che si concentrava sulle questioni epistemologiche, psicologiche e fisiche; infine un approccio di tipo matematico, diretto principalmente alla spiegazione geometrica della visione spaziale.

Inizialmente queste teorie risentivano comunque della religione politeista e spesso venivano spiegate attraverso una rappresentazione dei fenomeni fisici per miti e storie epiche.

Secondo Empedocle, Afrodite ha forgiato i nostri occhi con i quattro elementi della cultura greca di terra, acqua, aria e fuoco, mettendoli insieme grazie all'amore. Poi "come quando un uomo, pensando di fare una escursione di notte, prepara una lanterna", accendendola dalla brillante fiamma del focolare e mettendogli intorno delle piastrine di vetro per ripararla dai venti, così Afrodite accese il fuoco dell'occhio dal primordiale focolare dell'universo, confinandolo con i tessuti (muscolari) della sfera del bulbo oculare. Inoltre furono posti nell'occhio dei varchi sorprendenti che permettevano di trasmettere il fuoco interiore, attraverso l'acqua dell'occhio, verso il mondo esterno, dando così origine alla vista.

La vista procedeva dall'occhio all'oggetto visto; gli occhi irradiano la loro stessa luce.

In tale teoria la luce del sole gioca un ruolo inferiore. Empedocle distingue l'esistenza della luce del sole, dice che è la terra a fare la notte quando si intromette sulla strada dei raggi solari. La luce solare è solo una parte del processo e già intuì che serviva qualcosa di più affinché avvenisse la visione, qualcosa di interiore all'uomo.

### 01.1.1 Gli atomisti

Non si può in realtà considerare tutti gli atomisti da Leucippo a Lucrezio come un unico filone, perché all'interno della stessa scuola si riscontrano diverse opinioni rilevanti. Tuttavia era pensiero comune considerare le sensazioni come causate dal contatto diretto tra organo sensoriale e una specie di materiale emanante dagli oggetti esterni che convogliava nell'occhio.

Leucippo, Democrito ed Epicuro erano d'accordo nel considerare che la percezione e il pensiero venivano a contatto nel momento in cui gli *eidola* penetravano dall'esterno; Leucippo e Democrito consideravano questi *eidola* come delle immagini particolari, uguali in forma agli oggetti visti, e che venivano emessi continuamente imprimendosi poi nell'occhio<sup>1</sup>.

Secondo Democrito (460 a.c. ca.) l'immagine visuale non si forma direttamente nella pupilla, ma è l'aria stessa frapposta tra l'oggetto e chi vede, ad avere quella determinata forma, sebbene contratta, cosicché da ogni cosa vista proviene una specie di emanazione, cioè aria che è solida e colorata e in questo modo essa appare nell'occhio<sup>2</sup>.

Inoltre egli dava una importanza particolare alla immagine che si forma sulla pupilla, ossia l'immagine del mondo esterno riflesso sulla pupilla. Egli è convinto che l'occhio sia composto di acqua, ma poi si contraddice quando va a discutere sulla maniera di vedere attraverso la semplice riflessione: Democrito sostiene che l'immagine che si forma nella pupilla è dovuta alla levigatezza del bulbo oculare (come

potrebbe essere levigato se è composto di acqua?), ed in realtà essa ha il proprio posto nell'occhio che vede<sup>3</sup>. Allora la vista si traduce in pura riflessione: l'occhio vede ciò che viene riflesso sulla sua pupilla. In questo modo Democrito non dà una spiegazione scientifica del fenomeno perché se la vista avvenisse effettivamente per sola riflessione, per assurdo, tutti gli oggetti riflettenti vedrebbero.

Lucrezio invece nel 55 a.C. ca. cerca di spiegare i *simulacra* (cioè gli *eidola* democritei) attraverso una serie di comparazioni con la natura. Egli considera i *simulacra* come fossero delle scorze rilasciate dagli oggetti e le immagina simili per esempio alla pelle del serpente quando muta la stessa, a come alla corazza delle cicale.

Ogni materiale, quindi, direziona radialmente gli *eidola* che entrano nell'occhio. Ma evidenti sono i problemi di questa teoria: se ogni oggetto emette queste immagini, come possono tali *simulacra* non interferire tra loro? Come può l'immagine di un oggetto molto grande contrarsi per entrare nell'occhio? Come avviene la vista? E cioè qual è il processo che si instaura tra chi vede e l'oggetto visto?

### 01.1.2 La teoria platonica

Platone (427 – 347 a.C.) studiò le dottrine di Pitagora e il suo contributo alla visione è simile a quello di Empedocle, anch'egli profondo conoscitore del filosofo.

La teoria platonica era però molto più approfondita e pose le basi di un filone che, attraverso gli sviluppi successivi di Euclide da un lato, basati sugli aspetti geometrici della visione, e di Galeno dall'altro, basati sulla fisiologia dell'occhio, persistette per circa 1500 anni.

Egli presenta la sua teoria nel *Timaeus*. Secondo Platone l'occhio possiede un fuoco che ha la proprietà, non di bruciare, ma di produrre una luce fioca<sup>4</sup>.

Questa luce interiore emanata dall'occhio si fonde con quella esterna naturale formando un unico corpo omogeneo che si allunga dall'occhio all'oggetto, un corpo capace di realizzare un legame tra gli oggetti

esterni e l'anima, una specie di ponte attraverso cui possono passare i movimenti sottili dei corpi esterni, causando la vista<sup>5</sup>. Rispetto ad Empedocle, in Platone la vista avviene solo dopo l'unione della luce interiore e di quella esteriore, unione che fa da mediatrice tra l'uomo e il mondo.

L'importanza del processo non sta tanto nella emissione di un efflusso, ma nella formazione del corpo attraverso la fusione tra raggi visuali e luce del giorno, che serve come una specie di materiale intermedio tra occhio e oggetto.

Bisogna però fare attenzione a non cadere in errore: la vista avviene non nel momento in cui l'efflusso interiore incontra quello dell'oggetto, ma dalla unione tra efflusso dell'oggetto e il singolo corpo omogeneo già formato precedentemente tra efflusso dell'occhio e luce esterna. Da questo incontro si producono dei movimenti che vengono trasmessi all'anima dove producono le sensazioni. Questi moti possono essere causati da particelle di differenti dimensioni, che Platone associa ai colori.

I colori sono un ulteriore tipo di sensazione ed hanno una diversificazione praticamente infinita in natura. Il colore è una fiamma (sfolgorio) che fluisce da corpi d'ogni tipo, ed ha le proprie particelle così proporzionate al raggio visuale da permettere la sensazione. Le particelle, che provengono da corpi diversi e penetrano il raggio visuale quando lo incontrano, possono avere diverse dimensioni: più grandi, più piccole o uguali a quella del raggio visuale stesso. Se esse sono della stessa dimensione allora sono impercettibili e dette "trasparenti"; le particelle più grandi contraggono il raggio, mentre quelle più piccole lo dilatano (fa un parallelo con il l'effetto del caldo e del freddo sulla carne). Queste particelle sono rispettivamente nere e bianche, ma particelle di diverse dimensioni provocano differenti movimenti (dilatazione e contrazione sono esempi di Platone) e differenti movimenti portano la sensazione di differenti colori (quindi non solo bianco e nero)<sup>6</sup>.

In Platone come in Empedocle, la rappresentazione del meccanismo della visione aveva ancora un'aurea mistica, mitizzata e poetica.

### 01.1.3 Aristotele

Come abbiamo visto, prima di Aristotele le teorie sulla visione erano ancora poco chiare e incomplete. Questo filosofo fu il primo a dare una discussione sistematica sull'atto visivo con definizioni accurate indispensabili per la comprensione del processo.

Aristotele naturalmente non accettò le teorie a lui antecedenti sulla luce e sulla visione. In primo luogo egli credeva che la luce non potesse essere un efflusso corpuscolare, né un fuoco, né un corpo in generale (come aveva affermato Platone) e nemmeno un'emanazione da un qualsiasi corpo.

In seconda istanza, considera errata una visione prodotta da una estromissione di un qualcosa di tale fattezza, tramite un raggio dall'occhio dell'osservatore<sup>7</sup>.

È assurdo supporre che la visione possa avvenire per estromissione, e che un raggio visivo possa, con questo metodo, raggiungere la distanza delle stelle.

*“Del tutto assurdo è dire che la vista vede per qualche cosa ch'esce da lei e che il raggio visuale si stende fino agli astri o che, uscita dall'occhio, si congiunge a una certa distanza con la luce esterna, come pretendono alcuni”<sup>8</sup>.*

Sarebbe stato più logico supporre che la fusione dei due flussi avvenisse, non all'esterno, ma all'interno dell'occhio. Ma egli considera questa ipotesi poco credibile, perché trova privo di senso il concetto di fusione di una luce con un'altra.

La sua posizione è in disaccordo con gli atomisti e con Platone anche sul bisogno di avere un intermediario fisico tra l'oggetto visto e l'anima-intelletto che invece lo guarda.

In sostanza egli concentra la propria attenzione su il *medium* tra l'osservatore e un oggetto, definendo la trasparenza, la luce e il colore dipendenti strettamente dal *medium*.

Il *medium* della vista è diafano, trasparente, una caratteristica che si trova in tutti i corpi, ma soprattutto nell'aria, nell'acqua e in altri corpi

particolari<sup>9</sup>. Questo “trasparente” è ciò che è visibile non per propria natura, ma a causa dei colori di qualsiasi altro oggetto e sostanza che si trovano dall'altro lato di esso. In parole povere non è qualcosa che riusciamo a vedere, ma qualcosa in cui vediamo attraverso.

Il *medium* della luce (*phos*) è uno stato particolare del “trasparente”, e risulta dalla presenza nell'ambiente di una luce qualsiasi. Aristotele parla di realizzazione del “trasparente”, del passaggio di esso da stato di sola potenzialità a stato reale, in modo che gli oggetti distinti dall'osservatore diventano visibili attraverso il *medium* illuminato.

Non essendo il *medium* una sostanza, la luce si propaga in esso svincolata dal tempo. Questa idea è evidentemente errata, ma d'altra parte la velocità della luce fu introdotta molto più tardi con le scoperte pubblicate da Albert Einstein nel suo famoso articolo del 1905 sulla relatività ristretta.

Terzo concetto della teoria di Aristotele è il colore (*chroma*). Secondo lui il colore è qualcosa che ricopre gli oggetti visibili ed ha la capacità di innescare movimenti nel “trasparente” durante il suo stato reale. Questo è il motivo per cui i colori non sono visibili senza luce, ma provocano movimenti del “trasparente” solo in presenza di essa, ed essendo inoltre continui, agiscono sull'organo sensoriale<sup>10</sup>.

Il processo quindi è il seguente: innanzitutto il *medium trasparente* muta il suo stato da potenziale a reale quando si trova in presenza di una qualsiasi luce, e poi viene scosso o intaccato dal colore dei corpi che vengono in contatto con esso e i cambiamenti che questo contatto provoca vengono trasmessi all'osservatore, provocando la vista.

Questa teoria viene sostenuta anche affermando che l'occhio è composto soprattutto di acqua, capace di relazionarsi con il “trasparente” e di recepire sia la luce che i colori in modo da creare una continuità del *medium* dall'oggetto fino all'interno dell'occhio.

In realtà una certa analogia con la teoria platonica esiste. In entrambi i casi, è chiaro, il problema della visione viene risolto considerando che l'occhio e lo spazio medio esterno diventano parti di una unica e omogenea catena capace di trasmettere i movimenti all'intelletto di chi guarda.

#### 01.1.4 Galeno e gli Stoici

Le teorie della visione degli Stoici sono strettamente legate al concetto di *pneuma* (soffio)<sup>11</sup>, un composto di aria e fuoco a cui gli stoici attribuiscono la funzione di tenere insieme, compatti, i due elementi passivi, l'acqua e la terra: ciò dipende dalla tensione, che il *pneuma* stabilisce tra le singole parti. Esso fa, dunque, dell'universo un continuum dinamico, una sorta di unico grande essere vivente, percorso incessantemente da questo soffio caldo.

Uno *pneuma* di tipo ottico fluisce dal centro della coscienza, detto *Hegemonicon*, verso l'occhio, eccitando l'aria che si trova intorno ad esso e provocando all'occhio uno stato di tensione e sollecitazione; la combinazione di questo *status* dell'occhio con la presenza della luce permette la connessione con gli oggetti visibili. Per la corrente stoica l'aria eccitata intorno all'occhio è come una estensione della nostra anima e, una volta eccitata, si dispone a cono la cui base viene impressionata dall'oggetto della visione, come se fosse un'asta che tocca l'oggetto.

Questa teoria venne accettata anche da Claudio Galeno di Pergamo (131-201 d.C.), sebbene ampliata, conosciuto semplicemente come Galeno, un medico greco. I suoi studi e le sue teorie hanno influenzato la medicina europea per più di mille anni.

Nato a Pergamo in Turchia da una famiglia di architetti, i suoi interessi erano molteplici: dall'agricoltura all'architettura, dall'astronomia all'astrologia, si interessò anche di filosofia, ma concentrò le sue potenzialità sulla medicina.

Dopo la morte di suo padre (148 o 149 d.C.) si trasferisce per studiare a Smirne, poi a Corinto ed infine ad Alessandria. Studia medicina per dodici anni e, tornato a Pergamo nel 157, lavora come medico, facendo pratica per diversi anni, fino al 162 quando si trasferisce a Roma dove intraprende una carriera eccellentissima nel campo della medicina fino a diventare principale medico alla corte di Settimio Severo.

Esegue vivisezioni di numerosi animali per studiare le funzioni dei diversi organi.

La sua personale teoria della visione venne proposta nel suo *testo De placitis Hippocratis et Platonis*<sup>12</sup> dove analizza criticamente le teorie antecedenti. Un oggetto sottoposto alla visione può reagire in soli due modi: o emanare qualcosa che raggiunge i nostri occhi e che ci fa percepire le sue caratteristiche intrinseche, o attendere passivo un potere sensoriale che proviene da noi stessi. La prima ipotesi non è accettabile perché, in primo luogo, sarebbe impossibile determinare la dimensione dell'oggetto dall'immagine (o potere o efflusso) che esso ci invia: per esempio l'immagine di una montagna dovrebbe comunque contrarsi in maniera spropositata per poter entrare nella nostra pupilla, il che ne deformerebbe la dimensione reale. Inoltre sarebbe assurdo per Galeno che l'immagine di quella montagna possa raggiungere simultaneamente più spettatori.

Evidentemente il processo avviene per vie opposte: è l'osservatore ad avanzare il suo potere sensoriale verso la montagna. Galeno, più che del *pneuma* della corrente stoica, discute dell'aria intermedia che diventa per l'osservatore uno strumento per vedere. Lo *pneuma* è inviato dal cervello stesso attraverso il nervo ottico e fuoriesce dall'occhio incidendo sull'aria limitrofa, senza estendersi molto lontano. È l'aria stessa che si trova in questa zona eccitata a diventare percettiva.

Galeno, essendo un medico, non poteva escludere il cervello e il nervo ottico dalla trattazione che interpreta come una parte importantissima del processo. Il nervo ottico in particolar modo viene assimilato al ramo più estremo di un albero, è parte del cervello stesso, ne riceve l'impulso, il potere, diventando capace di giudicare e riconoscere le cose con cui viene a contatto. La stessa cosa avviene, più o meno in maniera analoga, anche con l'aria intorno all'occhio.

Galeno fu quindi il primo ad introdurre l'aspetto fisiologico ed anatomico all'interno delle teorie della visione: egli suppone che la vista sia dovuta principalmente al cristallino, affermazione fondata sugli studi da lui eseguiti, in particolar modo su alcune patologie della visione, come la cataratta<sup>13</sup> che, ponendosi tra il cristallino e la cornea, ostacola parzialmente la visione. Inoltre il medico approfondì gli studi su

tutte le parti dell'occhio, dalla retina alla cornea, dall'iride all'uvea, l'umore vitreo e quello acqueo ed infine anche le palpebre<sup>14</sup>.

La sua teoria avrebbe avuto probabilmente una accezione importantissima se Galeno non avesse ceduto alla volontà di renderla comprensibile ai più, abbandonando quindi l'idea di spiegarla unitamente ad un aspetto geometrico propriamente euclideo.

Fu Galeno stesso, nella prefazione, a chiarire di voler omettere l'aspetto geometrico, perché troppo complicato e noioso cosicché i due approcci, quello matematico ed il suo opposto, rimasero distinti tra loro, senza punti di contatto.

## 01.2. Euclide e Tolomeo

### 01.2.1 I raggi visivi e la visione per angoli

Euclide (III sec. a.C.) fu il primo a basare una teoria della visione totalmente di impostazione matematica, escludendo tutti i fenomeni di carattere mistico, ontologico e psicologico e accettando solo ciò che poteva essere spiegato geometricamente.

Egli rappresenta un approccio completamente opposto sia agli atomisti, che a Platone, Aristotile e Galeno.

Il suo libro sull'*Ottica* è composto di cinquantotto proposizioni, ma sostanzialmente sono solo sette quelle che fondano le basi della teoria visiva di Euclide: si tratta delle prime 7 proposizioni.

- 1) *Sia posto che i segmenti rettilinei a partire dall'occhio si portino a una distanza tra di loro di dimensioni sempre maggiori.*
- 2) *E che la figura formata dai raggi visuali sia un cono avente il vertice nell'occhio e la base sui contorni delle cose viste.*
- 3) *E che siano viste quelle cose sulle quali incidono i raggi visuali, mentre non siano viste quelle sulle quali i raggi visuali non incidono.*
- 4) *E che le cose viste sotto angoli più grandi appaiono più grandi, quelle viste sotto angoli più piccoli più piccole, uguali quelle viste sotto angoli uguali.*
- 5) *E che le cose viste sotto raggi più alti appaiono più in alto, quelle viste sotto raggi più bassi più in basso*
- 6) *E che le cose viste sotto raggi più a destra appaiono più a destra, quelle viste sotto raggi più a sinistra più a sinistra*
- 7) *E che le cose viste sotto un maggior numero di angoli appaiono con miglior risoluzione<sup>15</sup>*

La prima proposizione riguarda la distribuzione nello spazio dei raggi visivi: essi si distribuiscono radialmente ma egli non aggiunge nulla sul fatto che i raggi visivi possano essere discreti. Il fatto che si distanzino tra loro nello spazio definisce solo una distribuzione radiale, compatibile con

la continuità. La divergenza angolare dei raggi visivi fa dedurre che essi possano proseguire all'infinito (nel senso usato negli Elementi). Si può pensare che egli volesse postulare la possibilità del raggio visivo di arrivare a raggiungere oggetti lontanissimi, come le stelle. Questo problema era stato già discusso da Aristotele in polemica con Empedocle e Platone.

Il secondo postulato è naturalmente legato al primo, perché se i raggi visivi hanno direzione rettilinea e radiale nello spazio, ne consegue che la forma che essi generano è un cono con vertice nell'occhio.

Il significato della terza proposizione acquista significato se inserito nel contesto culturale più ampio di cui Euclide faceva parte. Abbiamo visto quali altre teorie erano state formulate, divise in emissioniste ed estromissive. La scelta teorica da parte di Euclide, che accoglie la teoria emissionista, esclude la possibilità che si possano vedere cose che il raggio visivo non intercetti.

La quarta premessa definisce che la visione avviene necessariamente per angoli e che la dimensione apparente degli oggetti sia strettamente legata a tale angolo. La visione pertanto avviene grazie a due raggi visivi che formano tra loro un angolo e racchiudono pertanto uno spazio, mentre un solo raggio non basta affinché l'uomo possa vedere<sup>16</sup>.

La quinta e la sesta proposizioni, piuttosto intuitive, stabiliscono i criteri che regolano la percezione della posizione di un oggetto rispetto ad altri.

Infine la settima chiarisce i criteri che regolano la risoluzione della visione: gli oggetti visti sotto più angoli, ovvero incontrati da più raggi visuali e perciò visti sotto un numero maggiore di angoli formati da raggi visuali adiacenti, appaiono di risoluzione maggiore.

Euclide scrive un'ottica strettamente geometrica, in cui ignora i fenomeni visivi dal punto di vista della sensazione o della fisiologia della visione, nonché gli aspetti psicologici che influenzano la percezione e la localizzazione rispetto agli oggetti visibili.

Nelle sue sperimentazioni deve constatare che esiste un limite al discernimento visivo ma contemporaneamente, oggetti posti molto lontano

sono ancora visibili a patto che siano abbastanza grandi. L'esperienza evidenzia l'esistenza di un limite alla visibilità di un oggetto, oltre il quale si perdono insieme risoluzione visiva e visibilità; pertanto Euclide è portato ad accettare l'esistenza di un angolo visivo limite, oltre il quale non sia più possibile la visione.

La conseguenza immediata delle conclusioni del teorema è che le cose che sono più piccole dell'angolo minimo non si vedono. Affinché un corpo possa essere visto è necessario che si possa costruire un angolo visuale che lo abbracci.

Oltre a questa implicazione bisogna considerare il fatto che venga preso in considerazione un angolo ben preciso: si suppone che la cosa sia vista abbracciata da un angolo minimo, cioè solo dai due raggi che formano i lati dell'angolo stesso. È evidente che nell'ottica di Euclide si vede per angoli, e non per raggi. Determinante per la visione euclidea è anche il numero di raggi visivi presenti all'interno dell'angolo, perché questo comporta una maggiore risoluzione come espresso nella settima proposizione, dove per maggior risoluzione si intende un maggior numero di particolari visibili dell'oggetto guardato.

Se un oggetto è visto sotto l'angolo minimo, è ovvio che nessuna delle sue particelle interne potrà essere vista singolarmente e in modo dettagliato perché sarebbe compresa tra due raggi che formano un angolo troppo piccolo e minore rispetto a quello minimo. Ma l'oggetto può essere visto comunque nella sua globalità. La visione per angoli minimi giustifica il fatto di parlare di angoli più o meno numerosi nella settima proposizione, quando si tratta di migliore o peggiore definizione visiva: un segmento vicino viene visto più nei suoi "particolari" che se fosse lontano. Supponiamo di avere due aste metriche suddivise in segmenti uguali, e siano di diversa dimensione. Le aste AB e CD sono viste sotto un numero di angoli minimi pari a quattro e lo stesso angolo visuale complessivo  $\alpha$  (Fig. 1). Dal nostro punto di vista, quindi, la loro grandezza apparente è identica, ma hanno una discriminazione (risoluzione) diversa: gli angoli minimi abbracciano singolarmente ogni particella (segmento) di AB, mentre abbracciano 2 segmenti di CD. Di AB abbiamo una visione più

dettagliata, mentre CD viene visto in maniera omogenea essendo i suoi particolari minori dell'angolo minimo.

Nonostante questa intuizione, la teoria euclidea implica alcuni problemi, il primo dei quali riguarda il fatto che non è specificato quale sia l'angolo minimo, soprattutto in vista del fatto che l'angolo in figura diminuisce sempre più man mano che i segmenti si allontanano dal centro. Forse sarebbe utile stabilire prima un campo visivo, poi determinare l'ultimo angolo laterale e considerare probabilmente esso come minimo angolo visivo. Certo è che, sia a causa dell'incertezza delle fonti (così lontane), sia a causa delle varie interpretazioni che si possono dare al testo, la soluzione non può essere generalizzata.

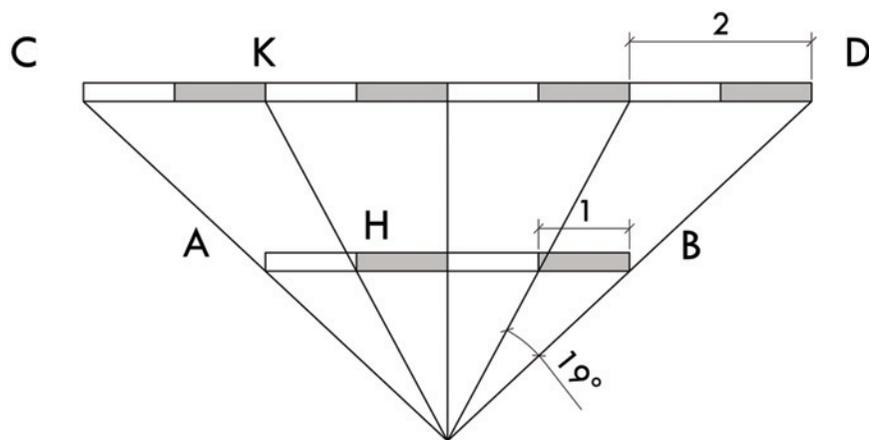


Fig. 1: La visione per angoli secondo Euclide (Rielaborazione dell'autore).

## 01.2.2 Tolomeo: il perfezionamento della teoria euclidea

Il maggiore tra i teorici di ottica dell'antichità è sicuramente Claudio Tolomeo (II sec. d.C.), il quale estende la teoria euclidea di carattere matematico fondendola con gli elementi fisici, fisiologici e psicologici che avevano una importanza fondamentale e imprescindibile in una teoria della visione concettualmente completa.

Dell'*Ottica* di Tolomeo manca però il primo libro, andato perduto, a parte qualche piccolo frammento che trattava gli aspetti fisici della visione; anche gli altri quattro libri in effetti non sono propriamente attendibili, perché non di prima mano: essi ci sono pervenuti grazie ad una traduzione latina spesso incoerente di una edizione araba, già a sua volta tradotta dal greco. Questo passaggio di mani, spesso provoca un rimaneggiamento del testo originale e spesso il traduttore tende ad inserire qualcosa di personale ed interpretativo che altera i concetti originali. Nonostante ciò, non si può negare la grande importanza di Tolomeo nel campo Ottico e il fatto che egli introduca, ampliando la teoria euclidea, innovazioni che rimarranno invariate per secoli.

Il grande sforzo di Albert Lejeune<sup>17</sup> (che per anni ha studiato l'ottica di Tolomeo) di ricostruire i lineamenti principali del primo libro di Tolomeo ci ha permesso di capire più approfonditamente le caratteristiche principali della teoria della visione dello scienziato.

Tolomeo credeva che la visione fosse dovuta all'azione di un flusso visuale emesso dall'occhio e di forma conica, geometricamente analogo a quello supposto da Euclide. Ma egli non rifiutò le teorie di Platone e degli stoici e se consideriamo giuste le ipotesi fatte da Lejeune sul primo libro dell'*Ottica*, aggiunge alla tesi euclidea una interpretazione fisica della radiazione visiva.

Questa interpretazione data da Lejeune è fondata mettendo insieme le osservazioni dei libri secondo e quinto dell'*Ottica* e un riassunto del primo libro andato perduto, che lo stesso Tolomeo inserisce come prefazione del secondo libro. Il flusso della visione viene considerato simile al flusso luminoso e per questo motivo Tolomeo attribuisce ad esso una concezione fisica.

Sempre secondo Lejeune, Tolomeo concepiva la radiazione visiva, quella luminosa e in generale ogni tipo di radiazione, come una sorta di spostamento o trasferimento di energia che il trasmettitore comunica e che diminuisce nel momento che viene a contatto con altri oggetti, a causa della riflessione o della resistenza che gli oggetti più o meno trasparenti mostrano alla penetrazione del flusso.

Ma esiste una differenza cruciale tra Tolomeo ed Euclide per quello che concerne la concezione dei raggi visivi. In Euclide tali raggi sono discreti, non esiste continuità tra essi, ma sono separati da spazi che diventano sempre più grandi a causa della loro distribuzione radiale. In Tolomeo invece i raggi visuali formano un fascio continuo e se così non fosse non riusciremmo a vedere gli oggetti nella loro interezza.

I raggi possono ben rappresentare la vista in maniera geometrica, ma hanno poco a che fare con la vista reale basata su leggi fisiche e sono concepiti come energia continua emessa dall'occhio e capace di percepire gli oggetti che incontra relativamente alla potenza della propria radiazione.

Questa è la principale critica mossa da Tolomeo ad Euclide, tuttavia per molti storici questa critica dipende da una errata lettura della terza proposizione di Euclide. Questa premessa è interpretata da Tolomeo nel modo ben conosciuto: la visione avviene per punti discreti. Tolomeo attribuisce ad Euclide una relazione, che egli in realtà non dà, tra dimensione apparente di una grandezza e la quantità di raggi che vi incidono. Confonde dunque arbitrariamente due concetti che Euclide, invece, tiene separati per tutta la sua opera: la grandezza apparente e la risoluzione visiva.

Nonostante Euclide dica chiaramente che la dimensione è data dall'angolo visuale e non dal numero di raggi che incidono l'oggetto l'idea che egli imposti la sua ottica su una visione per angoli sembra non sfiorare in nessun modo Tolomeo, il quale insiste sull'ipotesi, errata, di una visione per raggi singoli e discreti, indipendenti l'uno dall'altro. In realtà sarebbe stato difficile per Euclide costruire un castello matematico su tali basi<sup>18</sup>.

Dalla teoria della visione di Tolomeo non poteva essere esclusa la

radiazione luminosa proveniente dalla sorgente (come il sole): solo grazie ad essa riusciamo a percepire i colori.

Il colore, secondo Tolomeo, è una proprietà intrinseca degli oggetti, che riesce a produrre una modificazione (*passio*) della radiazione energetica, grazie alla quale riusciamo a percepire gli oggetti nelle loro effettive caratteristiche.

Non sappiamo però come avvenga questo processo di *passio*, forse perché espone il meccanismo nel primo libro andato perso, né siamo a conoscenza del suo reale concetto del cono visivo, se esso è un qualcosa di sensibile o se lo concepisce come lo *pneuma* della teoria stoica, cioè un medium che trasmette le impressioni verso l'osservatore.

Ma rispetto alla teoria tutta matematica di Euclide egli aggiunge due aspetti geometrici di notevole importanza per lo sviluppo della teoria: innanzitutto arguisce che esiste un asse visivo principale e che rispetto a questo asse esistano delle variazioni di sensibilità della vista, affermando che viene visto in maniera più chiara ciò che è sopra l'asse piuttosto di ciò che si trova ai lati dello stesso. Dobbiamo a Tolomeo l'osservazione che, in sostanza, la percezione visuale diminuisce man mano che il flusso visuale si allontana dall'asse del cono ottico. In secondo luogo dobbiamo a Tolomeo anche l'aver fissato la posizione del vertice del cono ottico, asserendo che esso si trova proprio nel centro della curvatura della cornea e anche nel centro della rotazione del bulbo oculare.

## 01.3. Sviluppo orientale delle teorie della visione

### 01.3.1 Al-Kindi e lo sviluppo delle teorie nel mondo islamico

L'Accademia Platonica rimane per secoli un santuario nella quale le idee continuano a circolare e ad essere divulgate.

L'impero romano eredita la grande cultura ellenistica, la diffonde, la sviluppa, ma è anche la causa del suo lento declino. Bisogna considerare come eventi relazionati tra loro la decadenza graduale dell'impero romano, la nascita della cristianità e della sua cultura e l'affievolirsi dell'interesse nella ricerca scientifica.

Nel 389 d.C. gli insurrezionisti Cristiani distrussero la Biblioteca di Alessandria che conteneva più di mezzo milione di testi.

La cultura platonica, che ancora accettava gli dei pagani, viene profondamente perseguitata dalla cristianità, fino alla chiusura della Accademia avvenuta nel 529 d.C. da parte di Giustiniano.

A tale "imbarbarimento" della cultura occidentale, fa fronte, per fortuna, un nuovo interesse per tutte le scienze da parte del mondo musulmano.

Quando i soldati di Giustiniano assalirono l'Accademia Platonica, i discepoli dovettero abbandonare Atene e i sette maggiori saggi partirono per la Persia, portando con loro una serie di preziosi libri. Senza di essi lo sviluppo culturale probabilmente si sarebbe arrestato e avrebbe avuto altri corsi. Invece in Persia i sette magnati furono accolti dall'imperatore Khurso I, nel suo palazzo di Jundishapur in Iran. Nella sua corte riprese il fermento per le scienze, le arti e la filosofia e divenne presto il principale centro di ricerca scientifica con un osservatorio astronomico, una scuola medica e persino il primo ospedale.

Questo fenomeno fu una vera fortuna per la sopravvivenza e la riscoperta delle conoscenze antecedenti: gli studenti islamici divennero estremamente fanatici nel collezionare e tradurre testi e manoscritti greci. E questo permise di tramandare questi testi ai posteri, fino ad arrivare anche ai giorni nostri.

Anche Baghdad divenne presto un grande centro di ricerca, sotto la guida, nel nono secolo di Hunayn ibn Ishaq.

Il primo grande filosofo del mondo islamico ad occuparsi di ottica in maniera sistematica e approfondita, fu Abu Yusuf Ya'qub ibn Ishaq al-Kindi (801 ca-873), noto semplicemente col nome di Al-Kindi. Nato verso la fine del secolo VIII ad al-Kufa, si trasferisce per gli studi proprio a Baghdad. È probabilmente il migliore nel cercare di promulgare gli insegnamenti della Grecia classica, incoraggiando la traduzione dei testi e tentando in prima persona di integrare le lacune della Filosofia antica, sempre naturalmente con il massimo rispetto per tale Filosofia e le scienze in generale che avevano apportato enormi passi evolutivi alla cultura umana.

Egli scrisse moltissimi libri (circa 260) in moltissimi rami scientifici. Tra tutti però il più importante è sicuramente il *De Aspectibus*<sup>19</sup>, trattato di ottica nella cui prefazione l'autore rivela che il motivo per cui decise di scrivere una tale opera dipendeva dal desiderio di correggere e comunicare l'eredità culturale del mondo antico alla società islamica. L'ottica in Al-Kindi non è solo un ramo delle molteplici scienze ereditate dalla Grecia, ma assume una importanza particolare anche in altri branche. Nel libro *De radiis stellarum*<sup>20</sup>, il tema principale trattato è l'attività della natura a livello universale esercitata per mezzo di una radiazione o forza. Questo concetto è evidente perché ogni cosa al mondo, che sia una sostanza o un incidente, produce raggi e azioni in una propria maniera ma comunque radialmente; questi raggi riempiono e colmano il mondo intero, trasformando il mondo stesso in una sorta di immensa rete nella quale ogni cosa agisce su un'altra per produrre gli effetti naturali.

Le stelle agiscono sulla terra; il fuoco, la luce, i suoni e i colori stessi agiscono sugli oggetti a loro prossimi; questa filosofia naturale influenzerà successivamente anche Grosseteste e Bacon.

Le leggi radiative sono le leggi della natura e per questo l'ottica rientra in una filosofia più ampia che si basa su questo concetto.

Nel *De Aspectibus*, Al-Kindi riprende l'*Optica* di Euclide, ma non copian-dola, né recensendola, piuttosto criticando in maniera puntigliosa la

teoria della visione euclidea, tentando in definitiva di sopperire ad alcune lacune e correggere l'opera del Filosofo greco.

La critica mossa da Al-Kindi ad Euclide è che egli aveva introdotto una serie di assunzioni senza però giustificarle. Per esempio la prima proposizione di Euclide asserisce che i raggi visivi sono rettilinei ed escano dall'occhio ed Al-Kindi cerca di dimostrare in pratica questo assunto dedicando alla dimostrazione i primi sei postulati del *De Aspectibus*. Ma la dimostrazione del mussulmano è alquanto stravagante, perché egli tenta di dimostrare la rettilinearità dei raggi visivi attraverso i raggi luminosi<sup>21</sup>: essi sono in pratica alla base della dimostrazione ma poco vengono presi in considerazione invece nella teoria visiva; i raggi visivi rimangono di priorità assoluta nel processo visivo.

La rettilinearità dei raggi luminosi è dimostrata nelle prime tre proposizioni grazie all'osservazione delle ombre formate dagli oggetti opachi colpiti da tali raggi.

Innanzitutto egli osserva quali e quanti tipi di ombre esistono, schematizzando nello stesso modo che utilizzerà Leonardo da Vinci tra il XV e XVI sec.: se il corpo luminoso e l'oggetto hanno la stessa dimensione la proiezione ombroso sarà cilindrica; se il corpo luminoso è maggiore dell'oggetto l'ombra sarà conica con vertice verso il corpo opaco; viceversa se è l'oggetto ad avere dimensione maggiore del corpo luminoso, il cono ombroso avrà il vertice dalla parte della luce.

Già per Al-Kindi, nel IX sec., le ombre si conformano in linee rette tangenti al corpo luminoso e a quello opaco: ne consegue la propagazione rettilinea della luce<sup>22</sup>.

Nei postulati 5 e 6 continua la dimostrazione di questo concetto: prende in esame l'ombra di un corpo opaco generata da una candela più alta del corpo stesso.

Sia AB il corpo opaco e DE la candela, tale che DE proietti l'ombra GB di AB sul piano orizzontale. Conoscendo le basi matematiche sui triangoli simili, Al-Kindi conclude dicendo che GB è nella stessa proporzione con AB come GE, distanza dalla candela allo spigolo più esterno dell'ombra, sta a DE: questa proporzione è possibile solo se i punti D, A e G sono allineati a formare una retta. La retta DAG è il raggio luminoso.

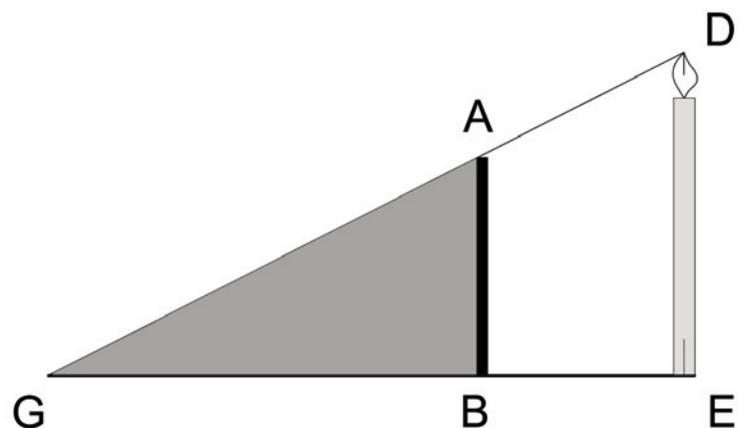


Fig. 2: Già per Al-Kindi, nel IX sec., le ombre si conformano in linee rette tangenti al corpo luminoso e a quello opaco: ne consegue la propagazione rettilinea della luce. La dimostrazione di questo concetto è nei postulati 5 e 6. (Rielaborazione dell'autore).

Nella proposizione successiva egli espone un secondo esperimento. Sottopone ad una sorgente luminosa grande quanto ABG (che suppone essere una candela) una specie di scatola con un foro, forse proprio una camera oscura, o forse semplicemente due muri contrapposti. Unendo il punto illuminato più estremo su HT, per esempio K, con il suo corrispondente del foro, cioè U, e prolungando l'asta essa lambisce in maniera tangenziale la sorgente di luce. La stessa cosa naturalmente avviene per LZG, il che dimostra di nuovo la rettilinearità dei raggi luminosi.

Dopo aver dimostrato che i raggi luminosi sono rettilinei, si concentra sui raggi visivi, senza però spiegare quale filo logico unisce gli uni agli altri e perché se i primi sono rettilinei lo debbano essere anche i secondi.

Al-Kindi analizza, nelle successive proposizioni (dalla 7 alla 10), la teoria visiva di Euclide, che egli accetta pienamente e che cerca anzi di sviluppare ed elaborare: i raggi visivi non provengono dall'oggetto, ma è dall'occhio dell'osservatore che essi escono in modo radiale. Egli rifiuta ogni tipo di teoria intromissiva adducendo una serie di argomentazioni, che però sono a volte contraddittorie.

Prima tra tutte le motivazioni, egli pone la stessa anatomia e fisionomia dell'occhio: l'orecchio ha una forma concava perché deve ricevere i suoni provenienti dall'esterno; per contrario l'occhio, che ha forma convessa e sferica, deve necessariamente avere funzione di emettere raggi visivi. Inoltre l'occhio è dotato di mobilità affinché egli possa ruotare su stesso e poter individuare gli oggetti su cui inviare i raggi visivi.

Inoltre solo grazie alla teoria estromissiva, secondo Al-Kindi, si può spiegare la capacità selettiva dell'occhio e il motivo per cui l'acuità visiva dipenda dalla posizione dell'oggetto all'interno del campo visivo. In effetti l'uomo riesce a vedere in modo definito solo poche cose alla volta, come quando leggiamo un libro, mettendo a fuoco alcune lettere e muovendo l'occhio per leggerne delle altre: quindi riusciamo a vedere gli oggetti, all'interno del campo visivo, solo in sequenza temporale e non tutti insieme. Inoltre l'occhio non è capace di avere una visione definita di tutti quegli oggetti che si trovano o nella parte più

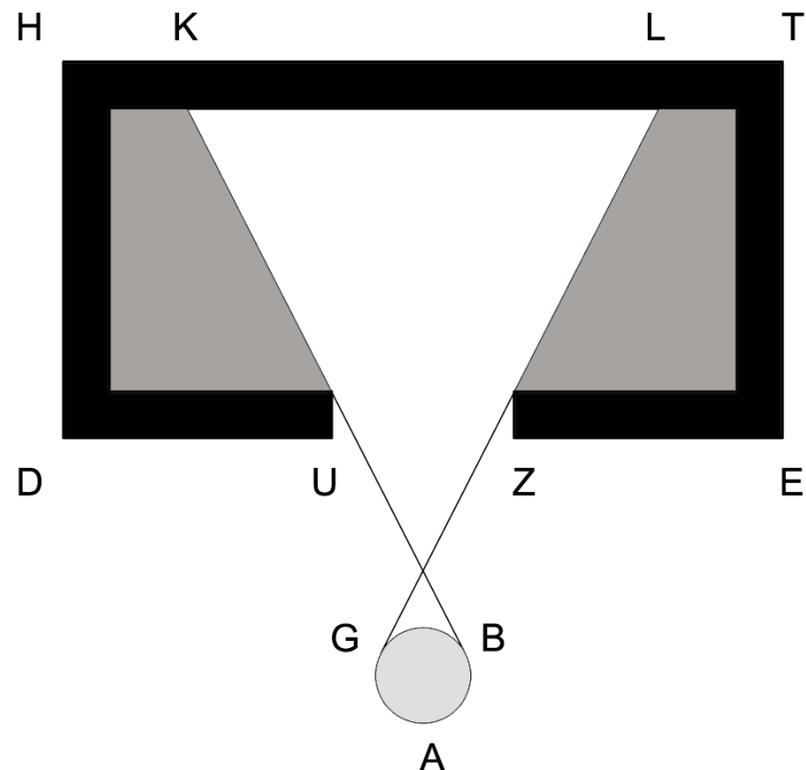


Fig. 3: In un secondo esperimento, Al-Kindi sottopone ad una sorgente luminosa grande quanto ABG (che egli suppone essere una candela) una specie di scatola con un foro, forse proprio una camera oscura. (Rielaborazione dell'autore).

esterna del campo visivo o comunque molto lontani dall'osservatore. Secondo Al-Kindi queste testimonianze sono la prova concreta che la vera teoria visiva è quella estromissiva. Egli sostiene che se realmente fossero gli oggetti ad emettere raggi che penetrano nell'occhio, e se la visione avvenisse grazie a queste immagini impressionabili nel bulbo oculare, allora l'uomo avrebbe una visione chiara, nitida e di buona risoluzione di tutto il campo visivo e di ogni oggetto all'interno di esso comunque esso sia disposto (senza problematiche di elevata distanza o di posizione estrema).

Tra l'altro lo scienziato fornisce la prova inconfutabile della sua teoria proprio sul fronte matematico e geometrico, analizzando la visione di una circonferenza posta di taglio rispetto all'osservatore. Se sono gli oggetti ad emettere informazioni sulla propria forma, dimensione e colore l'occhio umano riuscirebbe a percepire la forma pienamente circolare sebbene la circonferenza sia posta di taglio. In realtà quello che l'uomo vede è un segmento e non riesce a riconoscere la vera forma dell'oggetto. Ne consegue che è l'occhio ad emettere raggi visivi in maniera rettilinea e radiale, cosicché essi colpiscono l'oggetto solo nella parte rivolta verso l'osservatore, il quale in maniera inconfutabile percepisce la circonferenza come un segmento<sup>23</sup>.

È chiaro che Al-Kindi consideri l'emissione di raggi da parte degli oggetti esterni come un'unità informativa e l'orientamento spaziale di essi è del tutto indifferente da tali informazioni, cosicché egli pensa la teoria intromissiva del tutto disgiunta dalle leggi prospettiche.

Nel *De Aspectibus*, Al-Kindi espone, come abbiamo già visto, in maniera pedissequa la teoria estromissiva di Euclide, inserendo però una serie di approfondimenti e proprie teorie che si discostano in parte dai concetti euclidei.

Per esempio anche per il musulmano i raggi sono spediti dall'occhio all'ambiente in modo rettilineo e radiale a formare un cono ottico, ma esso è concepito come un corpo radiante continuo<sup>24</sup>, cioè non è formato da raggi discreti come erano quelli euclidei.

I raggi per il filosofo greco in effetti erano rette geometriche senza spessore e non avendo una dimensione non potevano formare un cono

omogeneo e tra essi si creavano naturalmente degli spazi vuoti. Al-Kindi ritiene assurda questa ipotesi, perché se così fosse, la nostra visione sarebbe incompleta con una serie di zone d'ombra relazionate agli spazi vacanti tra raggi contigui ma divergenti. Inoltre essendo tali raggi senza dimensione, essi terminerebbero in punti anch'essi adimensionali e se non hanno né ampiezza, né profondità, allora non possono essere visti. La teoria di Euclide perde validità.

Per Al-Kindi, poiché i corpi reali hanno tre dimensioni, anche i raggi dovranno caratterizzarsi per lunghezza, ampiezza e profondità, e anzi essi sono in realtà parte di un unico, omogeneo e radiante cono ottico, e rappresentabili da rette geometriche per semplicità espositiva<sup>25</sup>.

All'interno del cono gli oggetti sono visti in maniera più o meno chiara secondo la loro posizione spaziale centrale o periferica, e della lontananza: Euclide, come molti altri filosofi, imputava la causa alla diversa lunghezza dei raggi visivi dal centro (il più corto) alle generatrici del cono.

Al-Kindi contesta quest'ipotesi con una semplice constatazione<sup>26</sup>: il raggio AD è il minore di tutti mentre invece AB è il maggiore ed è accettabile, in questo caso, che il punto D sia più nitido di B, secondo la teoria euclidea.

Ma basta prendere in esame il punto E per capire che tale processo non può avere fondamento: Il punto E è nella mezzeria di AB tale che  $AE = AB/2$ , mentre AD è il cateto maggiore del triangolo ABD, ossia  $AB = \sqrt{AD^2 + BD^2}$ . AE è sicuramente più piccolo di AD, ma sebbene il raggio sia minore la visione di E è meno chiara rispetto a D (Fig. 4).

Questo dimostra che la perdita di risoluzione non dipende dalla distanza, ma dipende piuttosto dalla maggiore o minore forza o potenza del raggio. Al-Kindi paragona di nuovo i raggi luminosi e i raggi visivi; così come un punto maggiormente illuminato da un raggio luminoso più forte viene percepito in maniera più chiara dall'osservatore, allo stesso modo un raggio visivo più forte produrrà punti di maggior risoluzione.

Per Al-Kindi un raggio visivo più forte è capace di produrre in maniera più incisiva una trasformazione del *medium* che lo circonda; se

invece la trasformazione è incompleta o imperfetta, allora il raggio è più debole.

Dalla proposizione 14<sup>27</sup>, però, si deduce che la risoluzione delle cose viste dipende anche dalla quantità di radiazioni che colpiscono un oggetto, che può variare proprio a causa della forma dell'occhio. In questo postulato Al-Kindi tratta di nuovo in modo analogo i raggi luminosi e quelli visivi. Analizziamo la dimostrazione.

Sia ABG il bulbo oculare con centro in D, e si consideri l'intorno come la circonferenza HEILTZK. Del bulbo oculare si prendano in esame solamente i punti A, B, e G che riproducono la cornea, e che egli chiama la gobba esterna dell'occhio.

Dai tre punti si mandino le tangenti alla circonferenza dell'occhio, rispettivamente TH, EZ e IK, e si tracci anche la retta ortogonale ad EZ passante per B detta BL.

Ogni parte di HT è *illuminata* da A, ogni parte di IK è *illuminata* da G, ed infine ogni parte di EZ è *illuminata* da B; ne consegue che L è *illuminato* da ognuno dei tre punti.

Però l'arco EI appartiene sia ad HT che EZ ed è quindi *illuminato* nello stesso istante sia da A che da B; allo stesso modo l'arco TZ, simmetrico al precedente, è invece *illuminato* sia da B che da G; gli archi EH e ZK sono invece illuminati solo da singoli punti, rispettivamente A e G.

Conseguentemente L è più *illuminato* di un punto dell'arco IE o TZ, e l'*illuminazione* di questi archi è superiore di quella degli archi EH e ZK. Per illuminazione naturalmente Al-Kindi intende la radiazione.

Egli arriva alla conclusione che la parte centrale, cui appartiene anche l'asse del cono ottico, è quella più nitida perché riceve una maggior quantità di radiazione visiva, e anche che tale quantità diminuisce man mano che ci si allontana dall'asse.

Questa spiegazione però crea anche una serie di contraddizioni. Innanzitutto è chiaro dal testo che per Al-Kindi la visione avviene grazie alla gobba esterna dell'occhio ovvero la cornea: egli pertanto non accetta le teorie di Euclide e Tolomeo che invece localizzavano il centro del cono ottico all'interno dell'occhio.

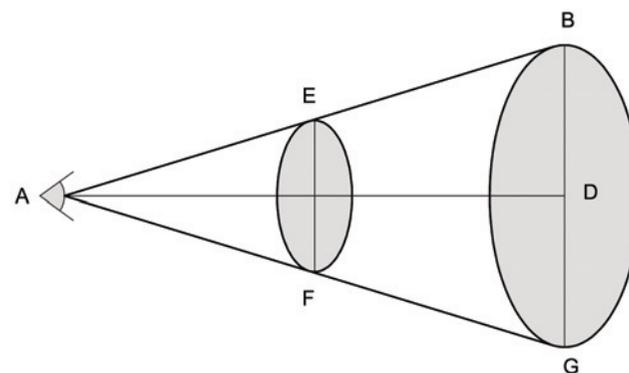


Fig. 4: All'interno del cono gli oggetti sono visti in maniera più o meno chiara secondo la loro posizione spaziale centrale o periferica, e della lontananza. La diversa lunghezza dei raggi visivi dal centro (il più corto) alle generatrici del cono non è determinante della nitidezza. (Rielaborazione dell'autore).

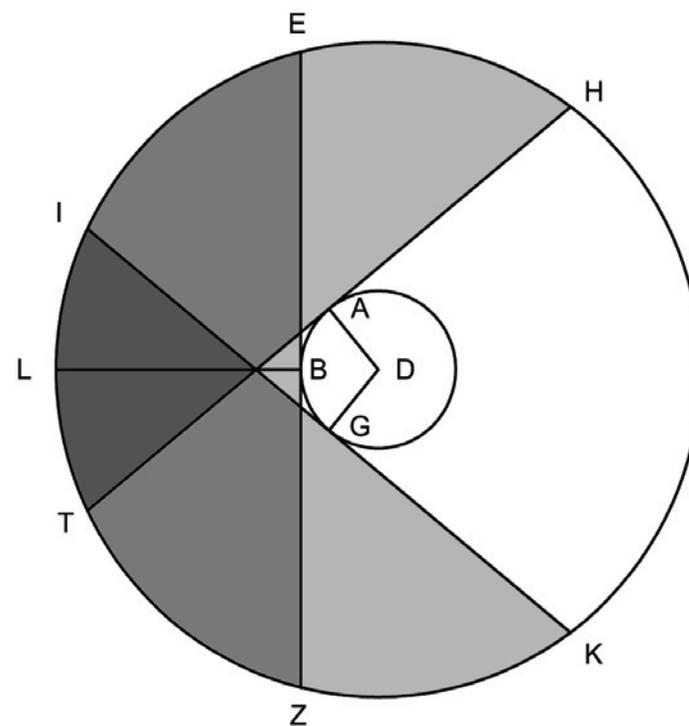


Fig. 5: Dalla proposizione 14, inoltre, si deduce che la risoluzione delle cose viste dipende anche dalla quantità di radiazioni che colpiscono un oggetto, che può variare proprio a causa della forma dell'occhio. (Rielaborazione dell'autore).

In secondo luogo questa dimostrazione sembra contraddire a pieno la teoria dello scienziato nel supporre un cono ottico unico, e nel considerare ogni parte del campo visivo illuminata dalle radiazioni provenienti in linea retta da ogni parte dell'occhio.

Seguendo la dimostrazione invece è chiaro che gli archi EH e ZK sono colpiti dalle radiazioni solo di A o solo di G, escludendo le radiazioni provenienti da B.

In sostanza gli oggetti periferici vengono percepiti dalle parti periferiche dell'occhio, mentre quelli centrali sono percepiti da tutti.

Questo concetto entra in conflitto con la visione per cono ottico singolo, e può essere coerente con la teoria di Al-Kindi solo se si ammettono molteplici coni ottici emanati da ogni punto dell'occhio<sup>28</sup>, ma egli non fa cenno a questa ipotesi e probabilmente nemmeno pensò a questa conseguenza, essendo lo scopo della dimostrazione solamente determinare il perché della variazione di nitidezza nel campo visivo.

Ultima riflessione da fare sulla teoria di Al-Kindi è che egli aveva tutte le nozioni per poter arrivare ad una soluzione più coerente, ma alla fine rimase legato alla storia e alle teorie greche, lasciando così ad Alhazen la possibilità di rivoluzionare le teorie della visione.

Nella proposizione 13<sup>29</sup> egli tratta i raggi luminosi, affermando chiaramente che essi si diffondono radialmente in tutte le direzioni da ogni punto di una superficie illuminata: questo è un concetto implicitamente riscontrabile fin dalle teorie classiche, ma Al-Kindi fu il primo a renderlo chiaramente ed in maniera esplicita per iscritto.

Questo concetto è di enorme importanza, perché fu proprio grazie ad esso che Alhazen riuscì a fondare una nuova teoria della visione differente dalle teorie fino a quel momento avviate. Fu Al-Kindi a fornire le basi ad Alhazen per la sua teoria intromissiva che soppiantò quella di Al-Kindi.

Egli sfruttò tali basi concettuali diventando certamente più importante del suo predecessore, ma d'altra parte l'evoluzione culturale e ideologica non può che avere il suo corso naturale.

### 01.3.2 Lo sviluppo delle teorie visive nell'Islam

Nel mondo islamico le teorie classiche furono riprese e discusse ampiamente ma seguendo filoni di pensiero differenti.

Da una parte l'evoluzione della teoria estromissiva, sia quella euclidea estesa a Tolomeo e ad Al-Kindi, ma soprattutto quella di Galeno. La grande influenza che questa ultima teoria ebbe nel mondo arabo si deve a Hunain ibn Ishaq, uno dei maggiori fisici del periodo, che seppe anche unire le conoscenze di Galeno con nuove nozioni di anatomia e fisiologia. Per questo motivo Hunain, che in occidente è conosciuto come Johannitius, fu particolarmente apprezzato nell'ambito dei circoli medici.

Ma oltre alle teorie estromissive citate, si sviluppò anche un altro grande filone teorico a partire soprattutto dal X sec., che affondava le radici nella teoria intromissiva aristotelica e che ebbe come massimi rappresentanti Avicenna e Averroes.

### 01.3.3 Hunain ibn Ishaq

Gli studi di Hunain ibn Ishaq (877 d.c. - nc) orbitano principalmente intorno alla sfera dell'oftalmologia<sup>30</sup>, ramo della medicina che si occupa dei difetti e malattie dell'occhio. Johannitius, questo è il nome con cui è conosciuto in occidente, fu contemporaneo di Al-Kindi, ma a differenza di lui egli accettò una teoria estromissiva basata sulle tesi di Galeno.

Gli stessi scritti di Hunain rivelano l'interesse per l'oftalmologia dello scienziato: il primo è *I dieci trattati sull'occhio*<sup>31</sup>, il secondo è il *Libro delle questioni sull'occhio*.

Ne' *I dieci trattati sull'occhio* egli presenta uno schema esplicativo della struttura dell'occhio dal punto di vista anatomico e fisiologico.

Al centro dell'occhio si trova il cristallino che è incolore, trasparente e luminoso, ma non è sferico piuttosto leggermente appiattito<sup>32</sup>.

Dietro di esso si trova l'umore vitreo che ha la funzione di alimentare



brillante. Ed infatti, egli spiega, non appena un occhio viene per esempio chiuso o coperto, la pupilla del secondo si allarga immediatamente perché l'uvea deve permettere il passaggio di una quantità maggiore di spirito visivo, naturalmente verso l'esterno.

Questa dottrina muove i passi dalla teoria di Galeno, di cui Hunain fu un profondo sostenitore e di cui egli parla soprattutto nella seconda parte del terzo trattato<sup>37</sup>.

Egli riassume inizialmente le teorie visive del passato per poi andarle a sfatare una per volta fino alla constatazione che solo quella di Galeno poteva avere fondamenti oggettivamente validi.

I metodi riassunti da Hunain sono tre: a) l'oggetto può inviare qualcosa verso di noi che ci indica la sua presenza; b) l'oggetto non invia nessuna informazione ma è immobile e statico nel suo posto, e la visione avviene grazie a qualcosa che proviene dai nostri occhi che ci permette di percepirlo e vederlo; c) la visione avviene grazie ad un medium tra l'osservatore e l'oggetto<sup>38</sup>.

La prima teoria include sia la teoria atomista degli *eidola* o *simulacra*, sia la teoria aristotelica. Hunain, come avevano arguito altri sui predecessori, considera impossibile quest'ipotesi perché non è possibile che le immagini di oggetti maestosi come per esempio le montagne, possano contrarsi tanto da poter penetrare nell'occhio, e soprattutto la stessa immagine non è possibile che possa penetrare negli occhi di più osservatori contemporaneamente.

La seconda teoria, estromissiva, di Euclide, Tolomeo e Al-Kindi, non ha comunque ragione d'essere perché è impossibile che lo spirito visivo che esce dall'occhio possa espandersi in tutto lo spazio che divide l'osservatore dall'oggetto (anche una stella) e che possa anche diffondersi tutto intorno ad esso fino a inglobarlo completamente.

Infine la terza teoria è quella veritiera, fondata da Galeno e gli Stoici. L'aria che naturalmente si frappone tra l'osservatore e l'oggetto diventa uno strumento dell'occhio per poter vedere e mette in contatto i soggetti senza necessità di un qualsivoglia flusso tra loro. Devono però, affinché il processo si avvii, coesistere due condizioni: l'aria deve essere trasformata dalla presenza della luce e deve essere trasformata

anche dallo spirito visivo che proviene dalla pupilla dell'occhio. Lo spirito visivo penetra l'aria anche per lunghe distanze, anche se in ciò Hunain si contraddice andando a riprendere un concetto analizzato e scartato nella seconda teoria. Quando lo spirito esce dalla pupilla colpisce l'aria come se avvenisse una collisione, la trasforma rendendola simile a se stesso. L'aria diventa pertanto un vero e proprio organo visivo, un prolungamento dell'occhio<sup>39</sup>.

Hunain spiega che tale fenomeno è del tutto simile a quello che avviene nel passaggio dello spirito visivo dal cervello all'occhio.

In maniera particolare è trattata anche la problematica della visione dei colori: secondo lo scienziato, i colori producono nell'aria un'ulteriore trasformazione, successiva comunque a quella che produce lo spirito visivo. Anzi le trasformazioni dell'aria in tal senso sono ben tre: l'aria viene completamente trasformata dalla luce fino a diventare luminosa, viene trasformata dai colori e, nello stesso istante, anche dallo spirito visivo. In pratica quello che vuole dimostrare Hunain è che le trasformazioni avvengono in maniera simultanea, motivo per il quale esiste una specie di relazione tra gli oggetti che fa sì che il colore di uno influenzi anche gli altri intorno<sup>40</sup> (quello che oggi sarebbe perfettamente spiegato in sostanza con la radiosity e l'emissione radiativa degli oggetti).

### 01.3.4 Avicenna e le critiche alle teorie visive

Abu 'Ali al-Husain ibn 'Abdullah ibn Sina (980 – 1037), conosciuto in occidente come Avicenna, fu uno dei maggiori critici della teoria estromissiva<sup>41</sup>. Egli accettava la teoria aristotelica, ma non si confrontò con essa sviluppandola e ampliandola, piuttosto si cimentò in una serie di accese critiche contro tutte le altre teorie anteriori. La sua produzione scritta è vastissima<sup>42</sup>, ma i principali testi che trattano l'ottica sono lo *Shifa* e il *Danishnama (Livre de science)*.

La teoria estromissiva di Euclide viene analizzata da Avicenna il quale ipotizza che i raggi visivi non possono essere una entità astratta, ma

devono essere una specie di sostanza che permette di trasportare le sensazioni. Egli per minare la teoria euclidea la suddivide in quattro categorie, ognuna sfatata. Egli considera i raggi euclidei come una sostanza omogenea che si estende dall'occhio in forma conica e che mette in contatto l'occhio con gli oggetti; la sostanza che proviene dagli occhi è sempre omogenea e continua, ma quando esce dall'occhio per raggiungere gli oggetti, perde il contatto col bulbo oculare; la sostanza non è omogenea né continua ed è anzi formata da raggi separati tra loro, i quali però riescono a venire a contatto solo con alcune parti dell'oggetto; la sostanza che esce dall'occhio non crea un contatto con l'oggetto<sup>43</sup>.

La prima possibilità è assurda perché dovrebbe innanzitutto ammettere l'esistenza di un cono ottico immenso, esteso infinitamente, proveniente da un organo così piccolo. Inoltre ogni volta che si aprono gli occhi si avvierebbe il processo della visione e un immenso cono ottico dovrebbe, in un tempo infinitamente piccolo, diffondersi nell'universo. Inoltre per Avicenna era implicito nelle teorie estromissive che la visione avvenisse grazie al contatto della sostanza con l'oggetto. Se così fosse veramente, egli rileva, allora noi riusciremmo immediatamente a percepire la vera grandezza degli oggetti grazie al contatto tra la base del cono ottico e l'oggetto stesso e nulla seguirebbe le leggi della prospettiva (perché allora due oggetti di eguale misura, posti a distanze diverse dall'osservatore, sembrano essere anche di dimensioni differenti?)<sup>44</sup>.

Le ipotesi due e quattro non possono essere valide perché in esse manca il fondamento primo della visione: a cosa servirebbe l'emissione di questa sostanza se poi il contatto viene perso, quando per la teoria estromissiva è il contatto tra occhio e oggetto a permettere la visione?

Potrebbe essere che sia l'aria a fare da intermediaria e trasmettere le impressioni e le forme, ma se essa avesse questa proprietà, a cosa servirebbe la sostanza emessa dall'occhio a distanze così lontane? Sarebbe uno sforzo inutile per l'occhio, quando già esisterebbe l'aria a portare le informazioni all'occhio<sup>45</sup>.

Infine rimane la terza possibilità. La visione avviene effettivamente per raggi discreti che escono dall'occhio colpendo gli oggetti che incontrano. Ma esiterebbero in ogni modo dei problemi, primo fra tutti il fatto che la visione avverrebbe per punti corrispondenti a quelli intercettati dai raggi sugli oggetti.

Quello che avremmo percepito era di conseguenza una specie di *nuvola di punti* (proprio come gli attuali laser scanner) e anche supponendo la percezione di un numero elevato di punti, non avremmo avuto ugualmente la possibilità di percepire tutto quello che era compreso negli spazi bui<sup>46</sup>.

Potrebbe essere però che i raggi sfruttino il medium che è tra gli stessi, che lo trasformino dotandolo della capacità di percepire anche ciò che esiste tra punto e punto, trasferendo l'informazione all'occhio. Ma perché, se questa trasformazione avviene immediatamente al contatto del raggio con l'aria, i raggi devono estendersi fino a toccare l'oggetto? Sarebbe più logico supporre che è qualcosa dell'occhio a trasformare subito il medium circostante e permettendo grazie ad esso la visione.

Avicenna così ha dimostrato l'assurdità di ogni possibilità di lettura della teoria euclidea.

Egli passa al vaglio, nello scritto *Shifa*, la teoria estromissiva di Galeno, basata proprio sulla trasformazione del medium interposto tra l'occhio e l'oggetto<sup>47</sup>.

Avicenna è consapevole che l'aria per poter essere strumento nella visione, deve o diventare un medium ottico capace di trasmettere informazioni all'occhio stesso, o diventare esso stesso un organo visivo capace di percepire in maniera individuale le sensazioni. Entrambe queste ipotesi però non possono avere senso, perché non è possibile che l'aria possa ottenere, per effetto di una trasformazione per mezzo dell'occhio, una propria qualità o proprietà di trasferire informazioni. È impossibile per il semplice fatto che potrebbero avvenire nello stesso momento molteplici trasformazioni in relazione al numero di osservatori, e ogni individuo sarebbe influenzato dalle trasformazioni degli altri spettatori, ma essendo la visione un fenomeno soggettivo è chiaro che

questa ipotesi è da scartare. L'aria pertanto non può trasformare il proprio stato in modi diversi ma nello stesso istante. Potrebbe allora accadere che la trasformazione sia dello stesso tipo per ogni osservatore e che tale trasformazione sia semplicemente più o meno intensa secondo il numero. Avicenna inserisce nel testo un passo ironico sulla questione: le persone che hanno problemi di vista, non vedono meglio se si aggregano tra loro, né vedrebbero meglio se si avvicinassero ad una persona che invece ha una vista perfetta e migliore della loro<sup>48</sup>.

Ma se l'aria avesse questa capacità, non servirebbe comunque che l'occhio inviasse dei raggi nell'ambiente, perché essa è già in contatto con l'occhio e gli trasmetterebbe automaticamente le immagini. È chiaro che anche quest'ipotesi non abbia supposto scientifico.

La seconda ipotesi è che il medium, per effetto della trasformazione, diventi un vero e proprio organo visivo: Avicenna ironicamente afferma che se così fosse, avremmo grossi problemi di vista per ogni disturbo dell'aria provocato dal vento.

L'unica teoria possibile è quella di Aristotele, secondo cui le immagini degli oggetti arrivano all'occhio trasmesse dal medium trasparente<sup>49</sup>.

Ma Avicenna considera la visione con un'analogia differente rispetto al filosofo greco; egli paragona la vista all'immagine che si forma su uno specchio. Infatti nel *Danishnama (Livre de science)* afferma che l'occhio è come uno specchio e che l'oggetto visibile è come l'immagine riflessa nello specchio grazie alla mediazione dell'aria o altro medium trasparente<sup>50</sup>. Quando la luce colpisce gli oggetti, il medium permette che l'immagine di essi si proietti nell'occhio. Se lo specchio avesse un'anima, anch'esso sarebbe in grado di vedere.

L'immagine specchiata giunge all'occhio e viene recepita dal cristallino che a sua volta la trasmette al nervo ottico.

Secondo Avicenna la teoria intromissiva era la sola che permetteva di spiegare il motivo per cui gli oggetti appaiono più piccoli man mano che li allontaniamo dall'osservatore.

Sempre nel *Danishnama* dimostra geometricamente la motivazione della veridicità di questa teoria.

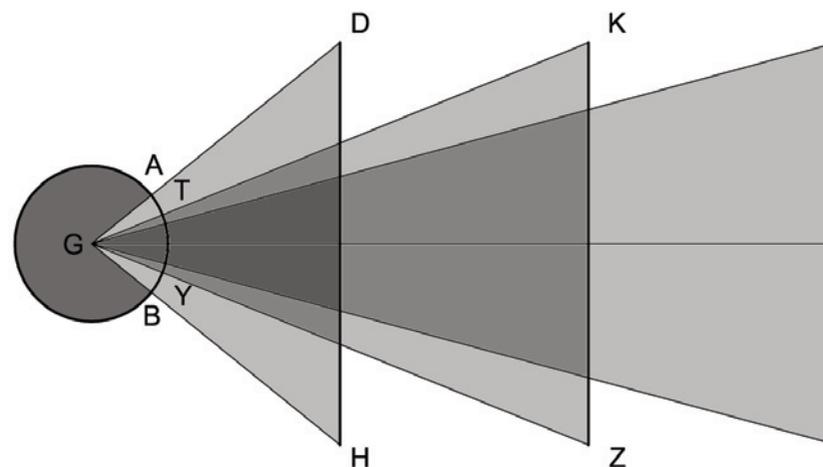


Fig. 7: Angoli più piccoli formano proiezioni minori sulla cornea. Dati due oggetti uguali in dimensioni HD e KZ, si dispongano a distanze differenti dall'occhio, in modo che gli estremi dei due segmenti appartengano a due rette parallele ed ortogonali ai segmenti stessi. Proiettando gli estremi dal cristallino (centro dell'occhio) si creano due immagini sulla cornea AB di HD e YT di KZ, con YT più piccolo di AB sebbene i segmenti originali abbiano stessa lunghezza. (Rielaborazione dell'autore).

Dati due oggetti uguali in dimensioni HD e KZ, si dispongano a distanze differenti dall'occhio, in modo che gli estremi dei due segmenti appartengano a due rette parallele ed ortogonali ai segmenti stessi. Proiettando gli estremi dal cristallino (centro dell'occhio) si creano due immagini sulla cornea AB di HD e YT di KZ, con YT più piccolo di AB sebbene i segmenti originali abbiano stessa lunghezza<sup>51</sup>.

Angoli più piccoli formano proiezioni minori sulla cornea, ma d'altra parte questo concetto era stato già elaborato da Euclide nella sua teoria della visione per angoli, scartata però da Avicenna per i motivi suddetti. Questo dimostra che le critiche fatte ad Euclide riguardano le lacune fisiologiche e anatomiche della sua teoria, ma non possono comunque togliere gloria alle innovazioni tutte geometriche che hanno invece un fondamento scientifico e una importanza notevole.

Avicenna dimostra pertanto con l'ultimo teorema e con tutte le disquisizioni nei suoi scritti, che le teorie del passato sono tutte false, eccezion fatta per quella aristotelica che invece Avicenna accetta e difende.

### 01.3.5 Averroes e lo sviluppo della teoria aristotelica

Abu-I-Walid Muhammad ibn Rushd (1126 – 1198), conosciuto in occidente col nome di Averroes<sup>52</sup>, fu uno dei maggiori sostenitori della teoria visiva di Aristotele, anche se il grande scienziato Alhazen aveva già introdotto la sua nuova teoria visiva decenni prima, ed essa stava prendendo gradualmente piede in tutti i circoli scientifici.

Averroes tratta i problemi della visione soprattutto in due suoi testi, l'*Epitome dei Parva naturalia*<sup>53</sup> e il *Kitab al-Kulliyat* che è in pratica un'enciclopedia medica.

Ma la teoria aristotelica viene rielaborata da Averroes secondo le teorie più prettamente anatomiche e fisiologiche di influenza galenica: l'esistenza di uno *pneuma* che trasmette il potere della visione dal cervello all'occhio e la consapevolezza che il senso visivo non è nel cuore come credeva Aristotele, ma è localizzato dietro la retina<sup>54</sup>.

L'aria, per mezzo della luce, riceve le forme degli oggetti e le convoglia allo strato più esterno dell'occhio il quale a sua volta dirige queste forme verso gli strati interni, fino a quando colpiscono quello più interiore in cui risiede il senso visivo<sup>55</sup>.

Questa sintesi della teoria di Averroes si ritrova nell'*Epitome* sopra citata ed è anche accompagnata da una serie di critiche verso le altre teorie visive.

La teoria di Platone non era possibile, perché se le forme degli oggetti già esistevano nell'anima ed erano richiamate alla vista nel momento in cui l'occhio veniva stimolato dagli oggetti esterni, allora l'anima poteva richiamarle quando voleva senza aver bisogno dello stimolo esterno. Questo però avrebbe negato la funzione degli organi visivi, che naturalmente non avrebbero più avuto ragione di esistere<sup>56</sup>.

Gli atomisti avevano supposto una visione fatta per piccolissime particelle che impressionavano l'anima. Come potevano questi corpuscoli contrarsi per entrare tutti contemporaneamente nell'occhio?<sup>57</sup>

La teoria estromissiva è tutta inglobata in un'unica critica, incorporando quindi Euclide, Tolomeo, Galeno e Al-Kindi. Se questa teoria fosse vera, l'uomo sarebbe capace di vedere anche al buio emettendo raggi o flussi visivi verso l'esterno; inoltre saremmo capaci di distinguere chiaramente tanto gli oggetti vicini quanto quelli lontani senza perdita di risoluzione, contrariamente alla realtà<sup>58</sup>.

Secondo la teoria estromissiva qualcosa viene emanato dall'occhio verso l'esterno e, per Averroes, potrebbe essere solo o un corpo o luce: se fosse un corpo esso sarebbe sottoposto alle regole del tempo, e tale corpo impiegherebbe un determinato tempo per raggiungere un oggetto esterno, assurdamente ampio se l'oggetto da raggiungere è per esempio una stella; se tale sostanza fosse luce essa non potrebbe trasportare l'anima o spirito visivo con se, perché caratteristica afferente solo ai corpi<sup>59</sup>.

Lo spirito deve pertanto essere situato dietro l'occhio, e un medium esterno (che non può essere ancora una volta luce) deve inviare le informazioni all'occhio e allo spirito dietro esso. Questa è però la teoria aristotelica, e non quella di Euclide.

Averroes accetta tale teoria e ne sviluppa gli aspetti del processo visivo, che Aristotele non tratta, come per esempio il modo in cui le forme passano dall'occhio alla parte cosciente del cervello.

In alcuni passi egli identifica nella retina, e non nel cristallino, la sede del senso visivo, o meglio l'organo fotosensibile dell'occhio, anticipando quindi di secoli Platter e Keplero.

Secondo Averroes è lo strato più interno, e quindi la retina, ad avere il compito di ricevere la luce dagli altri strati dell'occhio. Non poteva essere diversamente, perché la funzione fotosensibile doveva trovarsi nello strato più vicino al nervo ottico connesso con il cervello, e non nella parte a contatto con l'aria; il cristallino è l'ultimo strato dell'occhio e trasmette al senso visivo le forme che provengono dall'esterno. Il cristallino è come uno specchio in parte partecipe della natura dell'aria e in parte dell'acqua e quando essa riceve le forme dall'aria le convoglia verso l'umore vitreo<sup>60</sup>.

In realtà egli, in altri passaggi, considera comunque il cristallino come principale organo fotosensibile, ossia il principale strumento per ricevere le informazioni dall'esterno, assegnando alla retina la funzione principale di trasportare lo spirito visivo dai nervi ottici all'occhio<sup>61</sup>.

Probabilmente la soluzione sta nelle diverse interpretazioni dei testi. È normale che Averroes come anche Galeno, trattano la retina come organo di grande importanza, perché è solo grazie a lei che avviene il passaggio al cervello delle forme per mezzo dei nervi ottici, questo però non toglie importanza al cristallino che in ogni modo può rimanere l'organo con funzione fotosensibile.

Così Averroes e i seguaci di Galeno poterono parlare nei secoli successivi di sensibilità retinica a testimoniare che, oltre alla sensibilità del cristallino, esisteva quella della retina nel trasmettere le impressioni al cervello.

## 01.4. Sviluppo orientale della teoria intromissiva: Abu ibn al-Hasan ibn al-Haitham

### 01.4.1 Alhazen e la teoria intromissiva complessiva

Per secoli le differenti teorie, intromissive ed estromissive, hanno sviluppi diversi e contemporanei. Ogni teorizzatore avanza le proprie ipotesi, aggiungendo tasselli importantissimi nelle teorie della visione, ma aumentando il divario tra le due correnti di pensiero. I fondamenti stessi di una o l'altra sono profondamente diversi: indipendentemente dalla questione se sono gli occhi o gli oggetti a emettere raggi, la diversità maggiore è che mentre la teoria intromissiva muove le basi da aspetti fisiologici e anatomici, come anche dall'analisi dei modi fisici possibili di radiazione, quella estromissiva si basa su leggi geometriche per spiegare ogni passaggio.

E le differenze aumentavano, semplicemente perché i teorici hanno obiettivi differenti a cui arrivare con le proprie dimostrazioni.

Alhazen avrà il compito di intraprendere una nuova strada di ricerca, mai battuta prima, dimostrando che l'anatomia e la fisica, come anche la matematica e la geometria, potranno essere integrate in un'unica teoria della visione.

Pur subendo molteplici influenze, Alhazen parte dal presupposto che sono i corpi ad emettere un qualcosa verso l'esterno, che arriva all'occhio e che permette così la visione, aderendo pertanto alla teoria intromissiva.

Ricordiamo che una prima teoria intromissiva risale agli atomisti i quali affermavano che gli atomi erano emessi dagli oggetti in tutte le direzioni (Lucrezio li paragona alla pelle dei serpenti o delle cicale) trasportando le informazioni del colore e della forma, ed entravano nell'occhio per produrre la vista.

Una seconda teoria risale ad Aristotele il quale credeva che gli oggetti non producevano degli *eidola* o *simulacra*, ma che essi provocassero, piuttosto, una trasformazione nel medium, attualizzato dalla pre-

senza della luce e che tali trasformazioni venivano immediatamente percepite dall'organo visivo.

La produzione di Alhazen è vastissima, basti considerare che egli compose opere in quasi tutte le discipline scientifiche<sup>62</sup>.

Tuttavia il testo più famoso, più intatto, e sicuramente più diffuso nei secoli successivi in occidente fu il *Kitab-al-Manazir*, tradotto in latino con il titolo *De Aspectibus*<sup>63</sup>, titolo usuale per un'opera che trattava tutti gli aspetti di ottica, catottrica e diottrica.

Una vera e propria opera completa divisa in sette libri, ma che per nulla esaurisce il lavoro di Alhazen: dalle sue vastissime conoscenze scaturirono testi di geometria, astronomia, trattati sugli aspetti della luce e delle ombre, sulla luna e la sua luce, sulle eclissi e la loro forma, sull'arcobaleno e i motivi della sua formazione, e anche sulla luce delle stelle. Alle sue opere innovative vanno aggiunti anche tutti gli studi eseguiti sui testi di Tolomeo, Aristotele, Euclide, Galeno, Ippocrate e Platone, e moltissimi altri. Per un totale di circa duecento opere, una produzione così vasta che non può non stupire.

La sua profonda conoscenza delle teorie del passato, probabilmente tradotte da giovane e poi studiate di nuovo in età matura, lo portarono in maniera quasi naturale ad elaborare una personale teoria della visione. Nonostante la gran produzione letteraria e gli studi innovativi, Alhazen ha il grandissimo merito di esser riuscito a mettere insieme concetti, leggi, e analisi del passato, rielaborandoli e ricavandone una teoria autonoma che per secoli fu diffusa e accettata in tutto l'occidente.

Alhazen inizia il suo maggiore trattato, *De Aspectibus*, constatando che quando una persona guarda una forte luce, o comunque il suo occhio viene colpito da un bagliore improvviso, egli prova dolore<sup>64</sup>. Questa luce può essere la stessa del sole, che non riusciamo a vedere a occhio nudo a causa della sua potenza, o potrebbe anche essere la stessa luce del sole riflessa da uno specchio verso il nostro occhio<sup>65</sup>. È evidente che nel processo della visione, è l'occhio a ricevere qualcosa dall'esterno. Che la teoria estromissiva non poteva essere valida, Alhazen lo intuisce anche da un'ulteriore questione: se l'occhio guarda per un

lungo lasso di tempo una forte luce (una finestra, uno specchio riflettente, o anche una sorgente di luce) e poi l'osservatore muove lo sguardo, verso una zona scura e buia, egli continuerà a percepire una zona di chiarore, un disturbo, nel suo campo visivo; se invece si dirige verso una stanza buia, egli non riuscirà a percepire le caratteristiche formali della stanza, né gli ostacoli che gli si pongono di fronte, proprio a causa del bagliore ancora impresso sulla sua retina. Se la teoria estromissiva fosse stata valida, e la vista dipendesse dai raggi visivi fuoriuscenti dall'occhio per colpire gli oggetti, cosa traggono tali raggi durante il periodo in cui il bagliore rimane sulla retina? Quale oggetto ancora rimanda all'occhio le proprie informazioni formali? È chiaro che questa possibilità non poteva aver ragione di esistere.

Questa considerazione può essere condotta, oltre che per la luce bianca, anche con aree di luce colorate di una tinta dominante: ugualmente il colore impressiona l'occhio per qualche minuto e vira la colorazione della visione umana.

Le luci e i colori si diffondono da ogni punto di un corpo in tutte le direzioni e grazie al corpo trasparente interposto tra gli oggetti, ovvero l'aria, avviene la trasmissione di tali informazioni, anche attraverso l'occhio e i suoi strati che sono ugualmente trasparenti.

Ma Alhazen constata che la teoria estromissiva non può avere fondamento soprattutto per un ragionamento logico da lui posto all'attenzione del lettore.

Egli suppone che sia effettivamente l'occhio ad emettere raggi, i quali vanno a colpire gli oggetti. Questi devono necessariamente tornare all'occhio per permettere la visione, ma non possono essere uguali a quelli emessi, devono piuttosto trasportare le informazioni necessarie proprie degli oggetti in questione per poter esser percepiti.

È chiaro che, in ogni modo, gli oggetti non possono essere visti se qualcosa dagli oggetti stessi non arrivava all'occhio. Ma bisogna ricordare la premessa fatta da Alhazen, ossia che la luce e il colore impressionano l'occhio<sup>66</sup>, e che essi si diffondono nello spazio provocando una serie d'interazioni tra gli oggetti stessi, che sono del tutto indipendenti

dalla presenza o meno di raggi visivi provenienti dall'occhio, vale a dire che avvengono anche se nessuno le sta osservando.

Ne consegue che l'emissione di raggi visivi dall'occhio è un'azione superflua e del tutto inutile ai fini della visione<sup>67</sup>.

È anche vero però che Alhazen nel primo libro del *De Aspectibus*<sup>68</sup>, afferma che la visione avviene attraverso i raggi ricevuti ed emessi contemporaneamente. Questo non significa però che egli accetti la teoria estromissiva, piuttosto egli, grazie alle sue vaste competenze, capisce che una teoria non esclude l'altra<sup>69</sup>. Egli rifiuta la concezione che sia l'occhio ad emettere i raggi visivi, ma sa anche che non si può basare la teoria visiva solo sugli aspetti fisiologici ed anatomici, e che l'accezione puramente matematica e geometrica della teoria euclidea non può essere scartata, nonostante le sue deduzioni finali.

I raggi visivi come ente geometrico astratto, senza nessuna discriminante fisica, possono aiutare a spiegare gli aspetti della visione meglio di qualsiasi disquisizione filosofica e trattatistica. Proprio facendo uso dei concetti euclidei e tolemaici specifici della visione estromissiva, Alhazen dimostra la validità della teoria intromissiva.

Alhazen segna di conseguenza una svolta nelle teorie della visione perché, a parte le innovazioni da lui introdotte e lo spiccato empirismo delle sue dimostrazioni, egli ebbe il merito di unificare moltissime nozioni che, come abbiamo visto finora, viaggiavano separate, immerse in teorie apparentemente antitetiche.

Anche dal punto di vista anatomico, Alhazen ammette in prima persona di riprende sostanzialmente i concetti e lo schema introdotto secoli prima da Galeno, con le dovute modificazioni avvenute in seguito<sup>70</sup>.

Secondo Alhazen i nervi ottici, ognuno formato da due strati, hanno origine nella parte posteriore del cervello e si uniscono nel chiasma ottico<sup>71</sup>, per poi dividersi di nuovo e giungere all'occhio ma incrociati, vale a dire il nervo di sinistra verso l'occhio destro e viceversa, come aveva già accennato Hunain ibn Ishaq (877 d.C. - nc).

L'occhio è formato da quattro strati e tre umori. Il primo strato è la *consolidativa* che circonda l'*uvea* totalmente eccetto che per la sua parte frontale, ovvero in corrispondenza della pupilla. La pupilla è

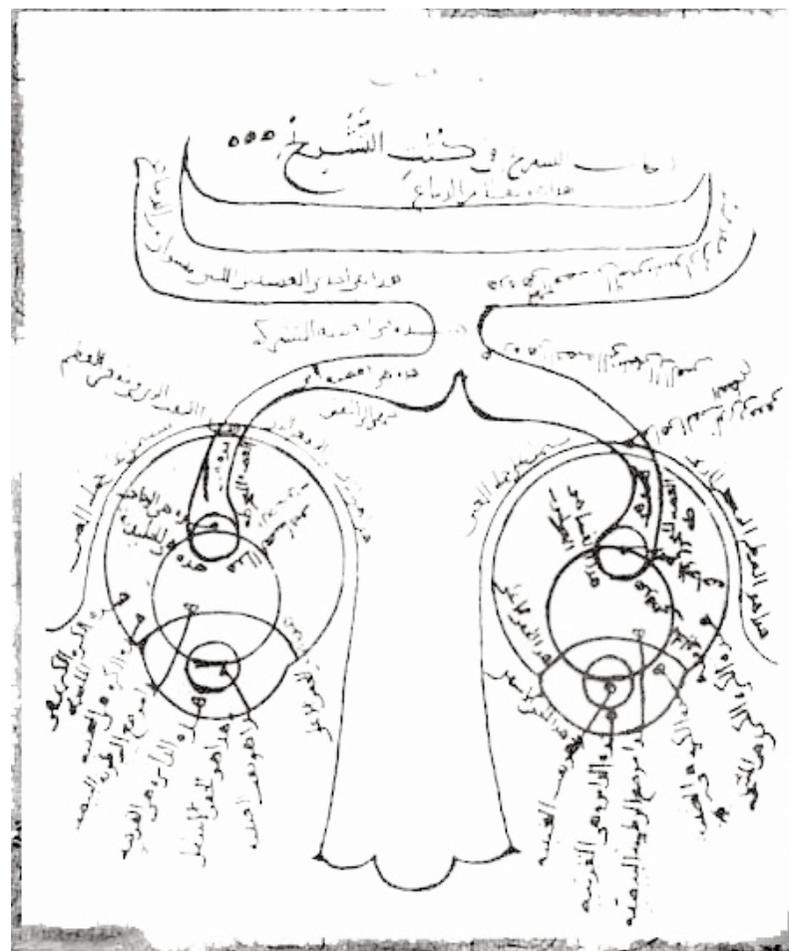


Fig. 8: Alhazen riprende sostanzialmente i concetti e lo schema introdotto secoli prima da Galeno, con le dovute modificazioni avvenute in seguito.

Secondo Alhazen i nervi ottici, ognuno formato da due strati, avevano origine nella parte posteriore del cervello e si univano nel chiasma ottico, per poi dividersi di nuovo e giungere all'occhio ma incrociati, vale a dire il nervo di sinistra verso l'occhio destro e viceversa, come aveva già accennato Hunain ibn Ishaq.

una perforazione dell'*uvea* ed è posta perfettamente in asse con il retrostante nervo ottico. L'occhio è poi coperto dalla *cornea*, uno strato trasparente e incolore ma resistente. Infine c'è la *aranea* o membrana aracnoide così detta perché assimilata ad una ragnatela che circonda l'*umore glaciale*. Quest'ultimo, interno all'*uvea*, è formato da due parti: quella anteriore è il *crystallino* di consistenza densa e di una trasparenza simile a quella del ghiaccio, la cui superficie anteriore è piatta, mentre quella interna è lentiforme ed è posizionata esattamente apposta alla parte terminale del nervo ottico. La parte posteriore, interna, dell'*umore glaciale* è il *vitreo*, così chiamato proprio per la sua trasparenza vitrea ed ha forma simmetrica rispetto al *crystallino*, cosicché le due parti formano una sfera contenuta dall'*aracnoide*. Il terzo ed ultimo umore dell'occhio è l'*albumoide* che in pratica occupa lo spazio vuoto tra *uvea* e *umore glaciale*, nonché quello tra *uvea* e *cornea*. Alhazen introduce però un fattore innovativo nel suo schema oculare, perché tenta di sottoporre ad una regola geometrica anche la struttura dell'occhio<sup>72</sup>, facendo notare che tutti gli strati e gli umori hanno forma sferica con centro posizionato su un asse che attraversa la pupilla e raggiunge il nervo ottico ma, ad essere più precisi, tutti i centri coincidono ad eccezione di quello dell'*uvea* e quello della superficie posteriore del *vitreo*. Nonostante la posizione di questi centri, la luce che entra nell'occhio attraversa tutti strati concentrici, almeno fino al *vitreo* (l'*uvea* non è attraversata dai raggi perché è perforata per dare posto alla pupilla) e da lì procede verso il nervo ottico. Il centro di tutti gli strati è anche il centro dell'occhio stesso e, di conseguenza, anche se il bulbo subisce rotazioni in differenti direzioni, la vista non viene affetta da tale movimento e rimane inalterata. La vista tuttavia dipende solo ed unicamente dall'umore glaciale, in particolar modo grazie al cristallino, mentre gli altri strati hanno funzioni connesse ad esso. Infatti Alhazen, sempre con il suo spirito pratico, fa notare che se avviene una qualche lesione al cristallino, l'uomo non riesce più a vedere. Invece la vista non rimane danneggiata, almeno non irrimediabilmente, se tale lesione si produce in qualsiasi altro strato del bulbo<sup>73</sup>.

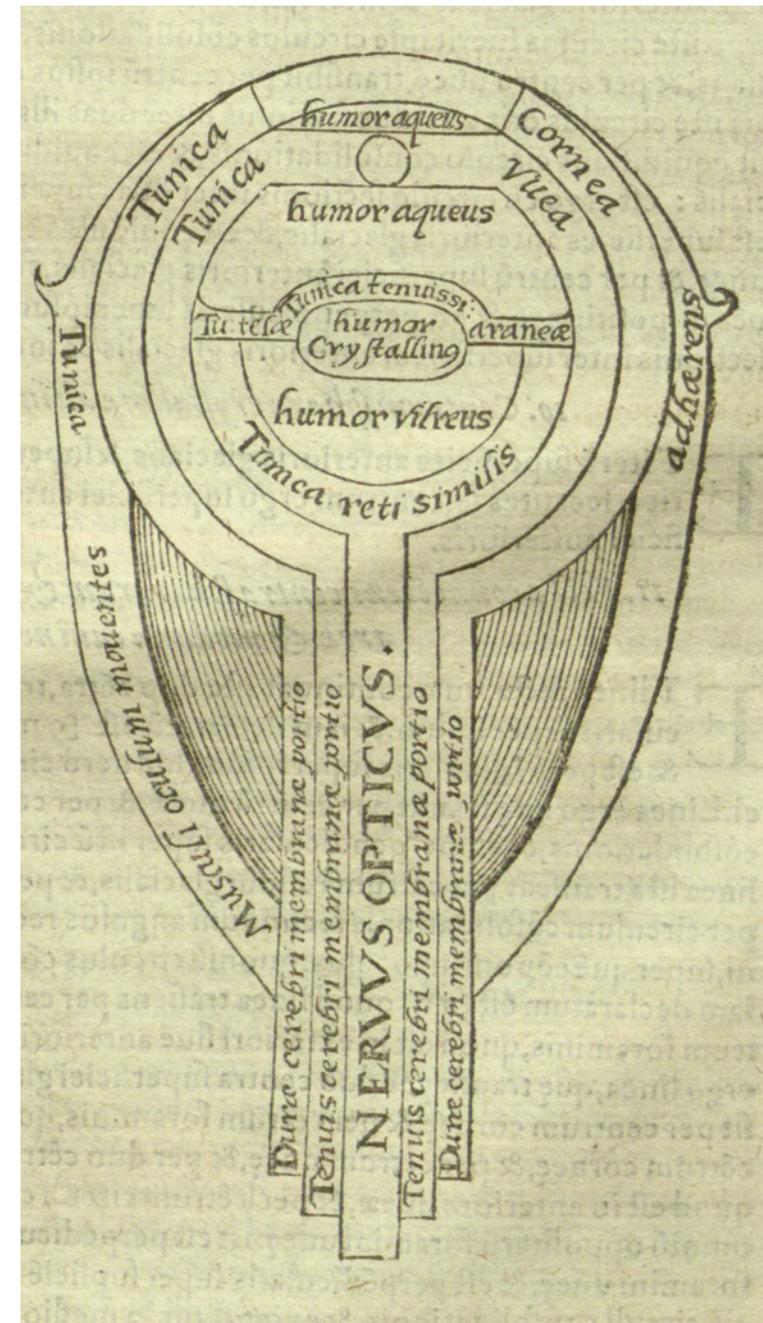


Fig. 9: Lo schema ottico di Alhazen, nella versione del *De Aspectibus* di Risner.

Alhazen aderisce anche alla teoria aristotelica nel dare la spiegazione del meccanismo con cui l'occhio percepisce le forme e i colori: in pratica egli afferma che tali caratteristiche sono assimilate dall'umore glaciale dell'occhio che, avendo una certa densità, non le lascia passare senza essere impressionato. Esso assume le qualità luminose e di colore degli oggetti e permette la vista e la percezione degli oggetti da cui tali caratteristiche provengono.

La luce illumina i corpi e i raggi luminosi riflessi entrano nell'occhio provocando dolore: la vista secondo Alhazen è dovuta ad una sofferenza dell'occhio. Però le forme che provengono all'occhio devono avere necessariamente un'organizzazione sulla superficie esterna del glaciale. Alhazen introduce pertanto un'importante innovazione nella dottrina visiva; egli non rifiuta le teorie di Galeno o Euclide in difesa di quelle aristoteliche, ma più semplicemente teorizza una nuova e personale dottrina della visione, tentando di risolvere problemi mai toccati o risolti precedentemente.

I corpi emettono da ogni singolo punto radiazioni secondo una direzione radiale: *“da ogni punto di ogni corpo colorato, illuminato da una luce, vengono emessi luce e colori lungo ogni singola retta che può essere tracciata da quel punto”*<sup>74</sup>. Questo concetto è il punto di partenza per la teoria di Alhazen, ed è del tutto innovativa rispetto ai concetti degli altri teorici che lo precedettero.

I raggi luminosi e i colori si propagano attraverso l'aria (provocando anche l'interazione tra i corpi stessi) e giungono all'occhio. Ma se tutti i raggi della stella arrivassero all'occhio, le luci e i colori sarebbero tutti mischiati e confusi tanto da non permettere la percezione delle forme e dei colori che impressionano l'occhio e di conseguenza nemmeno la percezione degli oggetti stessi<sup>75</sup>.

È necessario introdurre una legge che permette una visione nitida degli oggetti, in modo che raggi radiali provenienti da un punto non si sovrappongano con quelli che giungono da un'altra posizione: in pratica Alhazen nota che la sua teoria puntiforme provoca una produzione di raggi eccessiva e che, della miriade di raggi che provengono da un punto, solo uno provoca la vista, mentre tutti gli altri concretano

l'interazione tra gli oggetti reali e giungono all'occhio obliqui rifrangendosi nel denso umore glaciale<sup>76</sup>.

Alhazen deduce che solo i raggi incidenti in modo perpendicolare alla superficie dell'occhio producono la visione, ovvero, come già detto, che esiste un unico raggio luminoso che da un punto dell'oggetto giunge perpendicolare al bulbo oculare, instaurando così una corrispondenza biunivoca.

L'insieme di tutti questi raggi è un cono continuo e non discreto come quello di Euclide, che ha vertice nel centro dell'occhio<sup>77</sup>.

I raggi che incidono in maniera perpendicolare hanno effetto, o meglio, generalizzando la questione, le azioni perpendicolari hanno sempre un effetto maggiore rispetto a quelle che agiscono in modo obliquo.

Alhazen intuisce anche un fenomeno che sarà concretizzato in una forma matematica solo nel XVII sec. da Lambert: l'effetto che una luce produce secondo una direzione perpendicolare è sempre più intenso rispetto a quello prodotto secondo direzioni oblique<sup>78</sup>.

Tale regola non vale solo per la luce e Alhazen propone al lettore due sperimentazioni pratiche:

a) prendere una tavola e fissarne le estremità, ponendola di fronte ad un'apertura; collocarsi poi di fronte alla tavola e tirare una palla di ferro secondo una direzione ortogonale. Si osserva che la palla “rimbalzerà” proprio secondo quella direzione, o che addirittura avverrà la rottura della tavola stessa. Se invece ci si dispone a lato alla tavola e alla stessa distanza, la palla lanciata subirà una deviazione; b) in un secondo esperimento Alhazen propone di procurarsi una spada e un bastone di legno; bisogna provare a colpire il bastone sia in maniera perpendicolare che obliqua. Nel primo caso l'incisione sul ramo è molto profonda, o addirittura il colpo provoca la rottura. Nel secondo caso l'effetto è più debole e l'asta non si rompe<sup>79</sup>.

Esistono molti altri casi in cui si può verificare questo fenomeno. Però è chiaro che Alhazen considera l'effetto nella direzione perpendicolare più forte, ma ad ogni modo esiste un effetto nella direzione obliqua.

Di conseguenza come si può considerare l'azione lungo la direzione

obliqua non valida solo per i raggi luminosi? Perché non analizzare anche l'effetto, sebbene più debole, provocato dai raggi che giungono obliqui all'occhio?

Alhazen, infatti, comprende che la sua teoria ha questa lacuna. È credenza comune che un testo non può essere scritto in poco tempo; se poi ha le capacità e la valenza per diventare un libro chiave per la storia come il *De Aspectibus* di Alhazen, è palese che i sette libri devono esser stati realizzati in un lasso di tempo non breve. Infatti nel settimo e ultimo libro egli ritorna sull'argomento della visione, trattato nei primi tre, come se avesse in effetti ragionato sulla questione della perpendicolarità dei raggi luminosi all'occhio e intuito il difetto della teoria. Egli introduce pertanto una variante: la visione avviene sempre grazie ai raggi perpendicolari, e tutti i raggi obliqui che arrivano all'occhio sono percepiti come se fossero ortogonali<sup>80</sup>.

Questa precisazione però è il punto debole della sua teoria, perché una rifrazione provoca indubbiamente una deviazione del raggio luminoso che, comunque sia, non può convergere nel centro dell'occhio. Affinché questo avvenga servirebbe un'ulteriore rifrazione che cambia nuovamente la direzione del raggio. Egli effettivamente non dà una spiegazione chiara. Però avendo verificato la precisione e la pignoleria con cui Alhazen spiega i fenomeni, è probabile che, pur avendo intuito il problema, non sa dare una soluzione valida, soprattutto in mancanza delle nozioni anatomiche. Non poteva sostanzialmente immaginare che l'immagine ottica si creasse invertita nella parte posteriore dell'occhio, e grazie ai coni e ai bastoncelli, la luce venisse trasmessa all'occhio<sup>81</sup>. Alhazen invece ricercava un metodo che permettesse la visione nella parte mediana dell'occhio<sup>82</sup>.

Il teorico intuisce che i raggi che provengono ortogonali all'occhio convergono in un punto, centro dell'occhio stesso. Ma cosa avviene in questo modo ai raggi visivi? La vista sarebbe impossibile se il cono si riduce ad un punto adimensionale, come risulterebbe impossibile se i raggi proseguissero oltre tale punto a creare un cono a due falde, con il risultato, scartato da Alhazen, di ottenere immagini sottosopra.

Scartando queste due ipotesi Alhazen deduce che inevitabilmente

deve avvenire una certa rifrazione dei raggi visivi, prima che essi raggiungano il centro, in modo da procedere, oltrepassando tale centro, verso il nervo ottico. Questo può avvenire se l'umore glaciale, compreso tra vitreo e cristallino, è posto prima del centro e in modo che la sua densità provochi una rifrazione dei raggi tale da dirigerli paralleli verso il nervo ottico<sup>83</sup>.

La rifrazione secondo Alhazen avviene per due motivi: sia per la diversa densità, come si è detto, sia per il differente potere sensitivo.

Dal nervo ottico le informazioni vengono trasmesse al chiasma, incontro dei due nervi. Alhazen deduce che, affinché non ci siano immagini confuse, se i due nervi ottici si uniscono nel chiasma, le forme che provengono dai due occhi devono essere identiche e qui si uniscono<sup>84</sup>; inoltre deve esistere una corrispondenza tra ogni punto del cristallino e ogni punto del nervo ottico. I raggi visivi seguono le leggi dell'ottica non solo fino al cristallino ma fino al chiasma dove le forme sono percepite finalmente dal *ultimum sentiens*<sup>85</sup>.

Alhazen però non dà una spiegazione chiara di cosa sia effettivamente percepito dal *ultimum sentiens*, cioè se la luce e i colori attraversano il cristallino e arrivano al chiasma per mezzo del nervo ottico. Egli più che altro sembra accettare l'idea che luce e colore siano percepiti dal cristallino. Esso li trasforma in sensazioni. L'*ultimum sentiens* in pratica non percepisce forme, luci e colori, piuttosto le impressioni e gli effetti prodotti dal cristallino.

Il problema posto da Alhazen è sicuramente spinoso, e non si può immaginare che potesse essere risolto dal musulmano, dal momento che fu lui stesso a porsi per primo. La questione era dovuta ad una certa indecisione tra quali fossero gli effettivi organi sensibili alla visione tra cristallino, vitreo, spirito visivo e *ultimum sentiens*. Questa ambiguità sarà argomento di successivi e plurimi studi che trovarono una valida teoria solo nel XVII secolo<sup>86</sup>.

Alhazen ha, per suo conto, eliminato il dualismo tra teoria estromissiva e intromissiva, dimostrando più volte l'assurdità della prima. Ma di certo non possiamo schedare la teoria del musulmano come solamente intromissiva. Abbiamo visto come nelle sue molteplici dimostrazioni, egli

tenti di dare spiegazioni geometriche, inserendo caratteristiche euclidee e tolemaiche. Egli incorporò in un'unica teoria la maggior parte delle conoscenze a lui pervenute e tramandate nel corso dei secoli, senza necessariamente prendere una o l'altra direzione come fino a quel momento era stato fatto.

Tutto ciò fece della teoria di Alhazen una fondamentale base di partenza per gli studi a lui successivi. Notevole sviluppo ebbero le sue dottrine in tutto l'occidente e l'oriente e seppure con errori e perplessità, egli gettò la maggior parte delle basi della teoria ottica contemporanea, formalizzata da Keplero e dalla sua teoria sulla visione retinica. I concetti e le dimostrazioni date spesso da Alhazen possono sembrare ai nostri occhi elementari, ma questo non può oscurare il grande sforzo intellettuale che era alla loro base e che permise di formulare la teoria visiva che per secoli influenzò l'ottica occidentale. Non dobbiamo dimenticare, come detto, che la teoria visiva contemporanea è dovuta a Keplero, ma che le basi della sua personale teoria affondano le radici proprio in quella di Alhazen di sette secoli anteriore.

## 01.5. La rinascita culturale in occidente: Robert Grosseteste

Mentre si sviluppa la cultura in oriente, cosa avviene in occidente?

Dopo la grande produzione ellenistica, in effetti, non si hanno grandi progressi. Soprattutto con l'avvento della religione cristiana. Senza cimentarsi in disquisizioni sociologiche e teologiche, è utile piuttosto soffermarsi sui fatti reali.

Sono pochi i testi latini che trattano del fenomeno ottico da un punto di vista filosofico – scientifico. Dobbiamo tuttavia ricordare la traduzione dal greco del *Timaeus* di Platone realizzata da Chalcidius nel IV sec. Questo testo comprendeva anche alcuni passi inerenti la teoria della visione e della luce. Proprio grazie a questa traduzione, tale teoria platonica fu la più diffusa in occidente durante il medioevo.

Sempre di Chalcidius bisogna ricordare i *Commentari* alla traduzione stessa, che sono di maggior interesse, perché si cerca sia di spiegare la teoria platonica ma anche di presentare altre teorie come quella di Euclide, di Eraclito o degli stoici e di dimostrare la veridicità di quella tradotta.

Alla teoria platonica secondo cui la luce interiore si unisce con quelle esterna (vedi paragrafo dedicato), Chalcidius collega le conoscenze anatomiche sull'occhio, ottenendo sostanzialmente una teoria Galenica – Platonica, ed essa ebbe sviluppo e validità in occidente per quasi tutto il medioevo.

Lo stesso Sant'Agostino adoterà poco più tardi una teoria estromissiva d'origine platonica, probabilmente desunta dal testo latino.

Ma Sant'Agostino visse nel IV-V sec. e nei secoli successivi poco avvenne in campo culturale e della ricerca. L'occidente entra in un periodo di indubbia apatia: i testi circolano solo nei conventi e nelle scuole; la chiesa ha un potere crescente nella cultura, e non solo su essa, ed è probabilmente la causa della decadenza occidentale di questo periodo. Ricordiamo che la perdita di migliaia e importantissimi testi fu dovuta proprio alla accanita repressione del cristianesimo verso tutto ciò che era afferente la religione politeista tra cui la distruzione completa della più importante biblioteca del passato: quella di Alessandria<sup>87</sup>.

Con questo non voglio assolutamente dire che nulla accadesse in occidente, né che non possiamo vantare grandi meriti in differenti campi, come quello pittorico e artistico. Ma di sicuro non c'è paragone tra la produzione letteraria e lo sviluppo scientifico e culturale avvenuto nel musulmano oriente e quello che invece accadde nell'Europa cristiana.

I primi passi verso una rinascita in tal senso sono da ricercare nel XII secolo, quando iniziano a riemergere teorie sulla visione, di sicuro non innovative, ma basate sui testi (pochi in occidente!) tramandati fino a quel momento. In conformità a quello che è stato accennato, è chiaro che le dottrine teorizzate in questo periodo hanno tutte un impostazione platonica.

Prima di arrivare a Robert Grosseteste, bisogna ricordare il contributo di Guglielmo di Conches (1080 – 1150 ca.), primo neoplatonico del periodo in esame. Secondo lui affinché possa avere luogo la visione bisogna che coesistano tre condizioni: la presenza di un raggio interiore, l'esistenza di una luce esteriore ed infine che ci sia un corpo opaco da vedere.

Se una di queste tre condizioni viene a mancare, allora l'osservatore non riesce a vedere: o si è ciechi, o si è in posti completamente bui, o qualcosa si interpone tra noi e l'oggetto opaco.

Quando l'anima desidera vedere, emette una sostanza sottile e aerea attraverso il nervo ottico alla pupilla e da qui esce come raggio interiore. Quando esso esce dall'occhio si mescola con la luce esterna e poi raggiunge il corpo opaco, ne assume forma e colore, e ritorna indietro, tramite gli stessi passaggi, e porta all'anima le informazioni dell'oggetto. Vero è che questa teoria aveva già avuto le proprie e logiche confutazioni: come può il raggio interiore raggiungere in un tempo infinitesimo le stelle e riuscire anche a tornare indietro? E se la sua propagazione è legata anche al tempo, si deduce chiaramente che ci sono dei problemi di ritardo di fase nei vari rientri dei raggi visivi interiori emessi: un raggio che ha colpito un corpo vicino ritorna all'anima in un tempo minore rispetto a quello che ha raggiunto le stelle.

Guglielmo di Conches, si pone questo quesito e risponde che tali raggi

sono fatti di una sostanza così sottile e veloce che possono essere istantaneamente in un posto e nell'altro. Non convince i suoi contemporanei e non convince nemmeno noi lettori<sup>88</sup>.

Robert Grosseteste<sup>89</sup> (1168 – 1253) è stato, secondo molti, la figura che permise effettivamente questa rinascita culturale in occidente, il fondatore di una nuova epoca, per la storia dell'ottica, che si concluse con Johannes Kepler. Egli tuttavia può essere considerato solo un iniziatore, perché nelle sue conoscenze rientravano Aristotele, Euclide, Al-Kindi e Avicenna, ma, in effetti, non menziona i due più importanti testi fino ad ora realizzati: mancano all'appello l'*Optikè* di Tolomeo e il *Kitab-al-Manazir* (*De Aspectibus* in latino) di Alhazen. Grosseteste pertanto inizia solamente il processo di assimilazione e unificazione delle nozioni, delle dottrine e dei testi greci e musulmani, ma non citare nemmeno i due testi cui sopra, eclissa parzialmente la sua figura rispetto ai suoi contemporanei di poco più giovani come Alberto Magno o anche Roger Bacon.

La teoria di Grosseteste è spesso definita metafisica della luce<sup>90</sup>. In effetti egli introduce, all'interno della sua filosofia della luce, una serie di analogie e metafore in cui il tema della luce ha una grande importanza. Egli non fa uno schema preciso, ne raggruppa le sue teorie, ma un filo logico può essere ritrovato se consideriamo che il tema della luce si ritrova in quattro argomenti principali.

Innanzitutto l'epistemologia della luce secondo cui la conoscenza è un processo di acquisizione di forme platoniche non modificabili assimilabile alla visione corporea attraverso gli occhi. Poi Grosseteste ci parla della cosmogonia della luce in cui la luce è praticamente la prima forma corporale, mentre tutto il resto nel mondo è il prodotto della propagazione autonoma della luce da un primo singolo punto. Nell'eziologia della luce Grosseteste spiega come tutti i rapporti di causa - effetto nel mondo materiale siano in analogia con la radiazione luminosa. Infine la teologia della luce, in cui la luce viene utilizzata come metafora per spiegare verità teologiche.

La caratteristica epistemologica della filosofia di Grosseteste muove però da quella di Sant'Agostino, che vede Dio come la vera

luce, sorgente per tutte le altre. Sant'Agostino vede Dio non come luce figurativa (che invece è la rappresentazione propria in arte: una fonte di luce forte e avvolgente). Piuttosto Dio è luce in senso stretto, è l'archetipo della luce stessa<sup>91</sup>.

L'illuminazione divina di Grosseteste è una luce spirituale che si diffonde sulle cose intelligibili e sull'occhio della mente, e con esse instaura una relazione analoga a quella che la luce del sole ha con l'occhio umano e le cose visibili: come l'occhio umano non può vedere le cose del mondo se esse non sono illuminate dalla luce, allo stesso modo l'occhio della mente non riesce a percepire le verità se non nella luce della verità assoluta<sup>92</sup>.

L'aspetto cosmogonico di Grosseteste deriva invece dalla dottrina platonica: egli afferma che Dio creò un primo punto di luce e poiché è natura propria della luce quella di diffondersi, essa si espande da quel punto immediatamente in tutte le direzioni per creare una sfera di luce infinita, a meno che non si ponga un corpo opaco ad ostacolare la sua diffusione<sup>93</sup>.

Altro aspetto fondamentale nella filosofia della luce di Grosseteste è l'eziologia della luce. Le azioni di causa – effetto sono proprie delle cose, perché è intrinseca in esse la capacità di produrre, dalla loro essenza, una necessaria ipostasi che guarda verso l'esterno ma è attaccato ad esse. Esso rappresenta l'archetipo della causa: così il fuoco emette il suo calore, la neve il freddo, i cibi qualche tipo di fragranza.

La luce emessa da un corpo luminoso rientra in queste analogie, e rientra negli effetti sopra citati.

Per Grosseteste un agente naturale amplifica il suo potere da se verso un ricevente. Questo potere spesso viene chiamato *species*, mentre il ricevente può essere un senso o un oggetto qualsiasi. Ciò che viene emesso agisce comunque, sia che esso incontri un senso sia che incontri un oggetto indifferente inanimato. Naturalmente è l'effetto che cambia sebbene la causa sia la stessa: se tale potere viene percepito da un senso l'effetto prodotto è qualche volta spirituale e nobile; se il ricevente è un oggetto inanimato, l'effetto sarà puramente materiale<sup>94</sup>.

Infine esiste, nella teoria della luce, l'aspetto teologico che ha bisogno di poche spiegazioni, se si ha una certa dimestichezza con la dottrina della Chiesa. Essa spesso compara Dio alla Luce, come abbiamo già visto, e come si può leggere spesso, ad esempio, nel vangelo di Giovanni<sup>95</sup>.

Per Grosseteste la filosofia della luce fu un modo per giustificare il suo profuso studio dell'ottica perché essa permetteva di rivelare l'essenza delle cose materiali, della cognizione e di Dio stesso. Una tale affermazione può sembrare assurda, ma dobbiamo ricordare il periodo in cui il teologo visse, un medioevo in cui la presenza della chiesa era forte ed egemone, e riuscire a dare una spiegazione teologica della stretta relazione tra Dio e l'ottica e dell'importanza di tale scienza certo diede a Grosseteste la libertà di procedere nei suoi studi senza timore<sup>96</sup>.

I lavori di Ottica di Grosseteste sono principalmente due: *De lineis, angulis et figuris* e *De Iride*<sup>97</sup>. In essi egli considerava esatta l'emissione di raggi dall'occhio, sebbene essi sono una astrazione geometrica in quanto il flusso visivo è una sostanza che radia e splende alla stessa stregua del sole che illumina i corpi. Il flusso visivo, la luce esterna e la radiazione emessa dal corpo esterno colpito dalla luce, sono i tre fattori determinanti la visione.

Grosseteste non può che essere un teorizzatore estromissivo, vista la sua formazione, a cui manca il grande apporto di Alhazen. Egli ha studiato Euclide, Al-Kindi ma anche Aristotele e Avicenna e, in definitiva, accetta la teoria estromissiva, sebbene studi anche quella intromissiva che considera però incompleta.

Chiaramente Grosseteste è una figura molto importante per la nascita di un rinnovato interesse negli aspetti di ottica in occidente, ma non possiamo dimenticare che è solo un inizio del processo. Egli aveva troppe lacune per poter dare una buona e radicata teoria visiva, lacune che non possono attribuirsi naturalmente a colpe proprie del teorico, ma a problemi temporali: è probabile che quando Grosseteste pensò e scrisse le proprie teorie, il trattato di Alhazen ancora non era conosciuto, o forse neanche era arrivato in occidente. Certo è che solo pochi

anni più tardi, altri teorici riuscirono a formulare una dottrina più accurata e sistematica, basandosi spesso proprio sulla traduzione latina del testo del mussulmano. Questa non può essere solo una coincidenza, e i problemi nella teoria di Grosseteste vanno purtroppo ricercati, non in una presunta capacità inferiore di Grosseteste, quanto in una sfortunata non coincidenza temporale.

## 01.6. La sintesi delle teorie ottiche orientali e occidentali nel XIII secolo

Sebbene con pochi anni di distanza dalla produzione di Grosseteste, i contributi degli studiosi della seconda metà del XIII sec. diedero un apporto maggiore allo sviluppo delle teorie visive. Come già detto, non si può sicuramente togliere meriti a Grosseteste. La questione è che a pochi anni di distanza gli studiosi ebbero a disposizione una quantità di testi antichi superiore: dalle opere e rispettivi commentari di Aristotile, al *De Aspectibus* di Alhazen. La possibilità di avere accesso a testi così importanti causò un interesse sempre maggiore nelle questioni di ottica, permettendo anche di unificare la teoria di Alhazen con le nozioni aristoteliche.

In questo contesto, prima di arrivare a Roger Bacon, si inserisce Alberto Magno<sup>98</sup> (1193 or 1207 – 1280), la cui produzione nel campo ottico avviene dopo il 1240 circa, con il *De homine, Meteora, De anima, De sensu et Sensato e De animalibus*.

Dai suoi testi appare chiaro che egli è a conoscenza dei testi di Aristotele e della produzione letterario – filosofica dell'antica Grecia, ma anche di gran parte della trattatistica araba, eccezion fatta per il testo di Alhazen (Alberto Magno non lo conosceva ancora all'inizio dei suoi studi, ma se ne ritrovano tracce sicure negli ultimi suoi scritti)<sup>99</sup>.

Egli in sostanza rifiuta tutte le teorie della visione formulate nel corso dei secoli, eccezion fatta per quella di Aristotele di cui era profondo conoscitore e sostenitore.

Egli, come il filosofo greco, crede che la visione avvenga grazie ad una modificazione del mezzo trasparente intorno all'oggetto e che poi si propaga anche alla sostanza acquosa dell'occhio stesso.

Aggiunge però anche nozioni derivate dai testi arabi: il potere visivo proviene dal nervo ottico e risiede nel cristallino; la visione avviene grazie ad un cono o piramide con base nell'oggetto e centro nell'occhio; l'asse principale passa sempre nel centro del bulbo.

Egli rifiuta naturalmente la teoria estromissiva e riprende la maggior

parte delle dimostrazioni da Avicenna e Averroes. Inoltre, nel testo *De animalibus*, ammette che alcuni animali (soprattutto felini) hanno di notte come una luce che esce dagli occhi, dimostrazione secondo i teorici estromissivi, che la visione avviene attraverso raggi emessi dall'occhio. Ma Albert constatò che il fenomeno è provocato in realtà da alcune sostanze fluorescenti con cui l'occhio di questi animali è formato, e che se sottoposte a luce esse brillano<sup>100</sup>.

Alberto Magno fu il primo in occidente a sostenere la teoria aristotelica, perché ebbe la possibilità di conoscere i suoi scritti e quelli arabi. Fino a pochi anni prima, l'unica teoria conosciuta, come abbiamo visto, grazie alla traduzione latina di Chalcidius, era quella platonica. Lo stesso Grosseteste non poté andare oltre questa teoria per mancanza di conoscenze. Alberto Magno conobbe invece altre scuole di pensiero, le studiò e le fece proprie, unificandole in una teoria globale della visione.

### 01.6.1 Roger Bacon

Roger Bacon, come molti dei suoi contemporanei, apparteneva ad un ordine monastico, quello dei Francescani. Altri come Alberto Magno erano domenicani. In effetti questa caratteristica non può passare inosservata, come anche il fatto che molti degli studiosi di ottica del periodo avevano effettuato degli studi a Parigi. Sebbene non ci siano chiari segni di una scuola parigina di Ottica, né di scuole francescane o domenicane, certo la coincidenza è alquanto strana<sup>101</sup>.

Roger Bacon (probabilmente 1214 – 1292) studiò ad Oxford e poi a Parigi, infine divenne frate francescano di nuovo ad Oxford. Ma le opere di Ottica risalgono proprio al soggiorno parigino: la *Perspectiva*, *De multiplicatione specierum* e *De speculis comburentibus*<sup>102</sup>.

Nei suoi testi si riconosce l'influenza di Grosseteste, che aveva in ogni modo un legame con i francescani. Non si sa di un legame diretto tra i due, ma di certo Bacon venne facilmente a contatto con i testi del predecessore, ed infatti egli considerava l'ottica come

parte fondamentale dalla filosofia naturale. A Parigi invece egli venne a contatto con le teorie di Alberto Magno<sup>103</sup>; ma aveva anche una vasta conoscenza letteraria, da Aristotele ad Avicenna e Averroes, da Al-Kindi a Hunain. Di sicuro l'influenza maggiore, e più originale, fu quella di Tolomeo e di Alhazen. Egli fece un largo uso dell'*Opikè* e del *De Aspectibus*, testi che invece non avevano avuto fino ad allora una grande diffusione.

La gran parte delle nozioni sul processo visivo Bacon le riprende proprio da Alhazen. Non credo necessario soffermarmi troppo su questo aspetto: egli considera che dai corpi si diramano a stella raggi luminosi che determinano la visione; si deve instaurare una corrispondenza biunivoca tra punto dell'oggetto e punto della cornea dell'occhio.

Solo i raggi ortogonali alla cornea permettono effettivamente la vista. Bacon riprende Alhazen anche affermando che le azioni che avvengono nel senso ortogonale hanno una forza maggiore. Così come una luce più forte esclude l'azione di una debole, allo stesso modo il raggio ortogonale agisce in maniera più incisiva annullando l'effetto dei raggi che provengono obliqui all'occhio<sup>104</sup>.

Inoltre affinché tali raggi non vadano ad annullarsi in un unico punto, centro della cornea, essi subiscono una rifrazione nella parte posteriore dell'umore glaciale, vengono deviati e diretti al nervo ottico.

In seguito anche Bacon, come fece anche Alhazen, si corregge affermando che anche i raggi che giungono all'occhio obliqui concorrono alla visione, aumentando l'intensità di quelli ortogonali<sup>105</sup>. Ma anche Bacon non è molto chiaro su come essi vengano rifratti all'interno dell'occhio e come raggiungano lo stesso centro (Fig. 10).

Infine egli, come il mussulmano, distingue una serie di categorie secondo le quali la visione è funzionale: la luce, il colore, la forma e così via. E indica anche quali sono i sei requisiti necessari affinché ci sia la vista: la luce, la separazione tra oggetto e occhio, la grandezza dell'oggetto visibile, la trasparenza del medium e la densità dell'oggetto stesso. Ad esse aggiunge il tempo e la salute dell'occhio stesso, di cui Alhazen parla ma in altre occasioni<sup>106</sup>.

L'influenza del teorico arabo è naturalmente indiscussa, ma Bacon ha una grande importanza perché seppe unificare più teorie insieme, compresa naturalmente quella di Alhazen.

Dal punto di vista dell'anatomia egli segue uno schema più simile a quello di Costantinus (che tradusse in latino il testo di Hunain), sebbene risenta del rigore geometrico dello schema oculare di Alhazen.

Ma è nel metodo in cui avviene la radiazione fisica che determina la vista, che Bacon riesce ad unificare in maniera magistrale le diverse teorie dimostrando che non era solo una di esse ad avere il dono della verità, ma che tutte insieme ponevano le basi per una nuova e apprezzabile teoria, nonostante le problematiche che vedremo poco avanti.

Nella sua ipotesi, Bacon unisce le nozioni aristoteliche della trasformazione del medium, con le intuizioni di Alhazen sulle forme della luce e dei colori e con la dottrina di Grosseteste della moltiplicazione delle specie. Sostanzialmente egli investe le specie visive di Grosseteste delle proprietà proprie delle forme di Alhazen, affermando che Aristotele

aveva, secondo lui, considerato la stessa soluzione<sup>107</sup>.

Il teorico considera la moltiplicazione delle specie come un processo che avviene a livello universale e che la specie è il primo effetto naturale di ogni agente<sup>108</sup>. Esse però non hanno il carattere di efflusso o emanazione materiale come intendevano Platone e gli atomisti. Piuttosto il processo prevede che gli agenti producano delle specie nel medium ad essi adiacente, il quale medium per contro produce altre specie nel suo intorno, e così a continuare.

Aristotele credeva che la trasformazione del medium potesse avvenire solo alla presenza della luce, mentre Bacon dice che la sollecitazione delle specie è il modo per attivare la potenzialità dell'aria.

Da Alhazen riprende il concetto che le forme di luce e colore radiano da ogni punto di un oggetto in tutte le direzioni, fino ad arrivare all'occhio che viene, per Bacon, stimolato da esse; in pratica egli afferma che le forme di cui Alhazen ci parla sono niente altro che le specie di Grosseteste.

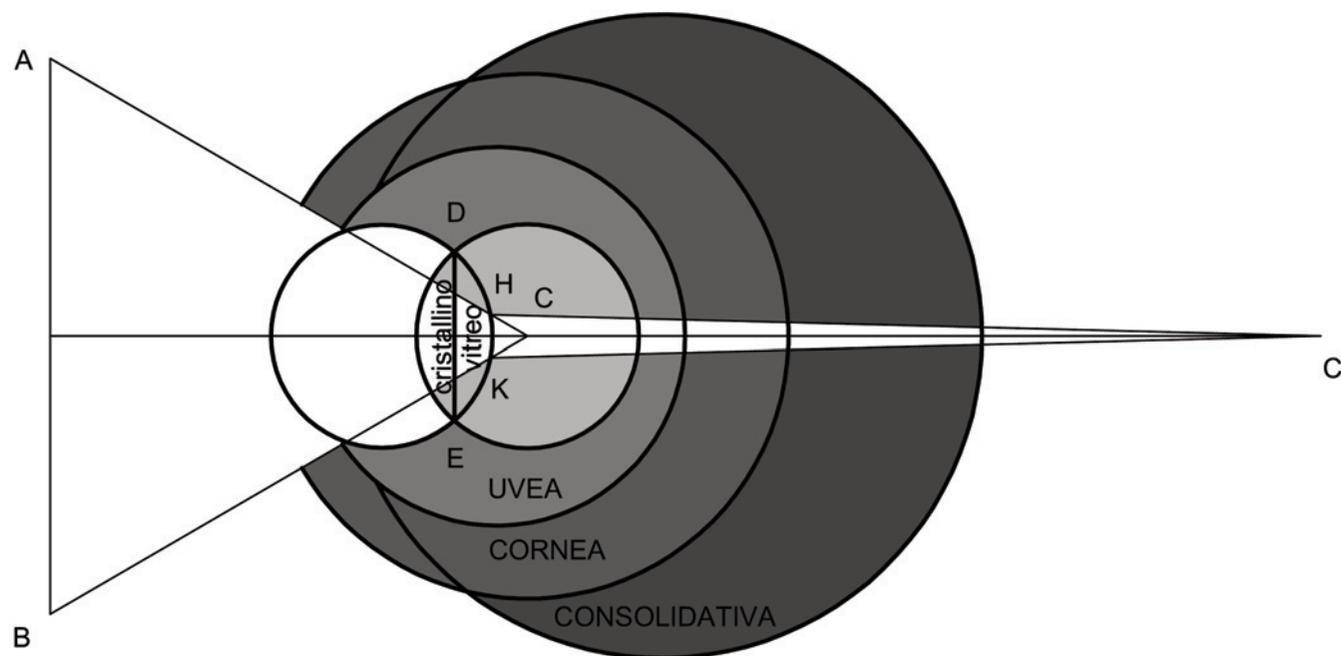


Fig. 10: Solo i raggi ortogonali alla cornea permettono effettivamente la vista. Bacon riprende Alhazen anche affermando che le azioni che avvengono nel senso ortogonale hanno una forza maggiore. Così come una luce più forte esclude l'azione di una debole, allo stesso modo il raggio ortogonale agisce in maniera più incisiva annullando l'effetto dei raggi che provengono obliqui all'occhio. Inoltre affinché tali raggi non vadano ad annullarsi in un unico punto, centro della cornea, essi subiscono una rifrazione nella parte posteriore dell'umore glaciale, vengono deviati e diretti al nervo ottico. Immagine ripresa dal testo di D. Lindberg, a sua volta da Londra, British Museum, MS Royal 7.F.VIII fol 54v, e MS Harley 80, fol. 4v. (Rielaborazione dell'autore).

Bacon in ogni modo considera la vista come un processo intromissivo, come i suoi due maggiori predecessori. È l'occhio che recepisce in maniera passiva le specie che giungono ad esso, le quali sono naturalmente il fattore attivo, provenienti dagli agenti. Per tale dimostrazione riprende nuovamente Alhazen quando ci parla di come la luce e i colori condizionano la vista<sup>109</sup>: quando da un forte luce o colore si gira lo sguardo verso un posto buio, colori e luci hanno impressionato l'occhio e solo con il tempo la loro immagine svanisce. Senza questo tipo di impressione la vista non può avvenire<sup>110</sup>.

Quindi affinché avvenga la visione, secondo Bacon, deve avvenire (oltre alla presenza delle categorie già citate) il processo di emanazione delle specie, o meglio della moltiplicazione di esse da ogni oggetto reale, sostanza o cosa spirituale e corporea.

Ma è proprio questo concetto a creare i primi problemi alla teoria baconiana. Infatti se la moltiplicazione delle specie avviene da ogni cosa, è evidente che anche la vista è un agente attivo, ovvero produce anche essa delle specie. Il concetto è per Bacon facilmente dimostrabile, se si prende in considerazione l'atto di specchiarsi, in cui l'occhio vede se stesso nello specchio, la qual cosa non potrebbe accadere se non immaginando che delle specie escano dall'occhio e ritornino ad esso<sup>111</sup>.

Prima constatazione è che, inevitabilmente, non ci troviamo più di fronte ad una teoria intromissiva, ma qualcosa deve necessariamente uscire dall'occhio, e sebbene non siano raggi, ma specie, in ogni caso il fondamento estrosissimo è presente.

Inoltre Bacon proponendo l'esempio pratico dello specchio cade in un conflitto evidente: egli considera allo stesso modo l'occhio come materia, dalla vista vera e propria, e valuta uguali le specie che derivano dall'occhio (responsabili dell'immagine specchiata) e le specie che provengono dal potere visivo (responsabili invece della visione).

La sua concezione delle specie è simile a quella di Grosseteste e dal processo di moltiplicazione non può sottrarsi anche la vista: perciò essa percepisce gli oggetti visibili attraverso la moltiplicazione delle sue specie verso l'oggetto stesso.

Bacon si accorge naturalmente del conflitto: prima aveva affermato che le specie emesse dai corpi provocavano una trasformazione del trasparente fino a giungere all'occhio impressionandolo, e poi dice che anche l'occhio emette specie. Ma se bastano le specie degli oggetti ad impressionare l'occhio, a cosa serve la radiazione visiva emessa da esso?<sup>112</sup>

Bacon risolve il conflitto in maniera gerarchica. Egli considera le specie provenienti dalle cose reali come terrene e prive di nobiltà, non adatte ad agire sull'occhio e sul potere visivo. Per contro le specie visive hanno un carattere spirituale; esse sono necessarie per Bacon perché hanno il compito di nobilitare sia quelle terrene, sia lo stesso trasparente. In questo modo le specie terrene diventano capaci di agire sull'occhio e di permettere la vista<sup>113</sup>.

Questa soluzione appare geniale, perché concilia perfettamente teoria intromissiva e teoria estromissiva.

La figura di Bacon ha un'importanza decisiva in occidente. Egli, grazie alla sua teoria visiva sorprendentemente conciliatoria, permise la diffusione di Alhazen e mise le dottrine del mussulmano in una posizione predominante sulle altre. Infatti la teoria visiva di Bacon riprende molto da quella di Alhazen, e la diffusione del primo rese possibile la conoscenza indiretta del secondo. Evidentemente in seguito gli studi sul grande teorico mussulmano diventarono più intensi e il suo testo divenne uno dei principali per gli studiosi di ottica.

### 01.6.2 L'influenza teorica di Bacon: John Pecham e Vitellione

L'opera di Bacon, come abbiamo accennato, ebbe grande influenza nei suoi contemporanei e successori. A pochi anni di distanza la sua teoria suggestionò le concezioni di due altri importanti teorici nel progressivo sviluppo della teoria visiva: John Pecham (1230 ca. – 1292) e Vitellione (1230 ca.-1280 ca).

Non si hanno notizie certe su un contatto diretto tra i due teorici con Bacon. Ma non è da escludere che possa essercene stato qualcuno tra

Bacon e Pecham. Quest'ultimo, infatti, era a Parigi proprio negli anni in cui il primo compose le opere di ottica (intorno al 1260) e addirittura soggiornavano nello stesso convento francescano. È molto probabile che essi abbiano parlato di ottica, e che Pecham rimase colpito dalle dottrine baconiane, tanto che la sua personale teoria deve molto al maestro. Più improbabile invece è un contatto personale tra Vitellione e Bacon, ma è, al contrario, indubbio che egli ebbe accesso diretto alle sue opere durante il soggiorno nella curia di Viterbo intorno al 1269, dal momento che tali scritti furono diffusi nella curia l'anno precedente<sup>114</sup>. Pecham scrisse due opere di ottica: il *Tractatus de Perspectiva* e *Perspectiva communis*. Oltre all'influenza di Bacon, naturalmente si ritrovano nelle sue opere anche molti concetti di Alhazen.

Ma la cosa curiosa è che l'autore non cita mai chiaramente il nome del teorico mussulmano, ma lo indica sempre come *auctor Perspective*, come a riconoscergli il merito di aver fondato le basi concrete dell'ottica.

In sostanza l'opera di Pecham non ha caratteri innovativi, piuttosto amplificò la conoscenza di Alhazen nei suoi contemporanei. Egli segue la linea di Alhazen in maniera chiara, e quando interpreta il testo del mussulmano o ha la possibilità di conciliare la sua teoria con le altre tradizionalmente opposte egli segue Bacon (la cui dottrina, come visto, è magistralmente conciliatoria delle opposte posizioni teoriche): affinché la visione avvenga, servono anche i raggi visivi che escono dall'occhio.

Egli però non cade negli errori di Bacon. Non crede che le specie possano avere la capacità di scegliere una direzione arbitraria dopo la rifrazione. Le specie non si intersecano né nell'occhio né nel nervo ottico. Evita il paradosso dello specchio, e non confonde le specie dell'occhio con il potere visivo, anzi assegna alla radiazione visiva una funzione differente rispetto a Bacon: essa, quando esce dall'occhio, non ha il compito di nobilitare le specie terrestri, ma di moderare la luce esterna<sup>115</sup>.

Forse a causa della non diretta conoscenza con Bacon l'influenza di questo ultimo nell'opera di Vitellione è minore, e meno rintracciabile.

Egli sembra seguire piuttosto le orme di Alhazen, tanto da essere stato spesso criticato nei secoli per aver copiato e non analizzato l'opera dell'arabo.

Vitellione però aveva di sicuro preso coscienza dei testi di Bacon e non si può negare che la personale difesa alla teoria di Alhazen rispetto alle altre che la precedettero, riecheggia le constatazioni citate dallo stesso Bacon.

Il suo testo dal titolo molto poco originale (ma in fondo era il giusto titolo per un'opera simile), *Perspectiva*, era sostanzialmente una organizzazione cronologica di una buona parte delle dottrine visive da Euclide a Tolomeo, da Al-Kindi ad Alhazen, fino ad arrivare a Bacon stesso.

Comunque questi due padri non gettarono di certo le basi di una innovazione nelle teorie della visione. Il loro principale merito è quello di aver permesso una diffusione ancora maggiore delle nozioni ottiche di Alhazen e anche di Bacon. In un periodo in cui la stampa ancora era agli albori, constatare che il testo di Vitellione fu manoscritto in diciannove copie, il *Tractatus de perspectiva* di Pecham in otto copie, e la *Perspectiva communis* in sessantadue copie, lascia quantomeno sbalorditi. Se pensiamo poi che lo sviluppo della stampa aumentò notevolmente il numero di scritti circolanti nel vecchio mondo, di certo ci rendiamo conto che la fama di Alhazen, e poi di Bacon, era accresciuta di molto. Certo rimane un mistero il motivo per cui circolavano così tanti testi che trattavano la teoria di Alhazen in parte rimaneggiata, mentre il testo originale del teorico mussulmano venne pubblicato in edizione latina solo nel 1572 e quella di Bacon addirittura nel 1617. Di Alhazen esisteva di sicuro una copia del XIV sec. in volgare, utilizzata tra l'altro per la trattazione del teorico nello specifico paragrafo di questo testo.

L'influenza che tali teorici ebbero in questo periodo va ricercata anche nei programmi universitari. Infatti l'ottica entrò a far parte, come scienza di studio, nelle varie università d'Europa, e i testi citati, soprattutto il *Perspectiva communis* di Pecham, erano i principali libri di riferimento. La Sorbonne a Parigi ne possedeva una copia già nel 1338, e Vienna ne fece uso dal 1390, e poi di seguito le maggiori università.

Ad Oxford dal 1431 vennero utilizzati i testi di Alhazen e Witelo, come anche quelli di Euclide e Tolomeo, come ordinato dallo statuto. E negli anni successivi, lo stessa cosa avvenne a Cambridge, Alcalá e Salamanca in Spagna e anche Parigi.

Infine un altro metodo per comprendere la grande diffusione di questi testi e delle rispettive teorie, è prendere in considerazione le numerose citazioni fatte dai vari trattatisti e autori dal XIV sec. in poi. Esse ci mostrano che gli autori avevano senza dubbio una straordinaria familiarità con i testi di Alhazen, Bacon, Pecham e Vitellione<sup>116</sup>.

### 01.6.3 L'arresto nello sviluppo di una teoria ottica valida del secolo XIV

Il secolo XIII può essere considerato un secolo prolifico dal punto di vista dello sviluppo teorico delle teorie visive, soprattutto se paragonato ai secoli precedenti in cui la produzione trattatistica era stata praticamente inesistente e fossilizzata alle dottrine platoniche tradotte da Chalcidius.

Di certo non si può dire altrettanto del secolo successivo, cioè il XIV. Inspiegabilmente lo sviluppo si bloccò e si trovano pochi e sporadici tentativi teorico – scientifici per cercare di capire come avvenisse realmente la visione. La cosa appare strana, perché quando, nel XVI secolo, gli studi ottici ripresero in maniera fervente, si arrivò alacremente alla soluzione del funzionamento dell'occhio e del processo visivo.

Ma in pratica le conoscenze che si avevano nel XVI secolo non erano poi molto superiori nel campo ottico tanto da permettere il salto qualitativo che non avvenne nel XIV secolo.

Bisogna tuttavia ricordare che il Rinascimento italiano e i successivi studi nel resto d'Europa, aveva focalizzato l'attenzione e tutte le energie nello studio della nuova scienza prospettica.

La nascita della prospettiva, come scienza codificata (o almeno come noi la conosciamo, senza addentrarci nei problemi della prospettiva nel mondo antico), monopolizzò l'interesse della gran parte degli studiosi di ottica, pittori, matematici, architetti. Forse è in questa febbre

dilagante che possiamo trovare le motivazioni per la mancanza di studi nel campo ottico-visivo. Da questo momento avviene la distinzione tra ottica, studiata dai tempi più remoti, e prospettiva, la nuova scienza catalizzatrice di interesse da parte dei pittori, prima, e matematici, poi. La distinzione è tra *perspectiva naturalis* e *perspectiva artificialis*. Solo quando l'attenzione verso la nuova scienza venne esaurita, o almeno in gran parte dissipata, ricompaiono trattati e nuove dottrine sulla teoria della visione, ovvero proprio nel XVI sec.

Naturalmente il mancato interesse per questa dottrina non provocò un totale oscuramento di produzioni letterarie. La soluzione non è mai radicale e sebbene raramente, abbiamo una serie di trattati di ottica anche nel XIV sec., che comunque non hanno una grande importanza: questi riprendono le teorie già citate, o inseriscono una serie di innovazioni che hanno spesso fondamenti erranei.

Esiste comunque anche una spiegazione aggiuntiva che riguarda l'interesse crescente per i testi aristotelici e lo spostamento dell'interesse (oltre che per la scienza prospettica) verso aspetti più fisiologici e fisici, abbandonando lo studio della teoria visiva secondo un punto di vista strettamente geometrico che derivava da Alhazen e Bacon.

Dei tanti autori del periodo, focalizziamo l'attenzione su due in particolare, il primo che fa parte del filone dei prospettici, che ancora erano legati ad un approccio baconiano del problema visivo, il secondo invece che appartiene al secondo periodo aristotelico.

### 01.6.4 Henry di Langenstein

In questo periodo troviamo una serie di trattati di alcuni autori che vengono spesso denominati prospettivisti. Tutti questi testi hanno un carattere prettamente scolastico in cui vengono inizialmente presentati gli argomenti contro la tesi che di volta in volta si vuole difendere, poi si presentano i personali punti di vista dell'autore del testo ed infine si cerca di dare delle risposte agli argomenti che hanno dato spunto alle questioni discusse.

Tra questi trattati, il più rilevante (contestualizzato a questo periodo) è decisamente il *Questiones super perspectivam* di Henry di Langenstein (1325 – 1397). Anche lui studiò a Parigi<sup>117</sup>, il che rinforza la tesi da molti avvallata di una scuola ottica parigina iniziata da Grosseteste.

Le definizioni prese in esame di questo trattato, che si occupano in maniera evidente di ottica e della visione, sono le numero 1, 4, e 9-11<sup>118</sup>.

La sua teoria visiva parte dal presupposto che la luce si propaga attraverso dei raggi non euclidei (ossia rette geometriche) ma intesi come raggi radiativi che si propagano dal corpo luminoso e terminano a contatto con un medium trasparente (in ogni suo punto).

Naturalmente questo concetto deriva dalla teoria originale di Grosseteste, poi ampliata da Bacon, della moltiplicazione delle specie<sup>119</sup>. Nel testo di Henry, nella prima proposizione, troviamo anche la distinzione *lux* e *lumen*. Egli considera *lux* l'agente naturale (la qualità luminosa di un corpo brillante) e *lumen* la qualità strumentale (cioè le specie) che dal *lux* irradia e che permette la visione<sup>120</sup>.

Nella quarta proposizione Henry tratta una questione particolare, che assume però il carattere di paradosso: egli afferma e dimostra come mai la fiamma di una candela appare più grande da lontano che da vicino.

I raggi che raggiungono l'occhio in maniera ortogonale, danno un'esatta immagine di KE, altri raggi provenienti dall'oggetto e che cadono obliqui rispetto al bulbo oculare, vengono rifratti e, se prolungati, c'ingannano con un'immagine corrispondente a K'E' maggiore dell'originale KE.<sup>121</sup>

Questa dimostrazione, banale quanto inesatta, non ha nessun legame con la questione che Henry voleva in effetti dimostrare, ma da conto del fatto che, in definitiva, i raggi rifratti ci restituiscono una immagine dell'oggetto reale maggiore in dimensione apparente dell'originale. Ma è poi vero? Non esiste fondamento per poter dimostrare una cosa del genere. Appare chiaro che la sua ipotesi e la tesi sono incongruenti.

La questione dei raggi rifratti nell'occhio viene riaperta nella nona proposizione, di cui daremo la dimostrazione grafica, ma che premetto ha anch'essa una delle ipotesi errate.

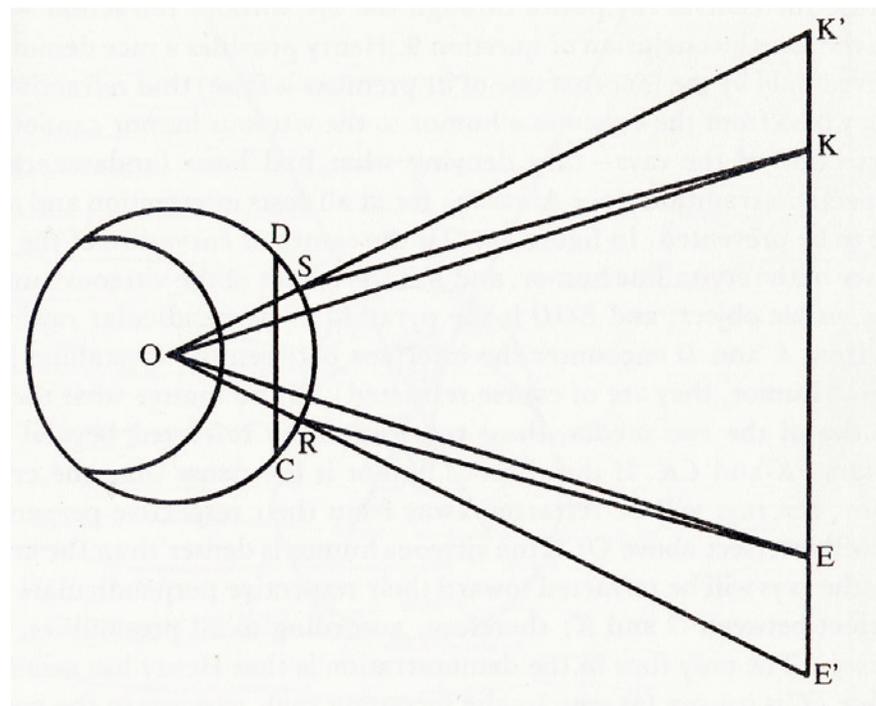


Fig. 11: Dimostrazione del motivo per cui la fiamma di una candela appare più grande da lontano che da vicino. Essa è banale e inesatta. (Elaborazione D. Lindberg)

Egli tenta di dimostrare che in un qualsiasi medium (compreso anche l'occhio), nessun raggio può penetrare senza essere rifratto.

Nella prima conclusione afferma che la perpendicolarità di un raggio rispetto alla superficie dell'occhio è impossibile perché il raggio non è euclideo e possiede una certa ampiezza e, se l'asse di esso cade perpendicolare, non accade lo stesso per le parti laterali del raggio stesso. Nella seconda e terza conclusione afferma che i raggi che cadono ortogonali rispetto al bulbo hanno un unico centro, che può essere quello della cornea, ma anche quello di altre superfici. In pratica esistono più centri per i diversi strati, ma se così è, allora anche se i raggi sono ortogonali alla cornea, non lo sarebbero agli altri strati e quindi subirebbero una successiva rifrazione.

Nella quarta conclusione Henry dimostra che l'intersecazione dei raggi che vengono rifratti dal passaggio da cristallino a vitreo non può essere impedita in nessun modo.

Se  $O$  è il centro della curvatura della superficie anteriore del cristallino, e  $K$  il centro della curvatura dell'umore vitreo. I raggi luminosi provenienti dal corpo  $ED$  arrivano nel cristallino ortogonali, e vengono, secondo le ipotesi precedenti, rifratti nei punti  $F$  e  $C$ .

La rifrazione però non può avvenire oltre  $FK$  e  $CK$  perpendicolari ai due punti dal centro del vitreo. Ne consegue che comunque sia l'intersezione dei raggi avviene inevitabilmente all'interno del vitreo. Se l'umore vitreo è meno denso del cristallino allora l'intersezione avviene prima di  $O$ . Se invece l'umore vitreo è più denso del cristallino allora intersecazione avverrà tra  $O$  e  $K$ .<sup>122</sup>

Questa teoria avrebbe minato le basi di tutte le teorie precedenti<sup>123</sup> che prevedevano tale intersezione oltre il vitreo, in modo che i raggi fossero rifratti dalla superficie posteriore dell'umore acqueo direttamente nel nervo ottico.

Ma un grave errore venne commesso da questo teorico. Egli considera la superficie dell'umore vitreo convessa, rispetto ai raggi che giungono all'occhio, mentre tutta la trattatistica antecedente la presentava concava. La quinta conclusione, che deriva in parte dalla quarta, è alquanto strana. Henry partendo dall'ipotesi errata della precedente

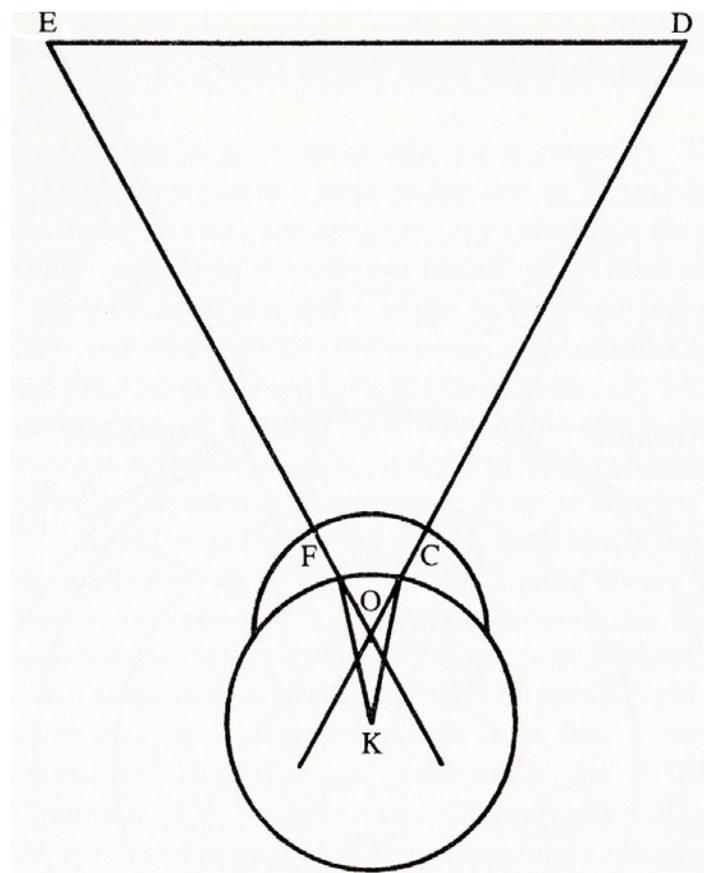


Fig. 12: Secondo Henry di Langenstein l'intersecazione dei raggi che vengono rifratti dal passaggio da cristallino a vitreo non può essere impedita in nessun modo. (Elaborazione D. Lindberg).

proposizione, arriva tuttavia ad intuire, ma poi ad escludere, cosa realmente avviene nell'occhio. Probabilmente le inesistenti conoscenze del funzionamento della retina portavano tutti i teorici ad escludere puntualmente la soluzione esatta.

In pratica, dalla conclusione quattro, Henry deduce che qualcosa di errato esiste nelle trattazioni precedenti (ricordiamo però che la sua parte anteriore del vitreo ha una concavità errata). Se non si può evitare l'intersezione tra i raggi, e cioè se essi non vengono rifratti nuovamente nella superficie posteriore dell'umore glaciale per giungere direttamente al nervo ottico, allora potrebbero avvenire solo due cose: o la cognizione visiva avviene prima che essi si intersechino cioè subito sotto la superficie convessa del vitreo, o la visione del campo visivo sarebbe invertita e inversa<sup>124</sup>. La seconda ipotesi è inevitabilmente (secondo Henry) da escludere, perché nessuno poteva ancora immaginare che effettivamente la nostra visione del mondo potesse essere sottosopra e rielaborata e corretta dal cervello.

La sesta conclusione a cui Henry arriva, sulla problematica delle riflessioni dei raggi luminosi, è che anche i raggi che incidono sulla superficie esterna dell'occhio in modo obliquo concorrono in qualche misura alla visione, dopo aver subito ben 4 differenti riflessioni<sup>125</sup>: prima in direzione della perpendicolare alla superficie nella cornea, poi allontanandosi dalla perpendicolare all'umore albugineus, al cristallino, e al vitreo.

Alcuni di questi raggi dovrebbero riuscire a concorrere verso il centro del potere visivo, ma non si capisce come questo possa avvenire a livello geometrico. In realtà l'intenzione di Henry non è molto chiara, né sui disegni originali, né sull'interpretazione successiva.

Nella decima proposizione egli si occupa della percezione visiva e se essa avviene secondo un angolo. Egli prende in considerazione la struttura dell'occhio e afferma che i fori del bulbo nella sua interezza sono due, il primo è la pupilla, il secondo invece, più esterno, in corrispondenza della giuntura tra sclera (opaca) e la cornea (trasparente).

Le aperture hanno un diametro uguale al lato del quadrato inscritto alla circonferenza del rispettivo strato: l'apertura della pupilla è evidentemente più piccola della seconda apertura.

Esiste pertanto un angolo (massimo) che ha vertice nel centro dell'occhio, e spigoli tali da coincidere con gli estremi delle aperture, cosicché essi vengono anche toccati dai lati esterni della massima piramide visiva. Per cui tale oggetti compresi in questo angolo vengono visti nella loro interezza, contrariamente se gli oggetti sono maggiori, ed escono dal campo di questo angolo, essi non possono essere percepiti interamente.

Questo concetto muove dall'idea, radicata in Henry, che non può avvenire la visione se qualcosa del potere visivo non entra nell'umore glaciale, dove egli considera risiedere il potere percettivo dell'esterno. Egli infatti conclude, nell'undicesima questione, che qualcosa deve per forza provenire dal nervo ottico. Riprende sostanzialmente la teoria galenica e afferma che nelle cavità del nervo ottico risiedono dei sottili corpi (spiriti) che hanno il compito di inviare e portare indietro tutte le informazioni (species) che ci servono per la visione.<sup>126</sup>

Interessanti sono anche alcuni esperimenti da lui condotti (e successivamente anche dall'italiano Biagio Pelacani<sup>127</sup>) per spiegare il perché la luce che attraversa un piccolo foro triangolare, proietta in realtà su una superficie di fronte una figura circolare. In sostanza quello che cerca di spiegare Henry è la diffrazione, ma senza risultati convincenti.

Non si può dire che la teoria di Henry di Langenstein avesse particolari meriti, anzi i molti errori in cui egli cadde non aiutano. Tuttavia egli rappresenta una volontà di continuare a studiare la scienza ottica e forse anche quella di sviluppare teorie diverse per un maggiore e ulteriore sviluppo delle teorie visive. In fin dei conti è pur sempre uno sforzo letterario dietro cui esiste un profondo ragionamento e, come tale, merita tutto il nostro interesse.

### 01.6.5 John Buridian

Alla fine del XIII e inizio del XIV sec., i testi di Aristotele divennero sempre più importanti nelle università europee. Tre testi del filosofo influenzarono particolarmente gli studenti per molto tempo: la *Meteorologia*, *De anima* e *De sensu*.

Naturalmente l'approccio aristotelico era differente da quello dei *perspectivisti* perchè basato più sugli aspetti fisici, ontologici e fisiologici, che non su quelli geometrici.

Tra i commentatori di questo periodo bisogna ricordare John Buridian<sup>128</sup> (1295 – 1358), anche lui studente all'università di Parigi. Egli scrisse *Questiones* sui testi di Aristotele *De anima* e *De sensu*, trattando appunto il tema della visione.

Da questo testo, come da altri di differenti autori, si riesce ad intuire come fosse poco accentuato l'interesse di questi teorici per i problemi della visione e dell'ottica. Buridian infatti tratta il tema in maniera molto generale, in difesa della teoria intrinseca. La parte più interessante del suo libro, riguarda l'interrelazione tra luce e colore. Egli afferma che la luce esterna, ovvero il *lumen* (specie) che s'irradia dal *lux* (agente attivo), e condizione necessaria per poter vedere i colori<sup>129</sup> che sono spesso troppo deboli perché possano influenzare con le proprie specie il *medium* e la vista. Con l'aiuto della luce essi riescono a penetrare il *medium* e a permettere la visione. Egli riprende pertanto la filosofia di Grosseteste e di Bacon, secondo cui ogni agente emette delle specie che influenzano lo spazio circostante. Il *lumen* è la specie del *lux*, l'immagine del *lux* che avanza nel *medium*, così il *lux* viene visto grazie al *lumen*. Allo stesso modo i colori vengono percepiti grazie alle specie da essi emanate<sup>130</sup>.

Oltre al filone aristotelico, e quello in precedenza esaminato con Henry di Langenstein che affondava le radici in Alhazen e Bacon, esiste un terzo filone che riguarda lo studio degli aspetti teologici<sup>131</sup>, volontariamente escluso dalla trattazione perché poco attinente al tema di questo studio. Per lo stesso motivo ci si limitava a pochi accenni della corrente aristotelica. Mi sembra utile piuttosto tentare di capire, come accennato nell'introduzione, il motivo per cui si fermò lo sviluppo teorico della teoria della visione.

La corrente prospettivista venne in parte e gradualmente soppiantata da quella aristotelica, durante il XIV e XV sec., a causa della sempre maggiore conoscenza e presenza dei testi aristotelici nelle Università e nei corsi di studio. Il numero di commentari dei testi di Aristotele aumentò

in modo spropositato, tanto da eclissare i moltissimi trattati prodotti dai prospettivisti. I commentari avevano spostato l'attenzione su aspetti ontologici della visione (Esistono realmente raggi distinti? La luce e il colore sono della stessa specie? Qual è la relazione tra *lux* e *lumen*?) e fisiologici della percezione (Qual è l'esatto oggetto della visione? Tutte le cose conosciute dal mezzo visivo sono equamente conosciute? Qual è la relazione tra sensazione e cognizione?)<sup>132</sup>.

Chiaramente il motivo per cui non troviamo nessun progresso nella teoria che portò in seguito allo sviluppo delle dottrine di Kepler, non è da ricercare in una incompetenza dei teorici del medioevo, o in una perdita di vitalità, piuttosto nello spostamento dell'interesse in altri settori.

Bisogna inoltre aggiungere che a questo spostamento di interesse fece eco un cambiamento anche nella metodologia e nello stile in cui i testi venivano scritti. Con lo sviluppo della tecnica pedagogica dalla *lectio* alla *disputatio* e alla *questio*<sup>133</sup>, gli autori nei loro testi si occupavano solo di alcuni circoscritti problemi, mentre prima si occupavano di tutti gli aspetti di una dottrina.

Il loro principale proposito era quello di selezionare alcune questioni discutibili riprese dai soliti autori, per cui mancava una sistematica e comprensiva discussione del processo visivo. Sembrava come se per i teorici dell'epoca non fosse necessario redigere un completo e comprensibile resoconto della teoria visiva, perché le impostazioni basilari erano state già state fissate secoli prima, mentre era di grande utilità proporre domande e cercarne la risposta su temi isolati e non risolti della teoria visiva.

## 01.7. Leonardo da Vinci e il Rinascimento

Durante il Rinascimento, italiano come nel resto d'Europa, furono sostanzialmente pochi i progressi nel campo dell'ottica. La maggior parte delle trattazioni sull'argomento erano strutturate in modo da allontanarsi poco dai modelli precedenti di Alhazen prima e Bacon e della scuola di Oxford poi. Una sostanziale evoluzione, seppur graduale e lenta, ebbe invece la conoscenza anatomica del bulbo oculare, che raggiunse la quasi completa comprensione con Platter, anticipatore delle teorie di Kepler.

Si può, senza paura, affermare che probabilmente solo Leonardo da Vinci tentò strade sostanzialmente nuove e differenti nello studio delle teorie visive, introducendo qualche volta geniali intuizioni, ma anche inceppando in banali errori.

Bisogna ricordare che nel XIV sec. iniziò il processo di imitazione scientifica della natura con Giotto e i suoi affreschi oculocentrici, culminato con la nascita e scoperta (o riscoperta?<sup>134</sup>) della prospettiva lineare da parte di Filippo Brunelleschi<sup>135</sup>. Il primo trattato in cui però la scienza prospettica viene messa nero su bianco è in effetti nel *Della Pittura* (1435) di Leon Battista Alberti (1404 – 1472).

In questo trattato l'Alberti definisce ancora una volta la piramide visiva che ha base nell'oggetto osservato e vertice nell'occhio; tale piramide era composta di tre differenti tipologie di raggi rettilinei: il primo tipo costituisce il contorno, i raggi più esterni; del secondo tipo sono invece tutti i raggi interni, che hanno la capacità di assumere il colore di ciò che colpiscono, per portare poi l'informazione cromatica all'occhio; infine il raggio principale, quello centrale, attraverso il quale l'oggetto è visto in maniera più chiara e che è l'ultimo ad abbandonare l'oggetto. Egli in effetti non aderisce a nessuna delle teorie del passato, probabilmente perché non è uno dei suoi interessi capire o descrivere il funzionamento dell'occhio, quanto sviluppare la prospettiva lineare, che richiede la spiegazione della piramide visiva, ma non una spiegazione anatomica, fisica e fisiologica di come l'uomo riesce a vedere<sup>136</sup>. Avendo comunque definito la piramide visiva e

la rettilinearità dei raggi visivi, Alberti può spiegare il metodo per realizzare la prospettiva lineare. L'utilizzo del *velo*, spiegato dal trattatista, permette al lettore di capire facilmente il processo della prospettiva lineare della sezione dei raggi su un pannello quadrettato. Il pittore può: o disegnare direttamente o anche mirando da un punto fisso ricostruire la prospettiva (il più fedele possibile) con l'ausilio di un foglio quadrettato in modo analogo al vetro.

Alberti introduce nel trattato il punto di concorso, intuendo che tutte le rette perpendicolari al quadro concorrono in un unico punto.

L'inserimento, se pur veloce e poco approfondito, della questione sulla prospettiva ha semplicemente il fine di capire quanto della teoria della visione del passato ci sia nella trattazione dell'Alberti (e prima nelle sperimentazioni pratiche di Brunelleschi), e se gli artisti del Quattrocento avessero conoscenza delle teorie della visione trattate finora.

È indubbio che architetti ed artisti del Rinascimento conoscessero le teorie dei loro predecessori nel campo dell'ottica e come asserisce Alessandro Parronchi, Brunelleschi aveva notizia di sicuro delle opere di Alhazen, di Bacon, Pecham e Vitellione o addirittura di Tolomeo, e che proprio grazie ad esse l'architetto riuscì a costruire le due famose tavole prospettiche<sup>137</sup>.

Allo stesso modo, la piramide visiva dell'Alberti non poteva che discendere dalle dottrine di Alhazen tramandate attraverso l'opera di Bacon e Witelo<sup>138</sup>.

Edgerton arguisce anche che la vista laterale della costruzione prospettica fatta dall'Alberti riprende la proposizione 11 di Euclide nel *De visu*<sup>139</sup>, in cui si afferma che oggetti visti da raggi più alti appariranno più alti.

I due schemi messi a confronto rivelano una straordinaria somiglianza, probabilmente non proprio casuale, sebbene il fine dell'Alberti sia la costruzione prospettica, mentre quello di Euclide sia di spiegare il processo ottico, ma tutto ciò potrebbe far intuire che una certa coscienza geometrica della prospettiva l'avevano anche i teorizzatori classici.

Lo stesso Lorenzo Ghiberti (1381-1455) nel terzo libro dei *Commentarii* presenta una completa relazione sulle tradizioni matematiche nel

campo dell'ottica, estratta e spesso parafrasata sui testi storici dei prospettivisti e riprendendo in sostanza la maggior parte delle tematiche già trattate dai suoi predecessori.

Anche lui comunque non aggiunse nulla di nuovo alla teoria visiva. La maggior parte dei trattatisti di questo periodo hanno una conoscenza anche approfondita delle radici e dello sviluppo dell'ottica e non è escluso che le loro deduzioni prospettive provengano direttamente dallo studio approfondito dei testi di Euclide, Tolomeo, Alhazen o Bacon. Ma il loro interesse non era sostanzialmente focalizzato all'ottica, quanto all'aspetto applicativo e geometrico e alla rappresentazione reale dello spazio naturale. Lo stesso Alberti scrive: *“Tra gli antichi si discusse molto sulla questione di quale fosse l'origine del raggio visuale, se l'occhio o l'oggetto; questa disputa...è alquanto inutile per noi”*. Ai fini della costruzione prospettica una retta unisce due punti (il principale e un punto nello spazio) e interseca il quadro, e poco importa sapere da dove ha origine quella retta.

Ma non tutta la trattatistica era dedicata esclusivamente alla scienza prospettica o al “ristagno” delle teorie antiche, copiate e trascritte ripetutamente. Nessun artista del Rinascimento si dedicò più vigorosamente allo studio dell'ottica che Leonardo da Vinci (1452-1519). Egli era uno scienziato (e un genio) straordinariamente pratico e un abile anatomista, ed è facile immaginare che gli studi anatomici collegati ad un forte senso empirico di un artista-ingegnere non potevano che trasformarsi in una nuova teoria della visione.

Sono molte le critiche mosse a Leonardo da Vinci nei suoi studi di ottica, spesso esagerate, ma sicuramente con un fondamento reale. È risaputo, anche leggendo gli esercizi di Leonardo che tentava di imparare il latino, che tale lingua gli fosse quasi completamente estranea e, stranamente, difficile da apprendere.

Questo naturalmente lo mette in una condizione del tutto nuova, perché non poteva autonomamente prendere coscienza dei testi antichi di ottica. Sembra strano che un genio come Leonardo potesse non conoscere Euclide, Tolomeo o Alhazen, anzi è del tutto da escludere, vista la loro notorietà tra gli artisti. È probabile che egli ne avesse

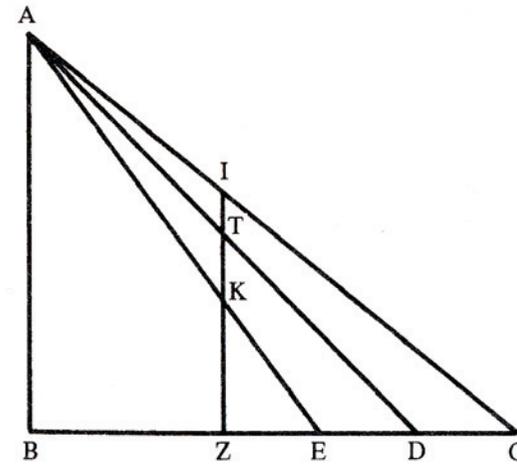


Fig. 13: Dimostrazione della proposizione undicesima di Euclide nel *De visu*, in cui si afferma che oggetti visti da raggi più alti appariranno più alti. (Elaborazione D. Lindberg).

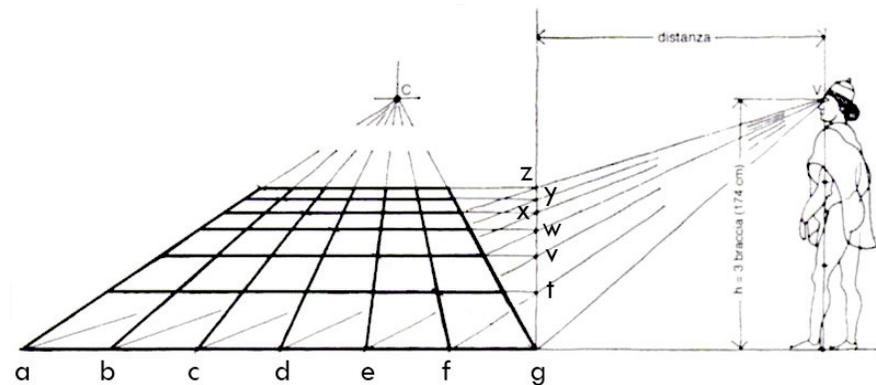


Fig. 14: Schema prospettico secondo Leon Battista Alberti.

Edgerton arguisce che la vista laterale della costruzione prospettica fatta dall'Alberti riprende la proposizione 11 di Euclide.

I due schemi messi a confronto rivelano una straordinaria somiglianza, probabilmente non proprio casuale, sebbene il fine dell'Alberti sia la costruzione prospettica, mentre quello di Euclide sia di spiegare il processo ottico, ma tutto ciò potrebbe far intuire che una certa coscienza geometrica della prospettiva l'avevano anche i teorizzatori classici.

conoscenza attraverso personaggi a lui vicini. Tuttavia è anche vero che la teoria visiva di Leonardo si discosta molto da quelle finora trattate, anch'essa con alcuni errori ma anche con alcune intuizioni geniali. Ma d'altra parte è lo stesso Leonardo da Vinci a scrivere in uno dei suoi appunti:

*“Certe persone arroganti potrebbero dire che a causa della mia deficienza nella cultura bibliografica non posso spiegare correttamente quello che desidero trattare. Non lo sanno costoro che i miei argomenti richiedono, per la loro spiegazione, esperienza piuttosto che parole di altri? E poiché l'esperienza è stata la signora di chiunque abbia scritto bene, io prendo lei come mia signora, e faccio ricorso a lei per ognuno dei miei punti [di discussione]”<sup>140</sup>.*

*“Se invece io non ho nessuna autorità per citare autori come essi fanno, è una cosa molto più grande ed più onorevole leggere attraverso la guida dell'esperienza, che è l'insegnante dei loro maestri. Loro vanno in giro con andatura impettita e pomposa, vestiti e adornati non con le loro proprie fatiche ma con quelle di altri, e non mi lasceranno mai in pace. E se disprezzano me che sono un inventore quale maggiore biasimo sarebbe da attribuire loro che non sono inventori ma solo esecutori e attori di lavori di altri?”<sup>141</sup>.*

Inoltre è lo stesso Leonardo spesso a citare nei suoi scritti alcuni suoi predecessori nel campo dell'ottica: cita l'intero proemio del *Perspectiva communis* di Pecham e spesso cita anche Vitellione<sup>142</sup>.

Si potrebbe supporre che grazie all'ausilio di qualche conoscitore della lingua latina, Leonardo avesse preso coscienza dei testi antichi. È anche vero che la sua formazione era empirica e autodidatta e che i suoi studi abbracciavano campi tra i più disparati: matematica, geografia, fisica, anatomia, acustica, pittura e molti altri. L'ottica è tra gli argomenti sempre presenti nei suoi scritti, egli continuò ad analizzarla per tutta la vita, probabilmente perché era strettamente legata alla pittura di cui Leonardo era maestro. In particolar modo gli studi sull'ottica di da Vinci si concretizzano in due manoscritti: il manoscritto C, *Sulla luce e sulle ombre*<sup>143</sup>, e il manoscritto D, *Sull'occhio*<sup>144</sup>.

La sua teoria della visione muove dalla teoria radiativa e dalla



Fig. 15: Studio anatomico di Leonardo da Vinci sull'occhio e i nervi ottici.

piramide radiante: in pratica Leonardo crede che gli oggetti emettono le loro specie in tutte le direzioni e secondo linee rette che propagano in un medium trasparente; queste specie convergono lungo delle linee dritte, cosicché si formano delle piramidi che hanno base nell'oggetto emittente e vertice in ogni punto del medium.

Da ogni oggetto dello spazio s'irradiano le specie nell'aria, la quale è capace di ricevere le immagini di infiniti oggetti. Queste specie sono tutte in ogni parte del tutto e tutte in ogni singola parte. E non interferiscono tra loro. Ma il concetto è sostanzialmente lo stesso espresso da Alhazen secoli prima e per dimostrare la sua tesi Leonardo introduce il fenomeno delle immagini create da un piccolo foro sulla parete: in altre parole la camera oscura, ma applicata a più immagini create contemporaneamente all'interno di essa dallo stesso foro o da più fori. La stessa sperimentazione è dettagliatamente descritta<sup>145</sup> da Alhazen nel suo *De Aspectibus*<sup>146</sup>.

Più oggetti esterni alla camera oscura hanno la loro corrispondente immagine interna alla camera oscura, attraverso un solo foro, senza che le specie di questi oggetti interferiscano nel passaggio, o possono anche avere più immagini se i fori sono due o più.

Leonardo da Vinci è spesso annoverato tra gli inventori della camera oscura, cosa non vera poiché è molto probabile che egli l'abbia ripresa dai testi mussulmani di ottica citati (o forse anche da Tolomeo?), primo fra tutti quello di Alhazen. Piuttosto, almeno alle attuali personali conoscenze, Leonardo è il primo ad averla disegnata chiaramente.

Egli aveva però solo una conoscenza materiale del fenomeno e non diede mai una spiegazione scientifica del perché questo avvenisse. Sapeva che ponendo un oggetto di fronte al foro ad una distanza pari alla profondità della camera oscura, all'interno di essa si formava una immagine dell'oggetto del tutto simile in dimensione e forma all'originale, ma capovolta. Sapeva anche che tale foro non poteva superare una determinata dimensione, oltre la quale il fenomeno non avveniva più. Nelle grandi aperture il fenomeno piuttosto era un altro: il fascio luminoso aveva la forma della sorgente luminosa poco prima dell'apertura, mentre aveva la forma dell'apertura subito dopo di essa<sup>147</sup>.

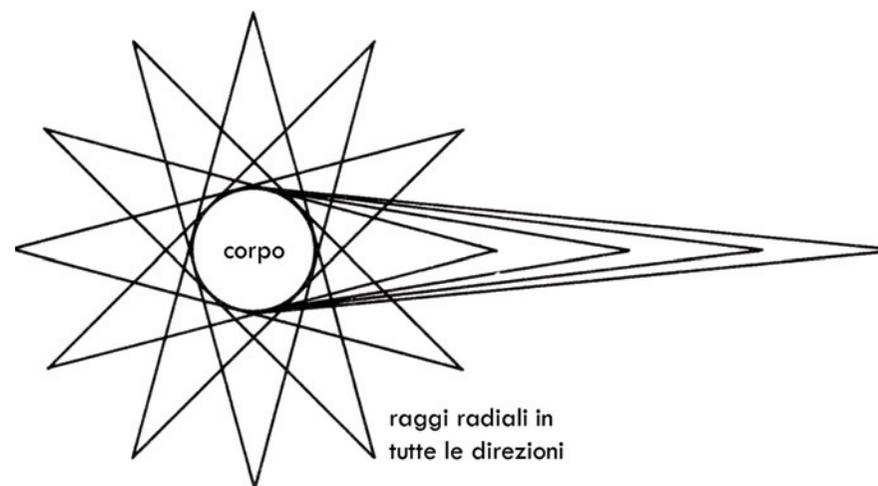


Fig. 16: Per Leonardo gli oggetti emettono le loro specie in tutte le direzioni e secondo linee rette che propagano in un medium trasparente; queste specie convergono lungo delle linee dritte, cosicché si formano delle piramidi che hanno base nell'oggetto emittente e vertice in ogni punto del medium. Disegno ripreso dall'originale del MS ital 2038, fol. 6v, Biblioteque Nationale de Paris. (Elaborazione D. Lindberg).

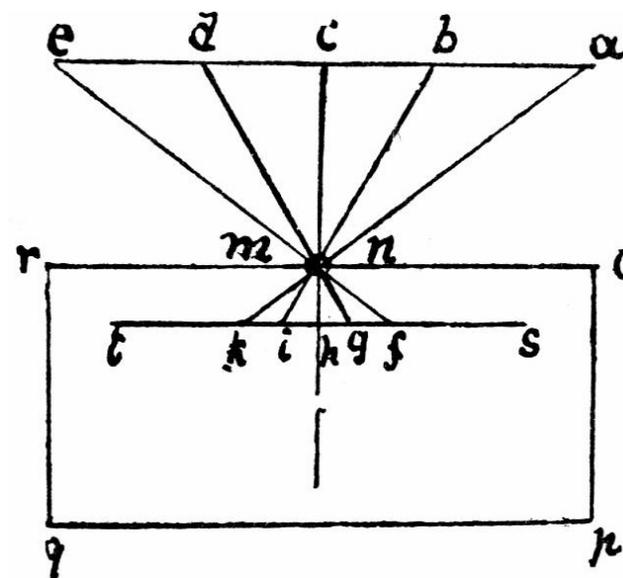


Fig. 17: Più oggetti esterni alla camera oscura hanno la loro corrispondente immagine interna alla camera oscura, attraverso un solo foro, senza che le specie di questi oggetti interferiscano nel passaggio, o possono anche avere più immagini se i fori sono due o più. Disegno fol. 19150v.

Oltre agli oggetti, Leonardo immagina che anche ogni punto di essi irradiasse la propria immagine<sup>148</sup>, infatti nel manoscritto D afferma che ogni punto della pupilla vede l'intero oggetto e che ogni punto dell'oggetto è visto dall'intera pupilla<sup>149</sup>. Converte le piramidi definite nella radiazione in piramidi visive, che hanno centro nell'occhio e base negli oggetti visibili. Egli dimostra la sua tesi ancora una volta con un esempio pratico: se ci collochiamo di fronte ad un'altra persona, di fronte al suo volto, potremo chiaramente vedere il nostro viso riflesso nel suo occhio; possiamo immaginare di far partire due rette dagli estremi delle nostre orecchie ed unirle con gli estremi delle orecchie dell'immagine creata sul bulbo oculare: tali rette sono convergenti e si incontreranno in un punto all'interno dell'occhio, poco al di là della pupilla<sup>150</sup>.

La visione inoltre, come molti avevano arguito, è più forte lungo l'asse della piramide e diventa più debole quando il raggio è più distante dall'asse. La dimostrazione può essere data utilizzando anche un'analogia meccanica: gli oggetti agiscono in maniera più forte e diretta sulla visione secondo l'asse della piramide, che è direttamente incidente sul nervo ottico, come quando un arciere vuole colpire qualcosa posto di fronte a lui con una carabina che ha un foro per la freccia e che disporrà la freccia appoggiata sul foro e in direzione retta verso l'oggetto mirato.

In molti passaggi degli scritti di Leonardo si può leggere la sua adesione alla teoria intromissiva, sebbene a volte (come nel Codice Atlantico scritto non dopo il 1491) egli scriva che esiste un certo tipo di radiazione visiva, deducendolo analizzando le proprietà visive di alcuni animali.

Tuttavia egli attacca, in maniera evidente, la teoria estromissiva nel manoscritto MS 2038<sup>151</sup>, steso intorno al 1492. In esso Leonardo riprende alcuni degli esempi presi sempre a prova dai teorizzatori della tesi intromissiva, come il problema della visione di cose molto lontane, come il sole o le stelle, che richiede un determinato tempo di percorrenza dei raggi visivi, o il fatto che suddetti raggi che percorrono lunghe distanze e che hanno una certa fluidità,

subiscano inevitabilmente gli effetti del vento. La naturale conclusione è che è inevitabile che l'occhio non emette raggi e la visione avviene grazie alle radiazioni emesse dal mondo esterno. dal momento che è impossibile che nello stesso istante in cui apriamo gli occhi riusciamo a percepire il nostro braccio e anche il sole.

In altri passaggi Leonardo tratta l'argomento intromissione ed estromissione ma, in sostanza, possiamo concludere che egli accetta indubbiamente la teoria intromissiva poiché esiste una suddivisione temporale dei suoi appunti in questione e la stragrande maggioranza dei riferimenti alla teoria intromissiva è nella seconda fase (nei manoscritti dopo circa il 1492).

Altro grande discussione riguarda la questione di come avviene la diffusione delle specie nell'aria. Esiste un passo in cui Leonardo paragona la radiazione dagli oggetti ad una radiazione per cerchi, come quella che si ottiene gettando un sasso nell'acqua. In realtà nulla del passaggio può far pensare che Leonardo già immaginasse una radiazione ondulatoria<sup>152</sup>. Il suo è semplicemente un paragone pratico, per far intendere il tipo di diffusione delle specie in ogni direzione e continuamente, come fece per l'esempio della freccia e come prima di lui faceva Alhazen trattando il problema della riflessione e della maggior intensità e forza dell'azione lungo la perpendicolare<sup>153</sup>.

In realtà la teoria visiva di Leonardo è del tutto simile a quella comunemente accettata al tempo, derivata da Alhazen e Bacon, in cui sono gli oggetti ad emettere specie o *similitudine* che si diffondono nell'aria in ogni direzione e l'aria a sua volta le affida al senso visivo nel momento del contatto<sup>154</sup>.

Per quello che invece concerne l'aspetto anatomico, ci si aspetterebbe da Leonardo una profonda conoscenza dell'occhio e delle sue parti e che le sue osservazioni avessero potuto mettere un punto sulla questione. Egli stesso scrive che molti trattatisti avevano da sempre dato una determinata configurazione dell'occhio e che egli, grazie alla sua esperienza, non era però in accordo con tali teorie<sup>155</sup>.

Ma purtroppo la concezione anatomica dell'occhio di Leonardo è esageratamente primitiva, forse più delle descrizioni fatte da molti, da

Galeno fino ai suoi giorni e forse Leonardo avrebbe potuto trarre molti più vantaggi se avesse posto più attenzione agli autori antichi<sup>156</sup>.

Secondo Leonardo, l'occhio è composto da due sfere concentriche: la più esterna è l'*albugineous*, mentre la più interna è il *vitreo* o sfera cristallina. La prima sfera è circondata dall'uvea eccetto che nella parte posteriore dove la pupilla si apre verso la cornea. Nella parte posteriore dell'occhio, in asse con la pupilla, c'è l'apertura verso il nervo ottico, sebbene in un'occasione solamente Leonardo parla della possibilità che il nervo ottico possa penetrare nell'*albugineous* e addirittura penetrare un po' nella sfera del cristallino<sup>157</sup>. Leonardo sostanzialmente, rispetto allo schema di Alhazen e di Bacon, confonde il vitreo con il cristallino, crede che l'*albugineous* circonda il cristallino interamente, posiziona il cristallino nel centro dell'occhio e, infine considera che la lente del cristallino sferica piuttosto che lenticolare.

Ma nonostante ciò, bisogna riconoscere che Leonardo affrontò una serie di temi del tutto nuovi che sicuramente diedero nuovi impulsi allo sviluppo della teoria intromissiva. Tra questi c'è sicuramente lo studio approfondito sulla dilatazione della pupilla. Egli presenta non solo un gran numero d'esempi in cui la pupilla varia la propria dimensione, ma intusce anche che tale fenomeno dipende dalla maggiore o minore presenza di luce.

*“Ho dedotto dall'esperienza che il bordo di colore nero o quasi nero che circonda la pupilla, serve per nessun altro proposito se non quello di aumentare o diminuire la dimensione della pupilla stessa: di aumentarla in dimensioni quando l'occhio sta guardando verso posti bui e di diminuirla quando sta guardando la luce o qualcosa di luminoso”*<sup>158</sup>.

Ma le conclusioni tratte dagli studi sulla variazione del diametro della pupilla sono piuttosto strane. In molti scritti composti nella sua vita, Leonardo insiste affermando che maggiore è la dimensione della pupilla, maggiore sarà l'apparenza dell'oggetto visto<sup>159</sup>. Se la pupilla è completamente aperta l'immagine sulla cornea di un oggetto posto di fronte ad essa avrà una dimensione maggiore rispetto a quando la pupilla è parzialmente chiusa<sup>160</sup>.

Questo scritto apre naturalmente il problema di come possano l'occhio

e il cervello giudicare la effettiva dimensione degli oggetti se il nostro giudizio dipende dalla dimensione della pupilla e di conseguenza da quanta luce c'è nella scena.

Inoltre Leonardo non fa cenno al problema che aveva fin da Alhazen preoccupato i prospettivisti e cioè del fatto che, se gli oggetti emettono raggi in tutte le direzioni e da ogni loro punto, cosa avviene quando questi raggiungono la cornea? Vengono percepiti solo i raggi perpendicolari o anche quelli obliqui concorrono alla realizzazione della vista grazie alla rifrazione nei differenti strati dell'occhio?

In realtà Leonardo, intuisce che qualcosa inevitabilmente deve avvenire all'interno dell'occhio e lo scrive nel momento in cui paragona l'occhio alla camera oscura. La sua intuizione è sicuramente di grande ausilio. Egli tenta, con un esperimento di far capire come il potere visivo faccia uso dello strumento occhio. Bisogna innanzitutto costruire due sfere concentriche piene d'acqua, la prima deve essere completamente chiusa mentre la seconda deve avere un foro nella parte inferiore, come se fosse la pupilla e deve essere tronca nella parte superiore per permettere l'inserimento della testa fino alle orecchie. Inserendo la testa in posizione, immersa nell'acqua, e guardando la piccola sfera si può vedere chiaramente come questo strumento invii le specie degli oggetti esterni all'occhio, nello stesso modo utilizzato in pratica dall'occhio verso il potere visivo<sup>161</sup>. Il meccanismo è lo stesso della camera oscura, quindi quello che l'occhio vede attraverso lo strumento e per rifrazione nell'acqua è un'immagine capovolta della realtà.

Egli fa riferimento più volte alla camera oscura per spiegare che l'occhio funziona allo stesso modo e che i raggi che provengono dagli oggetti devono per forza intersecarsi nella pupilla, proponendo pertanto una immagine del mondo invertita. Egli però non intuisce che l'occhio vede lo spazio sottosopra e in nessun passo considera la retina come uno schermo, identico per funzione alla parete interna della camera oscura su cui di proiettano le immagini e capace di trasmetterle al nervo ottico.

Per cui l'altra conclusione è che deve avvenire all'interno dell'occhio una ulteriore e necessaria intersezione che determini un secondo

ribaltamento delle immagini degli oggetti, che provengono in questo modo nel giusto verso al nervo ottico<sup>162</sup>.

Dove risiede pertanto il centro della visione? Per capire la teoria di Leonardo, bisogna innanzitutto anticipare che egli non credeva assolutamente nel potere visivo focalizzato in un unico punto e quindi rifiuta l'idea che questo poteva risiedere nel vertice della piramide visiva<sup>163</sup>: la pupilla dell'occhio possiede il potere in ogni sua parte e per tutta la sua dimensione<sup>164</sup>.

*“se poni la punta di uno spillo di media grandezza di fronte alla pupilla, il più vicino possibile, noterai che la percezione degli oggetti posti al di là dello spillo a qualsiasi distanza, non sarà impedita. Quello che io dico è interamente fondato sull'esperienza; per cui se tale potere visivo fosse ridotto ad un unico punto, ogni oggetto anche piccolissimo posto di fronte a questo potere occuperebbe la gran parte della visione<sup>165</sup>”.*

Leonardo demolisce, con un banale esperimento pratico, il fondamento della stragrande maggioranza delle teorie visive; tuttavia i prospettivisti avrebbero potuto replicare (e abbiamo già detto che Leonardo non ne parla nei suoi scritti) che lo spillo non ostruisce la vista, a causa dell'influenza anche di tutti gli altri raggi che giungono non perpendicolari sulla retina e che rifratti (in vari modi e secondo le diverse teorie) convergono nel centro della piramide visiva.

Però Leonardo è lontano dal considerare la pupilla come effettivo centro della visione. Egli individua invece due possibili ubicazioni del potere visivo, ovvero il cristallino e l'estremità del nervo ottico: tuttavia egli indica solo una volta il cristallino come tale localizzazione del potere e si può dedurre che egli considera l'estremità del nervo ottico come centro del potere visivo<sup>166</sup>, dal momento che ne parla in molte occasioni nei suoi scritti. Egli considera il cristallino semplicemente come una semplice lente interna all'occhio, con la funzione di rifrarre i raggi, rifiutando la teoria Galenica che individuava in esso, invece, il centro del potere visivo<sup>167</sup>.

Ma la maggiore preoccupazione di Leonardo è però quella di determinare il percorso dei raggi una volta entrati nell'occhio. Conoscendo

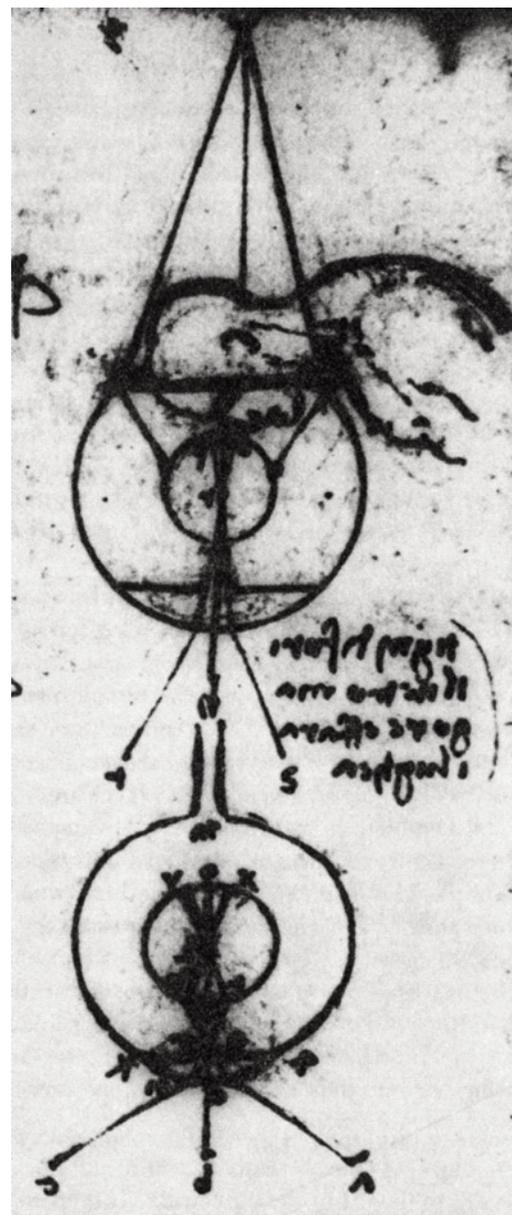


Fig. 18: L'occhio di Leonardo è come una camera oscura. Nella schema lo studio di un oggetto composto da due sfere di vetro che simulano la struttura dell'occhio. La più grande è riempita di acqua a simulare un umore. inserendo la faccia sulla parte superiore si può vedere l'andamento dei raggi luminosi, così come si propagano anche all'interno dell'occhio. MS D, fol. 3v, Bibliothèque de l'Institut de France.

bene qual è il meccanismo della camera oscura, Leonardo arguisce che, se i raggi si intersecano in un punto interno all'occhio, l'immagine risulta invertita. Leonardo non intuisce la reale funzione della retina, e piuttosto va alla ricerca, in molti schizzi del manoscritto D, *Sull'occhio*, di una soluzione geometrica che permetta una seconda intersezione dei raggi all'interno del bulbo oculare in modo da restituire l'immagine nel suo orientamento reale.

Nei vari schizzi, forza il meccanismo cercando tale intersezione nella pupilla, nel centro del cristallino e tra il cristallino e il nervo ottico<sup>168</sup>. Lo schizzo più completo per fare luce su tale problema è quello proposto nella figura a lato.

L'oggetto A, invia le sue specie attraverso il raggi AR, che incontra la cornea EF in R, da qui entra nella pupilla e si interseca con gli altri raggi in O, e raggiunge il cristallino in V penetrando la sfera da V a Q. Da qui avviene la deviazione che lo fa intersecare di nuovo con gli altri raggi in N e termina alla estremità del nervo ottico KHL in K e da qui deviato per raggiungere il senso visivo<sup>169</sup>.

### 01.7.1 Conclusioni

In conclusione possiamo dire che la teoria di Leonardo è differente e autonoma rispetto al resto del panorama rinascimentale e posteriore. In essa tuttavia si può riconoscere molto delle teorie antiche e questo fa pensare che nonostante tutto egli avesse conoscenza dei testi di ottica. È vero comunque che la sua teoria è spesso confusa e mal interpretante delle teorie del passato, il che evidenzia una probabile non comprensione dei testi e delle teoria a causa della lingua. Leonardo ha poca dimestichezza con la rifrazione e riflessione nell'occhio, e non si preoccupa per nulla del problema della moltiplicazione dei raggi visivi che provengono all'occhio e irradiati dagli oggetti, i quali non essendo incidenti in modo ortogonale rispetto alla cornea, vengono rifratti ma concorrono lo stesso alla visione. Aveva un conoscenza anatomica dell'occhio differente e arretrata rispetto a quella dei prospettivisti,

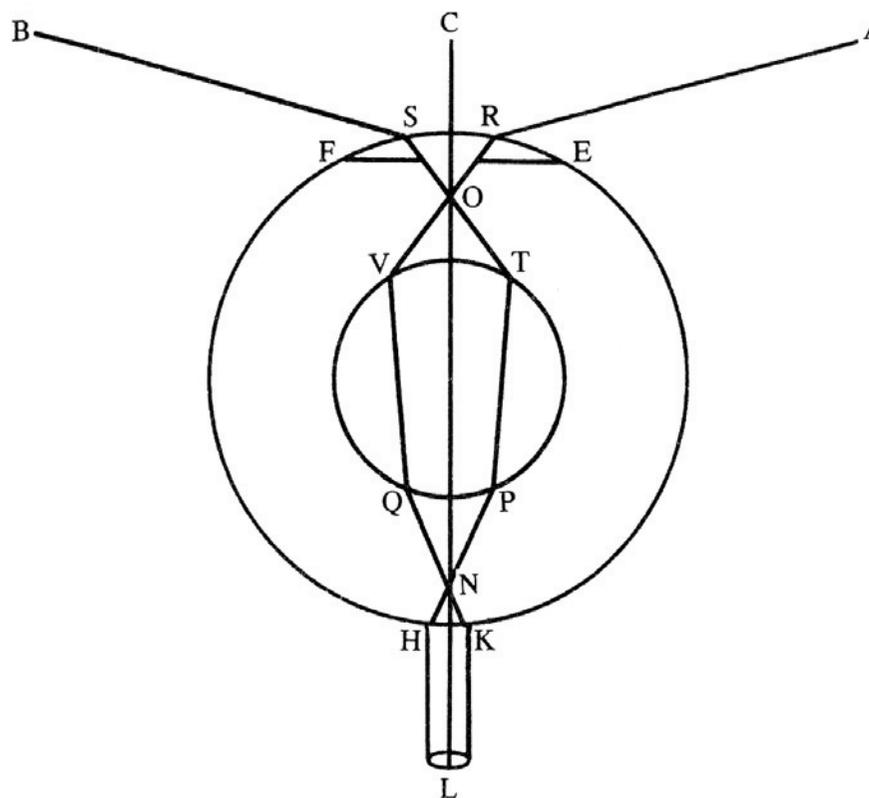


Fig. 19: Conoscendo bene qual è il meccanismo della camera oscura, Leonardo arguisce che, se i raggi si intersecano in un punto interno all'occhio, l'immagine risulta invertita. Leonardo non intuisce la reale funzione della retina, e piuttosto va alla ricerca in molti schizzi del manoscritto D, *Sull'occhio*, di una soluzione geometrica che permette una seconda intersezione dei raggi all'interno del bulbo oculare in modo da restituire l'immagine nel suo orientamento reale. La prima intersezione è in O, e la seconda in N. (Elaborazione D. Lindberg).

probabilmente forzata a causa della sua incisiva ricerca del secondo punto di intersezione dei raggi visivi nell'occhio. Abbiamo anche visto che aveva una particolare concezione della relazione tra dimensione della pupilla (variabile) e dimensione dell'oggetto visibile. È probabile pertanto che egli, sebbene conoscesse i testi antichi, medioevali e dei prospettivisti, non comprendeva a pieno le differenti teorie.

Nonostante queste lacune bisogna, in ogni modo, riconoscere a Leonardo uno straordinario genio e senso pratico, nonché un'attenta osservazione della realtà e dei suoi meccanismi. Egli propone una vasta gamma di sperimentazioni, dalle più banali alle più complesse, per spiegare il motivo della variabilità dimensionale della pupilla o per dimostrare che tutta la pupilla è sensibile ai raggi. Inoltre la sua comparazione tra occhio e camera oscura avrebbe di sicuro influenzato i successori per la definitiva cognizione della funzione della retina. Probabilmente le intuizioni di Leonardo avrebbero avuto un esito più decisivo, se egli avesse avuto piena coscienza delle teorie antiche e di secoli di disquisizioni a riguardo. Forse non avremmo dovuto aspettare altri due secoli (circa) per una teoria della visione completa e razionale.

## 01.8. L'aspetto anatomico nella teoria della visione

Abbiamo visto spesso che anatomia dell'occhio, fisiologia e teorie visive erano oggetti delle disquisizioni dei diversi trattatisti fin dall'antichità, all'interno di una ricerca più ampia che tentava di indagare tutti gli aspetti correlati ai meccanismi visivi.

A parte Leonardo da Vinci, dobbiamo però notare che la maggior parte degli ottici del Rinascimento focalizzarono l'attenzione più sull'aspetto anatomico, cercando finalmente di determinare la vera forma delle diverse parti dell'occhio. La loro ricerca però poco si allontanò addirittura dalla fisionomia data da Galeno molti secoli prima.

Tra l'altro le dissertazioni sulla materia sono molteplici e disparate, ma solo alcune di esse ebbero effettivamente un contributo alla configurazione anatomica dell'occhio.

Primo tra tutti dobbiamo ricordare il contributo di Mondino dei Luzzi (ca. 1270 – 1326), il quale presentò nuovamente una propria, sebbene solo letteraria, descrizione dell'occhio nelle sue parti.

Nella sua *Anatomia*<sup>170</sup>, egli riprende sostanzialmente tutte le precedenti teorie in materia, da Galeno ad Aristotele, da Avicenna a Averroes. Il suo schema prevede ancora sette strati e tre umori, del tutto simili alla presentazione fatta da Hunain ibn Ishaq. Il cristallino ha forma leggermente appiattita nella parte anteriore e si trova più vicino alla cornea sempre però all'interno del vitreo. Il potere visivo per Mondino risiede proprio nel cristallino, per questo l'uvea si apre proprio di fronte ad esso, in modo da permettere l'ingresso delle specie e poi la trasmissione ai due nervi ottici ed infine nella connessione di questi ultimi, le specie provenienti distinte dai due occhi tornano ad essere una cosa sola. Lo schema introdotto da Mondino intorno al 1316 non cambiò molto nei due secoli successivi.

Gabriele Zerbi (1468 – 1505), insegnante alla facoltà di Medicina dell'Università di Bologna, pubblica nel suo *Liber anathomie corporis humani et singulorum membrorum illius*<sup>171</sup> una lunga e dettagliata descrizione dell'occhio che conservava però le caratteristiche già descritte finora. Il suo contributo fu piuttosto il grande sforzo per

riuscire a ricostruire una storia di tutti gli interventi letterari dei trattatisti sulla questione occhio e visione, dall'antichità al medioevo.

Un altro contributo di Zerbi fu quello di aggiungere dettagli al processo di trasmissione retinica delle impressioni visive. Tali impressioni non passano dal cristallino alla retina attraverso una trasmissione ottica per il vitreo, ma la retina è a contatto diretto con il cristallino nella sua parte periferica e le impressioni passano quindi direttamente alla retina.

Il primo maggiore contributo fu dato da Andreas Vesalius. Nel suo testo *De humani corporis fabrica*<sup>172</sup> Vesalius presenta una descrizione anatomica dell'occhio più accurata e soprattutto di prima mano ed empirica rispetto ai suoi predecessori che avevano recuperato comunque tesi antiche. Egli descrive in modo più accurato il corpo ciliare, e afferma che il nervo ottico non è cavo come finora supposto, ma è solido.

Colloca tuttavia il cristallino ancora al centro dell'occhio e connesso al suo equatore dispone il corpo ciliare, come una superficie piatta che separa in due la sfera oculare e dividendo l'umore acqueo e vitreo. È scettico nel ritenere, come Galeno, che sia il cristallino il principale organo sensitivo dell'occhio e anzi fa presente che molti considerano invece che tale grado appartiene alla retina. Vesalius tratta il cristallino semplicemente come una lente degli occhiali<sup>173</sup>, e questo influenzerà sicuramente Felix Platter nel suo lavoro più tardo.

Altro contributo importante fu dato dal successore in cattedra di Vesalius, cioè Realdo Colombo, il quale critica il suo professore nell'aver disposto il cristallino al centro dell'occhio, mentre è spostato più verso la parte frontale, sebbene quasi nel centro. Inoltre asserisce che, contrariamente a quello affermato da Vesalius, la superficie anteriore del cristallino è più appiattita rispetto alla posteriore<sup>174</sup>.

Ultimo e maggiore apporto alla scienza anatomica, fu dato da Felix Platter (1536 – 1614) che nel suo testo, *De corporis humani structura et usu...libri III*<sup>175</sup>, pubblicato nel 1583, corregge tutti gli errori commessi dai suoi predecessori nel disegnare uno schema anatomico dell'occhio.

Nel testo egli dà una descrizione del nervo ottico e della retina.

*“L'organo primario della vista, chiamato nervo ottico, si espande quando entra nell'occhio per la emisfera retiforme e vuota. Egli riceve e giudica le specie e i colori degli oggetti esterni, che, insieme con la luminosità, penetrano nell'occhio attraverso la pupilla e si manifestano ad esso attraverso la lente (cristallino), come descriverò”*<sup>176</sup>.

Il nervo ottico è il principale organo visivo, insieme con la sua dilatazione nell'occhio, ovvero la retina, mentre il cristallino: *“è la lente del nervo ottico; posto tra il nervo ottico e la pupilla, esso raccoglie le specie che entrano nell'occhio in forma di raggi, le propaga verso l'intero nervo retiforme, le presenta ingrandite come fa una lente, cosicché il nervo riesce più facilmente a percepirle”*<sup>177</sup>.

Il cristallino è solo una lente attraverso cui il nervo e la retina guardano al mondo esterno, e la retina è senza dubbio il principale organo della visione.

Per questo Platter è spesso considerato come l'iniziatore della teoria retinica. Ma tali giudizi sono piuttosto affrettati, dal momento che già Leonardo e poi Vesalius, avevano intuito questa possibilità.

Tuttavia Platter non chiarisce come la sua soluzione retinica possa risolvere il problema della moltiplicazione delle specie, né se e come avvenga l'inversione dell'immagine nell'occhio, come Leonardo aveva più volte tentato di dimostrare.

In poche parole, la teoria di Platter non si estende agli aspetti geometrici della teoria visiva.

### 01.8.1 La *perspectiva* nel XVI sec.: Francesco Maurolico e Giovanni Battista della Porta

Nel corso del secolo XVI, grazie anche allo sviluppo della stampa, iniziò la pubblicazione, di prima mano o ristampa, di molti dei testi di ottica citati finora. Questo naturalmente permise a molti più scienziati di poter aver accesso alle conoscenze del passato, e alle dottrine dei prospettivisti, soprattutto all'interno degli ambienti universitari, le cui biblioteche possedevano necessariamente teli testi.

I maggiori esponenti di questo periodo furono Francesco Maurolico (1494 – 1575) e Giovanni Battista della Porta (1535 – 1515).

Lo scritto più importante di Maurolico, *Photismi de lumine et umbra*<sup>178</sup>, fu pubblicato postumo, nel 1611. La questione è di particolare rilevanza perché dimostra che gli studi fatti in seguito da Kepler non furono influenzati dall'opera dell'italiano.

La teoria di Maurolico muove i passi dalle stesse basi dei prospettivisti sulla geometria dei raggi luminosi, la loro propagazione da ogni punto in tutte le direzioni. Da queste premesse egli inizia ad analizzare il fenomeno della luce che passa attraverso delle aperture, descrivendo, per la prima volta nell'occidente, una teoria geometrica adeguata e coerente della camera oscura<sup>179</sup>.

In particolar modo è di rilevante importanza la dimostrazione fatta per il teorema 68. Avendo un oggetto illuminato o luminoso, posto in AB di fronte ad una piccola apertura CD, i raggi che si propagano dagli estremi del corpo e toccano gli apici dell'apertura, sono AH, AE, BF e BK. Le piramidi radiative da C e da D sono FCH e KDE le quali hanno come base la stessa forma del corpo luminoso AB ma naturalmente invertita. Poiché gli angoli FCH e KDE sono più grandi degli angoli FBK e HAE, estendendo i raggi CF, CH, DK, e DE, le basi FH e KE cresceranno in maniera più rapida rispetto a FK e HE. Aumentando la distanza tra il foro e la parete, le immagini FH e KE diventeranno grandi abbastanza da poter considerare trascurabili FK e HE comparandole con le precedenti. Questo significa che FH e KE rappresentano entrambe l'immagine di AB, mentre FK e HE rappresentano la separazione delle due immagini di AB nella camera oscura dipendente dalla grandezza del foro CD. Quando il rapporto di FH e KE con FK e HE cresce, aumentando l'estensione dei raggi, FH e HE tenderanno a fondersi con le altre due basi maggiori, e l'immagine tenderà sempre più a conformarsi ad AB.

Maurolico purtroppo non applica l'idea della camera oscura anche al teoria visiva e al funzionamento dell'occhio. Egli accetta in sostanza le dottrine di Witelo con aggiunte di Pecham e Bacon, con la particolarità però di aver riconosciuto che l'umore cristallino è inserito tra due

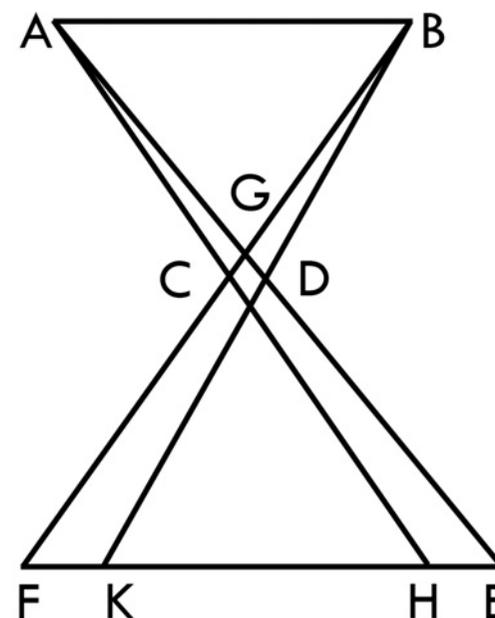


Fig. 20: Teorema 68 del *Photismi de lumine et umbra* di Maurolico. Il testo originale cita:

*Sit quoque lucidum quaecumque AB, et foramen qualicumque formae CD. Et productis in ipsum FE planum ipsis ADE, et BCF radiis sese in G signo secantibus, item ipsis ACH et BDK, intelligantur FCH et KDE luminosae pyramides vertices habentes C et D, bases vero FH et KE. Quo fiet ut si ipsi AB parallelum ponatur FE planum, utraque ipsarum FH et KE basium ipsi AB lucido similis existat propter pyramidum similitudinem. Quoniam igitur ipsi FCH et KDE anguli maiores sunt angulis FBK et HAE, ideo fit ut productis radiis, ipsa FH et KE basium spatia non proportionaliter crescant cum ipsis FK et HE spatiis. Nam quo ulterius radii producti fuerint, eo maior fiet ipsorum FH et KE spatiorum proportio ad ipsa FK et HE spatia. [C:14v] Poterunt ergo eo usque produci radii, ut ipsa FK et HE spatia respectu ipsorum FH et KE spatiorum insensibilia fiant. Sed ipsa FK et HE spatia distantiae sunt pyramidarum ipsarum FH et KE basium, quae ipsius AB lucidi formae sunt. Ergo per praemissam, quo magis producti fuerint radii, eo magis ipsae FH et KE bases ad unius ipsarum, ideoque ad ipsius AB lucidi similitudinem accedent, quandoquidem ipsae FH et KE figurae similiter positae sunt. Et per praedictae corollarium poterunt eo usque produci radii, ut ipsarum FH et KE figurarum una esse putetur. (Rielaborazione dell'autore).*

superfici convesse capaci di ricevere le specie e indirizzarle verso il senso comune.

Questa sua descrizione è legata all'analisi geometrica eseguita sul passaggio delle radiazioni su un sistema di lenti: conclude che due lenti concave producono la divergenza dei raggi, mentre due lenti convesse, come quelle del cristallino, producono convergenza dei raggi<sup>180</sup>.

Ne deriva necessariamente che anche i raggi che vengono rifratti trasmettono informazioni e non possono essere scartati, come avevano fatto i teorici nel passato, considerando necessari alla visione solamente i raggi ortogonali. La questione doveva indubbiamente essere scartata anche per un problema geometrico: se i raggi radianti accettabili erano solo quelli perpendicolari alla superficie anteriore della pupilla, come affermavano Alhazen, Bacon o Pecham, dovevano rimanere perpendicolari anche nel loro attraversamento alla superficie posteriore. Questo significava che la forma della pupilla era sferica e che i raggi perpendicolari occupavano i diametri, incrociandosi reciprocamente nel centro della sfera.

Ma questa teoria era contraddittoria con le ipotesi, sia a causa dell'intersezione dei raggi prima di arrivare al senso comune, generando una immagine invertita e sia perché la forma sferica era incongruente con i fatti (forma lenticolare).

Secondo Maurolico, pertanto, i raggi perpendicolari sono sì quelli che producono una visione primaria, ma anche quelli non perpendicolari, rifratti rispetto all'asse, sia entrando che uscendo dal cristallino, contribuiscono alla visione. I raggi che escono dal cristallino convergono verso un punto situato nel nervo ottico, quindi portano ad esso tutte le informazioni dell'oggetto, e da lì verso il cervello.

Questa teoria era ampliata anche per verificare cosa succede nel caso della miopia e ipermetropia in cui le lenti degli occhiali servivano per correggere uno a l'altro problema. La miopia dipendeva da una curvatura eccessiva della convessità del cristallino, mentre l'ipermetropia da una curvatura insufficiente. Ciò provocava naturalmente una convergenza differente rispetto alla normalità e richiede ulteriori lenti di

calibrazione della rifrazione dei raggi: la miopia richiedeva una lente concava, per contro l'ipermetropia una lente convessa.

Maurolico può essere considerato un precursore delle teorie di Kepler, sebbene alcune critiche vanno fatte alla teoria dell'italiano: innanzitutto, il non aver intuito la relazione tra occhio e camera oscura e lo sbaglio conseguente di ritenere il cristallino ancora uno strumento percettivo.

Inoltre Maurolico non si preoccupò del problema della moltiplicazione delle specie, dovuta alla rifrazione. I suoi studi si sono limitati a studiare due soli raggi simmetrici rispetto all'asse provenienti da un singolo punto. Di cosa potesse avvenire all'infinità di raggi che in ogni caso raggiungevano la pupilla egli non si preoccupa, o almeno non se ne preoccupa contemporaneamente: i raggi presi a due a due convergono nello stesso punto, ma ogni coppia di raggi ha una convergenza differente o è sempre la stessa? Maurolico ha semplicemente ignorato il problema, perché non tutte le coppie di raggi devono necessariamente essere simmetriche rispetto all'asse, come di conseguenza non sono simmetriche le rifrazioni. Pertanto due raggi non simmetrici, che entrano nell'occhio devono in ogni modo convergere alla fine in un unico punto, sebbene seguendo percorsi di rifrazione diversi.

Il secondo personaggio citato è Giovanni Battista della Porta, autore della *De refractione optices parte libri novem*<sup>181</sup>, apparsa nel 1593. In questo testo della Porta cerca di analizzare tutte le caratteristiche del fenomeno della rifrazione: nel primo tratta la rifrazione in generale, nel secondo la rifrazione attraverso delle sfere di vetro, dal terzo a settimo si occupa degli aspetti della visione, e nell'ottavo e il nono invece parla degli occhiali e dei fenomeni rifrattivi meteorologici.

Dal punto di vista geometrico, la teoria di della Porta poco si discosta dalle altre teorie intromissive, mentre dal punto di vista anatomico pur seguendo lo schema di Vesalius, spostata, come aveva anche fatto Platter, il cristallino in una posizione più frontale, in modo da essere concentrico rispetto alla cornea, permettendo ai raggi della piramide visiva di entrare evitando la rifrazione.

Anche lui chiaramente non si preoccupa, o trascura, i raggi che invece subiscono rifrazione.

La cosa sembra essere ancora più grave se si considera che fu della Porta a suggerire, nel suo *Magia naturalis*<sup>182</sup>, l'utilizzo della camera oscura con l'inserimento di una lente nel foro. Questo procedimento permetteva un'accuratezza maggiore. Egli paragona la camera oscura all'occhio, ma afferma che, come l'immagine si forma nella parete opposta al foro della camera oscura, così nell'occhio l'immagine si forma nel cristallino, considerando perciò questo ultimo come il principale organo della vista.

Dobbiamo ricordare che sia il *Photismi* di Maurolico sia il *De refractione* di della Porta vennero pubblicati più tardi rispetto alla stesura e che Kepler di conseguenza non conosceva gli studi eseguiti sulla camera oscura dai due scienziati mentre eseguiva le sue sperimentazioni.

Di conseguenza Kepler poteva avere accesso solo ai testi dei prospettivisti, compresa la ristampa di Alhazen e di Witelo di Risnero del 1572.

## 01.9. Johannes Kepler

L'interesse di Johannes Kepler (1571 – 1630), che in ogni modo era un matematico (in pratica un moderno fisico), per l'ottica cominciò quando si rese conto che tale scienza era necessaria per lo studio della geografia astronomica. Intorno al 1600 insieme al suo professore Michael Maestlin, ancora da studente, realizza che il diametro delle luna, osservandola attraverso una camera oscura, è minore osservato durante una eclissi di sole, sebbene la distanza sia la stessa. Kepler conclude che la soluzione dell'enigma doveva essere ricercata nella scienza ottica.

In tale ricerca Kepler esegue una sperimentazione sulle aperture e sulla propagazione della luce attraverso di esse, che formava su una superficie posta di fronte l'immagine luminosa della forma del foro. Probabilmente ebbe l'ispirazione analizzando il testo di Albrecht Dürer, *Underweysung der Messung*, pubblicato a Norimberga nel 1525. Kepler capisce la geometria della radiazione e spiega in maniera chiara la teoria della radiazione attraverso delle bucaature. Egli scrisse più tardi, nel *Paralipomena*<sup>183</sup>, riferendosi ad un grafico di Pecham e alla difficoltà nell'interpretarlo, che aveva provveduto a creare un modello plastico. Sistemato un libro ad una certa altezza a simulare una sorgente luminosa, e sotto di essa un tavolo con una bucaatura poligonale. Utilizzando un filo e unendo, di volta in volta, lo spigolo del libro con gli spigoli dell'apertura poligonale, Kepler ottiene a terra una serie di figure ognuna avente la stessa forma dell'apertura. Addirittura escogita un meccanismo di fili tutti collegati, in modo da ottenere automaticamente la forma della bucaatura spostando i punti di proiezione del libro. Sostanzialmente l'esperimento, pur molto più complesso e spiegato nelle tre dimensioni, si discostava poco dall'esperimento eseguito da Maurolico circa otto anni prima. Ma l'opera di Maurolico fu pubblicata postuma e Kepler fu il primo a pubblicare tali sperimentazioni e soluzioni, raggiunte in maniera autonoma.

Tutti i suoi esperimenti e le conclusioni tratte furono pubblicati nel 1604 nel suo testo *Ad Vitellionem paralipomena*, in cui Kepler

attacca la teoria visiva dei prospettivisti, perché basata su fondamenti sbagliati. La critica è mossa principalmente verso Witelo, com'è chiaro anche dal titolo dell'opera.

Le critiche erano innanzitutto di carattere anatomico. I prospettivisti, infatti, credevano il cristallino essere il principale strumento della visione, perché credevano che esso fosse direttamente collegato, per mezzo dell'*arana*, alla retina e per questo anche al nervo ottico. Nulla di più sbagliato. Il cristallino, infatti, è distaccato dalla retina e dal nervo ottico, ed è invece attaccato all'uvea, come ci ha mostrato Platter<sup>184</sup>.

Un altro aspetto errato, è la forma del cristallino. Secondo Kepler, Witelo considerava la superficie posteriore del cristallino come piana evitando così che i raggi potessero incontrarsi al centro dell'occhio e restituire un'immagine invertita dopo l'intersezione<sup>185</sup>.

Ma la superficie posteriore del cristallino invece sappiamo avere una certa curvatura e che l'inversione dell'immagine è inevitabile. Lo stesso Kepler ammette di aver faticato molto, come prima di lui Leonardo, per capire come questo fenomeno poteva non avvenire, e sforzarsi di individuare il modo affinché i raggi non s'incontrassero all'interno dell'occhio, cercando una seconda intersezione che invertiva ulteriormente l'immagine riportandola alle sue coordinate originali.

Egli non vede la via di uscita a questo enigma, fino a quando non trovo la soluzione, nelle proposizioni 11 e 12<sup>186</sup>.

Intuisce che un'immagine invertita, ha in ogni caso un problema, in pratica lo stesso dello specchio. I raggi che penetravano nell'occhio, dovevano incontrarsi nel centro e produrre un'immagine sottosopra, invertita e ribaltata<sup>187</sup>.

Un'altra critica mossa a Witelo e ai prospettivisti, di carattere matematico e fisico, riguarda il meccanismo della visione congetturato dei suoi predecessori, che prevede inizialmente l'utilità ai fini della vista dei soli raggi perpendicolari alla cornea. In seguito, per primo lo fa Alhazen, ci si contraddice, ammettendo anche i raggi che cadono obliqui, perché ci si rende conto che l'occhio percepisce in realtà più che il solo campo visivo dovuto alla piramide di raggi ortogonali<sup>188</sup>.

Ma non è data una spiegazione sul come i raggi obliqui penetrano l'occhio e sul perché la visione non sia in questo modo completamente disturbata. I raggi obliqui s'intersecano con quelli ortogonali, ma provengono da un unico punto, il che provoca la formazione di un'infinità d'immagini dello stesso punto. Egli scrive: *“lo rifiuto Witelo a causa di questa confusione di raggi. Poiché, come lui dice, anche la radiazione obliqua è percepita, allora i raggi obliqui intersecano quelli perpendicolari [all'interno dell'occhio]; perciò lo stesso punto [dell'occhio] riceve sia i raggi obliqui che quelli ortogonali; di conseguenza due cose verranno giudicate posizionate nello stesso punto”*<sup>189</sup>.

Ma la questione maggiormente imbarazzante per la teoria intromissiva dei prospettivisti, riguardava l'aver escluso i raggi obliqui senza giustificazione. Kepler afferma che l'esclusione di tali raggi sarebbe comprensibile solo nel caso in cui tra raggi contigui ci sia una repentina e violenta caduta del potere illuminante. Questo è del tutto insensato. La giustificazione data dai prospettivisti era di natura fisica, affermando che l'azione lungo una perpendicolare è più intensa, il che poteva anche avere una base di verità, ma il problema era non tanto l'aver considerato solo i raggi ortogonali bensì il non aver considerato quelli obliqui anche subito adiacenti alla perpendicolare.

Se la forte luce agisce per una certa intensità lungo la perpendicolare, il raggio subito contiguo avrà un'intensità minore a livello infinitesimo. Il che porta a concludere che i raggi obliqui non possono essere scartati dal processo della visione.

Kepler aveva colpito e distrutto le fondamenta della teoria intromissiva sviluppatasi dal medioevo al suo tempo, essa non aveva più ragione di esistere. Serviva una nuova teoria e soprattutto un nuovo meccanismo della visione che teneva conto di tutti gli aspetti citati. Kepler intuisce che prima di intraprendere la strada della teorizzazione di una dottrina visiva, è necessario capire la struttura dell'occhio da un punto di vista anatomico. Naturalmente non è un medico, né ha la possibilità di poter eseguire degli studi diretti. Per questo motivo e per umiltà nei confronti di chi la scienza medica la praticava e conosceva decisamente meglio di lui, egli decide di affidarsi agli schemi di due

anatomisti. Innanzitutto il già citato Felix Platter con il suo testo *De corporis humani structura et usu* e il testo *Anatomia Pragensis* del suo amico Johannes Jessen.

Secondo i due testi, il cervello è formato da due strati, il primo più esterno è più spesso ed è continuo con la parte esterna del nervo ottico e lo strato esterno dell'occhio; il secondo strato più interno è più sottile ed è continuo con lo strato medio dell'occhio. Infine la sostanza cerebrale da vita al nervo ottico che diventa lo strato più interno dell'occhio, cioè la retina<sup>190</sup>.

La struttura dell'occhio è più o meno simile a quella descritta per gli altri autori. La retina è descritta come una specie d'imbuto, con la testa emisferica, che fuoriesce dal nervo ottico.

Kepler fornisce successivi dettagli sulla conformazione della retina. Essa non può essere né nera, né di un bianco brillante, perché altrimenti altererebbe i colori; invece ha un colore bianco rossastro. Deve essere emisferica in modo proporzionato alle immagini formate su di essa. La differenza maggiore tra i due anatomisti è che Jessen colloca, come Witelo, il cristallino in corrispondenza dell'equatore dell'occhio. Kepler però è più in accordo con lo schema di Platter, il quale sposta l'umore in avanti, collegato attraverso il sistema ciliare, alla corioide e all'uvea. L'umore vitreo, in questo schema, occupa la parte posteriore dell'occhio, ossia la maggiore; nella parte anteriore risiede invece l'umore acqueo, altamente trasparente, e anche il più inconsistente dei tre umori. Tra questi due, infine, c'è il cristallino, molto denso e contenuto dalla membrana aracnoide. Questo ultimo umore possiede due superfici differenti: quella esterna è una porzione di uno sferoide lenticolare, mentre quella interna è un conoide iperbolico (superficie di rotazione di una iperbole intorno al proprio asse).

Kepler non introduce nulla di nuovo all'anatomia dell'occhio, rimanendo ancora irrisolti alcuni problemi, che tuttavia non poteva risolvere di certo un fisico.

Tra i principali problemi, ricordiamo che il nervo ottico non è in asse con la pupilla, ma è disposto posizionato verso il basso, cioè verso il setto nasale. Nessuno si era chiesto ancora cosa potesse avvenire nel

punto cieco corrispondente al nervo ottico, in cui l'assenza della retina non produceva immagine. Anche gli altri strati dell'occhio erano poco conosciuti e le funzioni a volte erano sconosciute, come quella dei muscoli oculari.

Ma tutti questi difetti nella scienza anatomica non influenzarono il risultato finale di Kepler nello studio geometrico del percorso dei raggi luminosi all'interno dell'occhio.

La teoria visiva di Kepler ha lo stesso fondamento delle vecchie teorie intrinseche, secondo cui da ogni punto di un oggetto sono emessi raggi luminosi che si propagano in modo rettilineo nello spazio. Secondo questa premessa, serviva necessariamente trovare una corrispondenza biunivoca tra il punto nello spazio e il punto nella retina, in modo da non avere immagini confuse. La regola trovata dai prospettivisti consisteva nel prendere in esame solamente i raggi ortogonali alla cornea, ma abbiamo visto come Kepler rifiuta tale soluzione. Nella seconda proposizione del *Paralipomena* egli afferma che i raggi che provengono sulla cornea vengono rifratti secondo la perpendicolare alla superficie, a causa della maggiore densità rispetto all'aria. Di conseguenza i raggi che prima divergevano nello spazio, a contatto con la cornea modificano la loro direzione convergendo verso un centro, in modo tale che anche i raggi rifratti più esterni riescono a lambire il bordo della pupilla. Continuando a scendere dentro l'occhio, e attraversata la pupilla, essi riescono ad illuminare una porzione della superficie del cristallino più piccola rispetto alla pupilla<sup>191</sup>.

Kepler immagina una infinità di coni che hanno vertici tutti diversi, ma una stessa ed unica base comune a tutti i coni, considerando che tali flussi non interagiscono tra loro.

La grande novità di Kepler consiste nell'introduzione dell'immagine retinica e della sua formazione.

Prendendo in considerazione tutti i raggi che giungono sulla cornea, il fisico deve gestire un numero elevato di raggi e soprattutto di rifrazioni, in pratica deve avere dimestichezza con i fenomeni di rifrazione attraverso delle lenti. Finora però, a parte i testi di Maurolico e di della Porta, che Kepler non poteva aver letto né aver avuto acceso in

qualche modo, non esistevano trattazioni sulle lenti. Ma è vero che il fisico poteva far conto su una trattatistica amplissima, primo fra tutti il *De aspectibus* di Alhazen, in cui i problemi di rifrazione attraverso corpi trasparenti erano illustrati in maniera esaustiva e dettagliata.

Per le sue sperimentazioni Kepler prende in esame la rifrazione attraverso delle sfere trasparenti<sup>192</sup> che in un certo senso simulano il bulbo oculare. L'immagine del punto A, osservata da B e C attraverso la sfera EFHK si troverà in D, dove si incontrano i raggi AE, AI e AG<sup>193</sup>. Kepler intuisce l'aberrazione che avviene attraverso la sfera: i raggi che l'attraversano vicino al centro, intersecano l'asse della sfera più lontano rispetto ai raggi che l'attraversano in periferia (Fig. 21). Egli prende in considerazione raggi paralleli provenienti da una sorgente a distanza infinita. Il raggio KB che passa vicino all'asse DAF, viene rifratto in B e in C, e interseca l'asse in F. invece il raggio LG che passa per la periferia della sfera, viene rifratto in G e poi in H, ed interseca l'asse in I<sup>194</sup> (Fig. 22). Realizzando lo stesso percorso per una serie di raggi paralleli, ed estendendo i raggi dopo esser usciti dalla sfera, la rete creata formerà un'iperbole<sup>195</sup>(Fig. 23).

Kepler, una volta determinate queste caratteristiche rifrattive, procede ponendo un foglio con un foro di fronte alla sfera, a simulare la pupilla. A è il centro della sfera ed EF l'apertura situata di fronte ad essa. HI è l'oggetto visibile mentre il foglio su cui si forma l'immagine è in KL, punti di cuspidi delle caustiche provenienti da H e da I, dopo le rifrazioni subite nell'attraversamento della sfera trasparente. Prendendo in esame le radiazioni provenienti da I, che attraversano il foro, notiamo che tali raggi, dopo le dovute rifrazioni, giungono in un'area d'intersezione MN. Ma siccome l'apertura EF impedisce il passaggio dei raggi diretti al centro della sfera, i raggi periferici studiati formeranno la loro immagine più nitida in un punto più vicino alla sfera. Di conseguenza in L l'immagine di I sarà sfocata. Tuttavia i raggi che s'irradiano da H attraverseranno la sfera in una zona relativamente centrale e produrranno la loro immagine nitida in K. Ad ogni modo l'immagine che si crea di là dalla sfera è invertita e ribaltata ed è più nitida in K e nell'area a tale punto limitrofa<sup>196</sup> (Fig. 24).

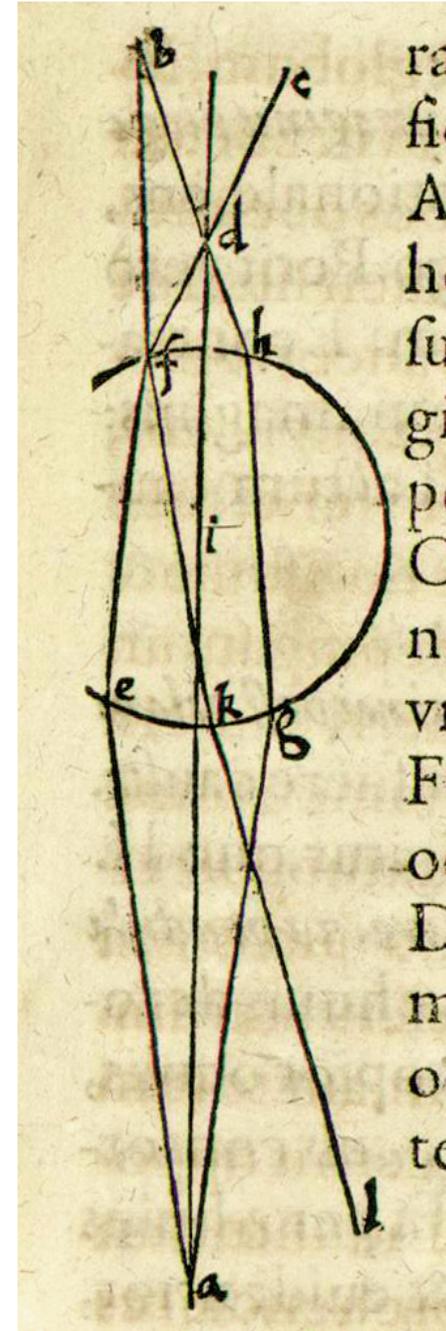


Fig. 21: Kepler, *Paralipomena*, schema a pagina 234.

Il fisico considera questo meccanismo applicabile anche al meccanismo diottrico dell'occhio. Infatti, sebbene il cristallino sia lenticolare, Kepler lo considera non isolato dagli umori che lo circondano. La rifrazione dei raggi avviene nel momento in cui essi colpiscono la cornea, e di nuovo quando escono dalla superficie posteriore del cristallino immettendosi nell'umore vitreo. La rifrazione che avviene tra l'umore acqueo e il cristallino è trascurabile perché la radiazione è vicina di solito alla perpendicolare nel momento in cui incrocia questa superficie.

La convessità della cornea e del cristallino sono poco difformi, per questo la rifrazione che avviene sulla superficie esterna del cristallino è minima<sup>197</sup>.

Ogni cono radiativo (di un punto nello spazio) è rifratto quando tocca la cornea, e converge leggermente mentre procede verso il cristallino. Qui la radiazione forma un secondo cono che ha la stessa base del primo, ma vertice dietro l'occhio. Il secondo cono incontra poi la lente iperbolica del cristallino che devia di nuovo i raggi rispetto alla perpendicolare alla superficie in quel punto. In questo modo si crea un nuovo cono più corto e ottuso, con il suo vertice sulla retina.

Kepler non ci lascia schemi grafici di questa definizione, ma possiamo a riguardo riportare uno schema riportato da Descartes nel testo *La dioptrique*, pubblicato trentatré anni più tardi.

In questo modo ad ogni punto nello spazio corrisponde uno ed un solo punto sulla retina. Inoltre l'immagine risulta essere sottosopra rispetto all'originale.

Kepler inoltre si accorge di alcuni problemi inerenti alla formazione dell'immagine sulla retina. Il primo problema riguarda il fatto che i raggi che provengono da punti periferici del campo visivo hanno un corrispondente biunivoco sulla retina in posizione meno profonda rispetto a raggi che provengono da punti centrali. Il punto più distante sulla retina, in sostanza corrisponde al raggio assiale dell'occhio, mentre man mano che ci si allontana da questo punto, la penetrazione dei raggi è minore in profondità.

Un altro problema è vincolato al tracciamento dei raggi nel loro percorso interno all'occhio. Anche i raggi più periferici riescono a colpire

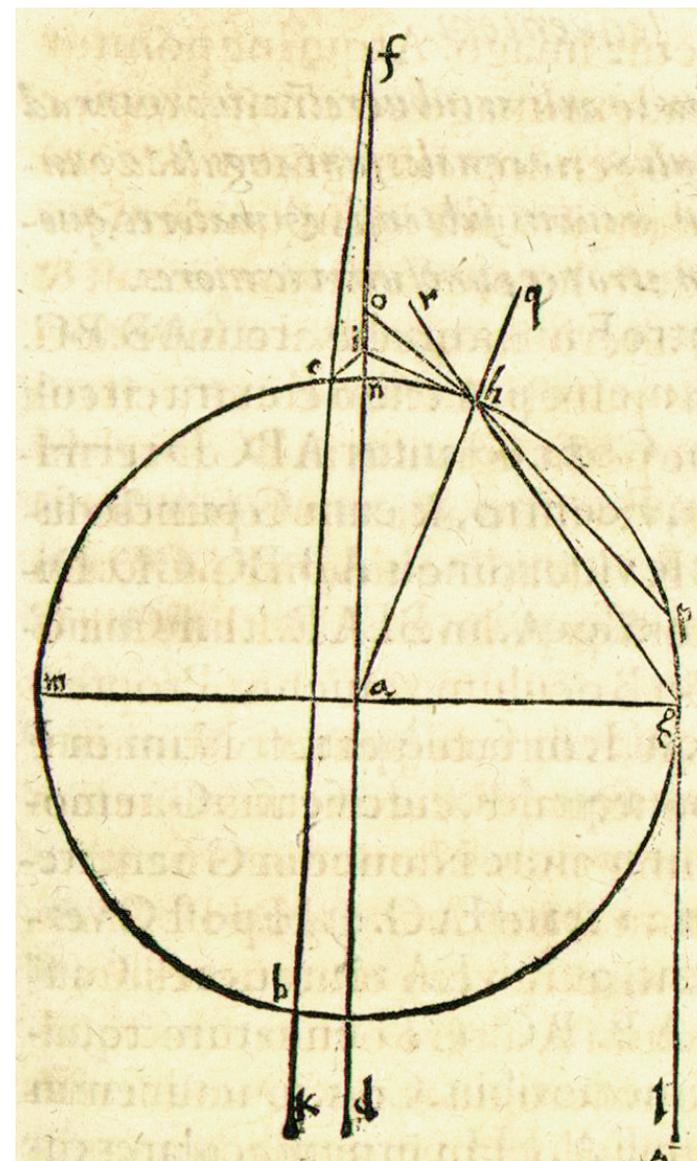


Fig. 22: Kepler, *Paralipomena*, schema a pagina 238. Kepler riconosce il fenomeno dell'aberrazione sferica. I raggi che passano vicino al centro della sfera intersecano il suo asse centrale più lontano rispetto ai raggi che passano in periferia. Il raggio kb, che passa vicino l'asse da f, è rifratto in b e in c, e interseca l'asse in f. diversamente il raggio lg periferico, è rifratto in g e in h intersecando l'asse in i. L'insieme di tutti i raggi riflessi, seguendo la legge geometrica, definisce un'iperbole.

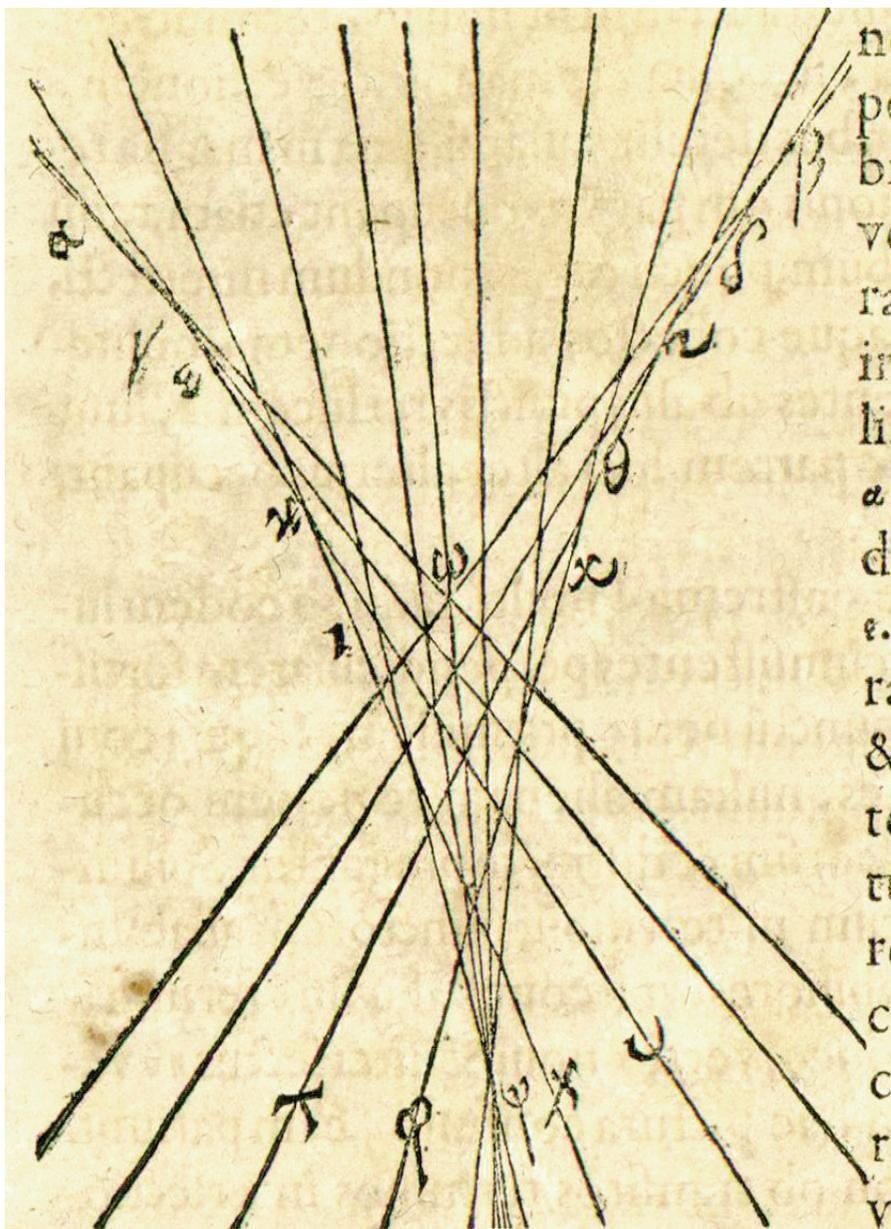


Fig. 23: Kepler, *Paralipomena*, schema a pagina 249.  
L'insieme di tutti i raggi riflessi all'interno di una sfera, seguendo la legge geometrica, definisce un'iperbole.

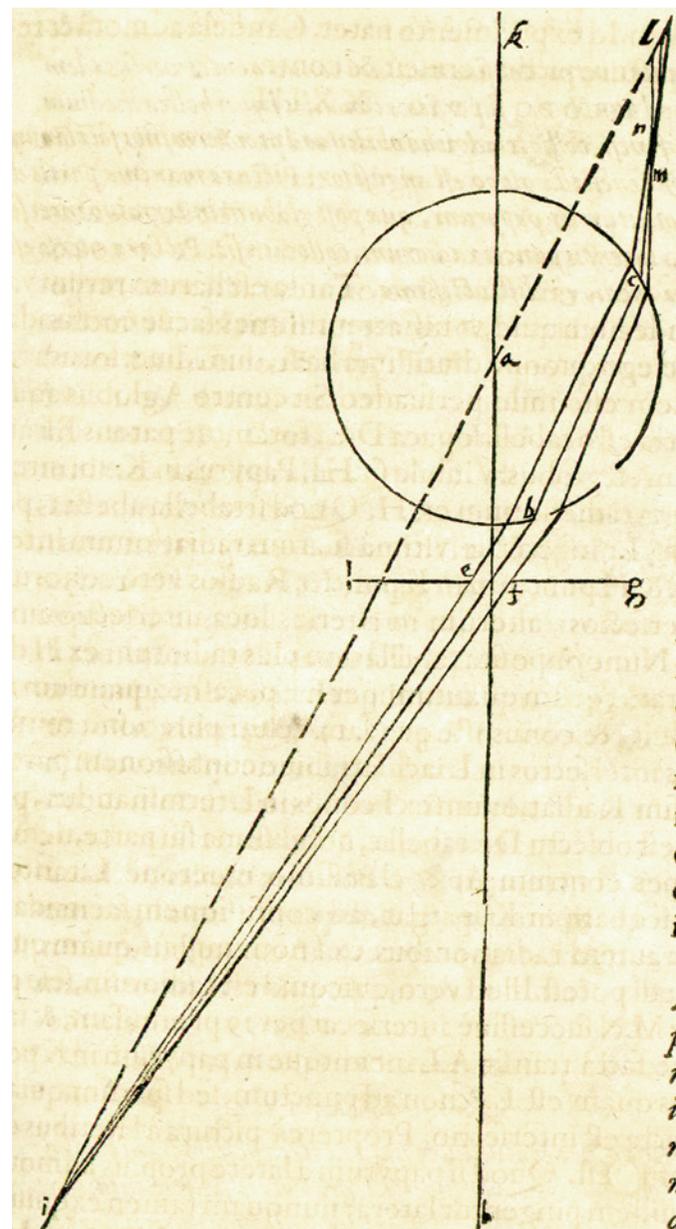


Fig. 24: Kepler, *Paralipomena*, schema a pagina 252.  
Kepler, una volta determinate le caratteristiche rifrattive, procede, ponendo un foglio con un foro, di fronte alla sfera, a simulare la pupilla. A è il centro della sfera ed EF l'apertura situata di fronte ad essa.

la cornea e ad entrare nell'occhio, con la conseguenza che una porzione di emisfera molto ampia viene riprodotta sulla retina in una porzione che diventa proporzionalmente decrescente verso i lati della retina. Ciò fa pensare che l'immagine è riprodotta distorta sulla retina. Ma la forma e la posizione della retina è tale da correggere la distorsione: *"il centro della retina è posizionato non all'intersezione degli assi dei coni che attraversano l'umore vitreo, ma molto più internamente, mentre il bordo della retina è in posizione avanzata nei lati. Cosicché i coni più lunghi, che sono molto più separati, intercettano in maniera perpendicolare porzioni minori di retina, mentre i coni più corti, che sono molto meno separati ai lati della retina, marcano con angoli acuti porzioni più grandi, situate in modo obliquo. Per cui coni da punti radianti opposti, sebbene non più opposti dopo la rifrazione, sono incidenti tuttavia in punti opposti sulla retina. Così è realizzata la compensazione"*<sup>198</sup>.

Kepler faticò molto per arrivare a queste soluzioni, principalmente a causa dell'inversione dell'immagine. Come Leonardo da Vinci, anche Kepler aveva tentato più volte di trovare il modo di invertire ulteriormente l'immagine all'interno dell'occhio, poichè inizialmente credeva che il processo visivo fosse un processo di tipo ottico. Di fronte al problema dell'inversione dell'immagine, soluzione ottica perfetta nello schema del fisico, Kepler dovette cambiare idea sul processo visivo, accettando quello che da secoli veniva affermato dai prospettivisti, ossia che un certo spirito visivo era responsabile della visione. Il campo dell'ottica si limita alla retina, dopodiché il processo visivo diventa compito di qualcos'altro, che Kepler dice essere qualcosa di misterioso; come se l'anima inviasse dal cervello lo spirito, per mezzo del nervo ottico, fino alla retina dove incontra l'immagine. Ma per Kepler è indubbio che l'immagine si forma sulla retina ed egli muove una nuova critica a Witelo a riguardo. Witelo credeva che l'immagine entrasse nel nervo ottico e raggiungesse il chiasma ed infine le cavità cerebrali. Witelo sbagliava perché un'immagine non poteva essere condotta attraverso un nervo in cui risiedeva il buio, e soprattutto composto di una sostanza che non era trasparente come gli umori dell'occhio<sup>199</sup>.

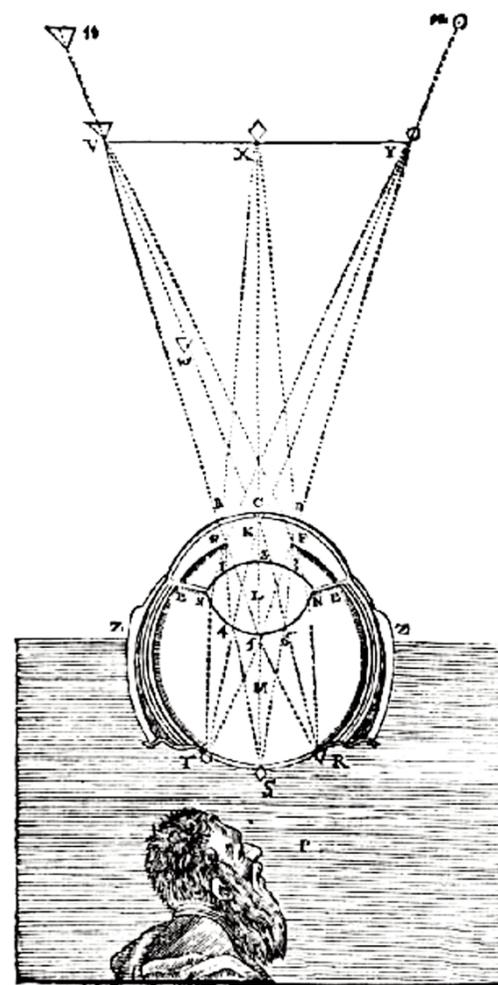


Fig. 25: Schema di Descartes nel testo *La dioptrique*, pubblicato trentatré anni più tardi rispetto al testo di Kepler. Ad ogni punto nello spazio corrisponde uno ed un solo punto sulla retina. Inoltre l'immagine risulta essere sottosopra rispetto all'originale.

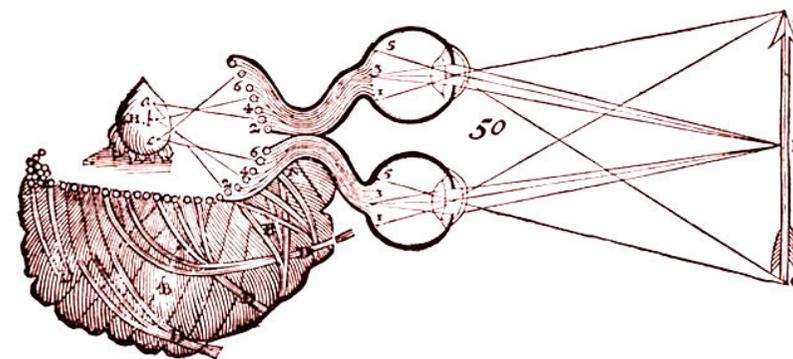


Fig. 26: La visione binoculare in uno schema di Descartes.

Come potevano inoltre le immagini unirsi nel chiasma? Come potevano seguire un percorso non rettilineo, senza seguire delle regole geometriche? Ma anche se il nervo ottico fosse dritto, tuttavia subirebbe una piegatura a causa del movimento torsionale dell'occhio<sup>200</sup>. Ne consegue che nessun tipo d'immagine ottica penetra nel nervo, ma rimane impressa nella retina.

Lo spirito è colpito dai colori e dalle luci. Le specie nel nervo, che esistono indipendentemente dalla presenza dell'oggetto visibile, non sono negli umori o negli strati, come credeva Witelo: per questo la visione avviene negli animi e attraverso l'impressione delle specie nello spirito. Comunque questa impressione non è ottica ma fisica e misteriosa<sup>201</sup>.

Con questa spiegazione, che riprende le tesi dei prospettivisti, la teoria sulla percezione visiva di Kepler non è poi così lontana da quella di Alhazen. Entrambi riconoscono l'esistenza di un aspetto ottico e di uno non – ottico all'interno del processo visivo. L'aspetto ottico propriamente detto, si conclude quando la radiazione raggiunge il centro del potere visivo all'interno dell'occhio: per Alhazen era il cristallino, mentre per Kepler è la retina. Dopodiché deriva la conseguente trasmissione allo spirito visivo e l'azione della percezione visiva<sup>202</sup>.

Sicuramente gli studi fatti da Kepler per la camera oscura, influenzarono in qualche misura la sua teoria della visione, come molti hanno sostenuto. Bisogna però dire che in una sola un'occasione egli paragona esplicitamente l'occhio alla camera oscura, e che la maggior parte delle similitudini vennero fatte solo in seguito da altri leggendo il *Paralipomena*.

È però vero che la sua conoscenza della camera oscura non risolse automaticamente i problemi connessi all'immagine retinica, e alla rifrazione dei raggi nel loro percorso interno all'occhio.

Bisogna anche dire che le soluzioni a cui arriva Kepler, non sono frutto di un genio. Il fisico è certamente un uomo di grande intuito, profonda conoscenza in più discipline, interessi molteplici e senza nulla togliere alla sua persona, si deve riconoscere che avendo consapevolezza delle proprietà radiative di ogni singolo punto, e avendo le conoscenze diottriche opportune (derivate dal mondo antico) la soluzione che

si doveva ottenere era necessariamente quella dell'immagine retinica. L'ostacolo principale al raggiungimento di questa soluzione fu senza dubbio l'errata persuasione che l'immagine doveva pervenire identica all'originale al nervo ottico, senza nessuna inversione e ribaltamento. Questa convinzione aveva deviato molti tra i più grandi scienziati e trattatisti, intenti nella ricerca sfrenata di un secondo centro che permettesse una seconda inversione dell'immagine all'interno dell'occhio.

David Lindberg è del tutto contrario con l'idea di molti altri teorici, secondo cui Kepler è una figura innovativa e distaccata dal contesto, genio isolato dopo un periodo di vuoto. Lindberg d'altra parte ha ragione nel non considerare Kepler del tutto staccato, perché aveva comunque a suo favore secoli di trattatistica con tutte le soluzioni, gli errori, i problemi e le contraddizioni connesse. È vero che senza i trattati di ottica, forse Kepler non avrebbe potuto studiare così approfonditamente gli effetti di rifrazione nelle sfere trasparenti prima, e negli umori dell'occhio poi. Inoltre per Lindberg, Kepler non è una figura innovativa, piuttosto è la figura conclusiva di un processo. Il teorico collega Kepler alla tradizione dei prospettivisti iniziata nel medioevo, e lo considera come l'ultimo passo di un processo durato secoli. La teoria dell'immagine retinica aveva modificato la sovrastruttura della teoria intronmissiva prospettivista, ma la base era sostanzialmente quella medioevale.

Kepler aveva attaccato la teoria della visione con una tale capacità da renderla inefficace, tanto che aveva dovuto cercare una nuova soluzione alla visione. Ma per farlo in realtà non si scostò dai fondamenti della stessa teoria stabilita da Alhazen nello XI secolo e che lui aveva minato.

La teoria visiva di Kepler non fu anticipata dagli studiosi medioevali, ma egli non formulò una teoria reazionaria che ripudiava lo sforzo dei suoi predecessori, piuttosto Kepler presentò una nuova soluzione (ma non un nuovo tipo di soluzione) ad un problema medioevale, definito circa sei secoli prima da Alhazen, ma che riuscì a perfezionare in maniera esemplare<sup>203</sup>.

## Note al Capitolo 1

- <sup>1</sup> Leucippo, frag. A. 29-30 (Hermann Diels, *Die Fragmente der Vorsokratiker*, ed. Walther Kranz, 6a ed., 2: 78-79); tradotto da G. S. Kirk e L. E. Raven, *The Presocratic Philosophers*, pp. 421-22.
- <sup>2</sup> Democrito, frag. A. 135 (Diels – Kranz, 2: 114); tradotto da Kirk e Raven, *The Presocratic Philosophers*, pp. 421. Vedi anche : David C. Lindberg, *Theores of Vision from Al-Kindi to Kepler*, University of Chicago Press, Chicago 1976. Pagina 215, nota 7.
- <sup>3</sup> Aristotele, *De sensu* 2. 438<sup>a</sup>5-12, tradotto da da J. I. Beare, *The Works of Aristotele*, ed. W. D. Ross, vol. 3.
- <sup>4</sup> Timaeus 45 b-d, trad. Francis M. Cornford, *Plato's Cosmology*, pp. 152-53. Anche nella *Repubblica* 6. 507d-508c. Vedi anche David C. Lindberg, *Theores of Vision from Al-Kindi to Kepler*, p. 5.
- <sup>5</sup> 76d, in Platone, *Laches, Protagoras, Meno, Euthydemus*, trad. in inglese W. R. M. Lamb, *Plato, with an English Translation*, col. 4, Londra 1924, p. 285.
- <sup>6</sup> Per il passo in inglese vedi Cornford, *Plato's Cosmology*, 67c-d, p. 276; David C. Lindberg, *Theores of Vision*, p. 6.
- <sup>7</sup> *De anima* 2. 7. 418<sup>b</sup>14-16, traduzione in inglese di W. S. Hett, p. 105.
- <sup>8</sup> *De sensu* 2. 438<sup>a</sup>26-438<sup>b</sup>2, traduzione in inglese di Hett, p. 225.
- <sup>9</sup> *De anima* 2. 7. 418<sup>b</sup>5-9, p. 105. Cf. *De sensu* 3. 439<sup>a</sup>22-25.
- <sup>10</sup> *De anima* 2. 7. 418<sup>a</sup>32 – 418<sup>b</sup>3, p. 103 e 419<sup>a</sup>14-15, p. 107. Traduzione di Hett.
- <sup>11</sup> Per il concetto di Pneuma vedi G. Verbene, *L'évolution de la doctrine du pneuma de stoicisme à S. Augustin*; S. Sambursky, *Physics of the Stoics*, pp. 1-11 ; David C. Lindberg, *Theores of Vision*, p. 9.
- <sup>12</sup> *De placitis Hippocratis et Platonis*, traduzione in inglese a cura di Philip De Lacy, Opera Omnia, ed Kühn.
- <sup>13</sup> *Ibid.*, cap. 5 p. 635.
- <sup>14</sup> Lo schema proposto da Galeno è del tutto simile a quello proposto da Hunain. Si rimanda pertanto al paragrafo relativo.
- <sup>15</sup> Il testo integrale dell'Optica, in lingua latina e greca, appare in *Euclidis opera omnia*, ed. J. L. Heiberg and H. Menge, traduzione in inglese di H. E. Burbon.
- <sup>16</sup> Laura Catastini, *Euclide e la visione per angoli*, in *Le geometrie della visione* :

scienza, arte, didattica / Laura Catastini, Franco Ghione. – Milano [etc.] : Springer, 2004.

- <sup>17</sup> A. Lejeune, *Euclide et Ptolémée : deux stades de l'optique géométrique grecque*, Louvain : Bibl. de l'Université, 1948; David C. Lindberg, *Theores of Vision*, p. 15.
- <sup>18</sup> Laura Catastini, *Euclide e la visione per angoli*, op. cit.
- <sup>19</sup> Fino ad ora non è stata scoperta nessuna copia del testo *De Aspectibus* originale, o comunque una copia in lingua. La versione latina è stata pubblicata in Axel Anthon Björn e Sebastian Vogl, *Al-Kindi, Tideus und Pseudo – Euklid. Drei optische Werke*; anche la revisione fatta nella edizione del testo da Alexander Birkenmajer, *Bibliotheca Mathematica*, Ser. 3, 13 (1912 – 13). Björn e Vogl hanno dimostrato che la traduzione latina del testo islamico è stata curata da Gerardo da Cremona, lo stesso che tradusse in latino anche il testo di Alhazen.
- <sup>20</sup> Il nesso tra la filosofia e l'ottica di Al-Kindi è stato enfatizzato da Graziella Federici Vescovini, *Studi sulla prospettiva medioevale*.
- <sup>21</sup> Il fatto che raggi luminosi e i raggi visivi fossero rettilinei e della stessa natura sembra essere presa direttamente dall'antichità. Essa era difesa da Hero, Daminos e anche da Tolomeo. D. Lindberg, op. cit.
- <sup>22</sup> Al-Kindi però parla solamente di ombre e nessun riferimento è fatto alla penombra, a dove essa inizia e a dove invece finisce. Probabilmente era difficile determinare tale passaggio d'ombra, ma può anche essere una ipotesi il fatto che non ci fossero sperimentazioni pratiche (come per esempio quelle di Leonardo) da parte di Al-Kindi, e che le sue deduzioni derivassero direttamente dai suoi schemi geometrici.
- <sup>23</sup> D. Lindberg, op. cit., p. 23.
- <sup>24</sup> Vescovini, op. cit., pp 33 - 43.
- <sup>25</sup> *De aspectibus*, prop. 11, pp 12-13.
- <sup>26</sup> Proposizione 12 nel *De aspectibus*, p 19.
- <sup>27</sup> Proposizione 12 nel *De aspectibus*, p 24 - 25.
- <sup>28</sup> Per una trattazione più approfondita si veda D. Lindberg, op. cit., p 29 e note.
- <sup>29</sup> Proposizione 13 nel *De aspectibus*, p 23.
- <sup>30</sup> Per approfondire gli studi del mondo islamico in tale direzione, si consiglia di consultare i testi di Julius Hirschberg.
- <sup>31</sup> I *Dieci trattati dell'occhio* è reperibile in una versione araba di Max Meyerhof con traduzione in inglese. Esiste anche una traduzione in latino da Costantino. Per ulteriori informazioni sui testi a riguardo si rimanda a D. Lindberg, op. cit., note 4 e 58.

- 32 *Ten Treatises*, trad. Meyerhof, p 8; *Livre des questions*, trad. Sbath e Meyerhof, p 83.
- 33 *Ibid.* p 8; *ibid.* pp 87 - 91
- 34 *Ibid.*, pp xlvi – xlix.
- 35 Molte delle nozioni presenti nel testo di Hunain possono essere rintracciate anche nell'opera di Galeno *De placitis*, o in *Claudii Galeni Opera Omnia*, ed. C.G. Kühn.
- 36 *Ten treatises*, p 23.
- 37 D. Lindberg, *op. cit.*, pp 36 – 39.
- 38 *Ten treatises*, pp 31 – 32, per le conclusioni successive ai tre casi, pp 32 - 34.
- 39 Non esistono radicali modificazioni rispetto alla teoria di Galeno a cui si rimanda per approfondimenti.
- 40 *Ten Treatises*, pp 35 - 38.
- 41 L'autobiografia di Avicenna, con aggiunte eseguite dopo la sua morte dall'amico al-Jzjani, è stata tradotta con commentari da A. J. Arberry, *Avicenna: His Life and Times*, in *Avicenna: Scientist and Philosopher*. La produzione che tratta dello scienziato mussulmano è molto vasta, ma purtroppo, per la maggior parte, estera e in lingua straniera.
- 42 La migliore bibliografia di riferimento sulle opere di Avicenna e sui suoi studiosi, si può recuperare nel testo di M. M. Anawati, O.P., *La tradition manuscrite orientale de l'oeuvre d'Avicenne*, *Revue Tomiste* 51 (1951): 407 – 40. Da D. Lindberg, *Op. cit.*, p 234, nota 70.
- 43 *De Anima*, ed. Van Riet, p 226, 234. Il *De anima* è la traduzione di uno dei maggiori testi di Avicenna, il *Kitab al-Shifa*, in lingua latina, che circolava in europa nella seconda metà del XII secolo. La traduzione latina si attribuisce a Dominicus Gundissalinus, mentre esiste anche una traduzione in castigliano di Avendauth.
- 44 *De Anima*, pp 226 – 27; *Avicenna, Danishnama (Le livre de science)*, Trad. Mohammad Achena r Henri Massé, 2 : 58 – 59, 61.
- 45 *De Anima*, pp 227 – 228, 234.
- 46 *De Anima*, p 228; *Le livre de science*, 2 : 59.
- 47 *De Anima*, pp 213, 215 – 16, 219 – 20.
- 48 *De Anima*, p 222 ; *Le livre de science*, 2 : 58.
- 49 *De Anima*, pp 213- 14
- 50 *Le livre de science*, 2 : 60. *De Anima*, p 227.
- 51 *Le livre de science*, 2 : 61.

- 52 Il testo maggiormente usato, per chi volesse approfondire questo tema, è di Ernest Renan, *Averroès et l'averroïsme*, terza ed. (Paris, 1869).
- 53 *Epitome dei Parva naturalia*, *Epitome of Parva naturalia : Translated from the original Arabic and the Hebrew and latin versions / With notes and introduction by Harry Blumberg*, Cambridge, Mass. : The Mediaeval academy of America, 1961.
- 54 *Ibid.* pp 6, 18.
- 55 *Ibid.* p 18.
- 56 *Ibid.* p 15.
- 57 *Ibid.* p 15.
- 58 *Ibid.* p 17.
- 59 *Ibid.* pp 17 - 18.
- 60 D. Lindberg, *Did Averroes discover retinal sensitivity?*, *Bull Hist Med.* 1975 Summer; 49(2):273-8.
- 61 *Epitome dei Parva naturalia*, trad. Blumberg, pp 9, 18 – 19,
- 62 Un elenco può essere facilmente analizzato nel terzo capitolo e nel paragrafo a lui dedicato tratto da Enrico Narducci, *Intorno ad una traduzione italiana fatta nel secolo decimoquarto del trattato d'ottica d'Alhazen matematico del secolo undecimo e ad altri lavori di questo scienziato / nota di Enrico Narducci*, Tipografia delle scienze matematiche e fisiche, 1871. In esso (ripreso anche in questo testo al terzo capitolo in riferimento al grande teorico mussulmano), è contenuto un elenco di tutte le opere scritte da Alhazen.
- 63 Il *Kitab – al – Manazir* venne tradotto in latino, e una edizione è quella pubblicata insieme al testo di Witelo, curata da Federico Risneiro dal titolo *Optique Thesaurus*. Esiste anche una versione inedita in lingua italiana volgare ad opera di Guerruccio di Cione Federighi. Infine è stata in parte tradotta in lingua inglese, ma solo nei suoi primi 3 libri, da A. I. Sabra; bisogna però dire che la traduzione inglese, fatta dal Sabra, ha un indice diverso da quello latino, nell'edizione del Risneiro riportato qui in appendice A, tradotto in lingua italiana.
- 64 D. Linberg, *Introduction to facsimile reprint of Optique Thesaurus*, pp xiv – xix.
- 65 *De Aspectibus*, ed. Risneiro, libro I, Cap. 1, paragrafo 1, p 1.
- 66 *De Aspectibus*, libro I, Cap. 5, Parag. 15, p 7.
- 67 *Ibid.*, libro I, Cap. 5, Parag. 23, p 14.
- 68 *Ibid.*, libro I, p 15.
- 69 *Ibid.*, libro I, Cap. 5, Parag. 23, p 15.

- 70 Ibid., libro I, Cap. 4, Parag. 13, p 7.
- 71 Ibid., libro I, Cap. 4, Parag. 4, p 3 - 4.
- 72 Ibid., libro I, Cap. 4, Parag. 6 - 12, pp 4 - 6.
- 73 Ibid., libro I, Cap. 5, Parag. 16, p 8.
- 74 Ibid., libro I, Cap. 5, Parag. 19, p 10.
- 75 Ibid., libro I, Cap. 5, Parag. 14, pp 7 - 8.
- 76 Ibid., libro I, Cap. 5, Parag. 17 - 18, p 9.
- 77 Ibid., libro I, Cap. 5, Parag. 19, p 10.
- 78 Ibid., libro I, Cap. 5, Parag. 18, p 10.
- 79 Ibid., libro VII, Cap. 2, Parag. 8, p 241.
- 80 Ibid., libro VII, Cap. 2, Parag. 2, p 2.
- 81 Per approfondire il problema dei raggi rifratti, e il loro contributo, in Alhazen, rimando a David C. Lindberg, *Theories of Vision from Al-Kindi to Kepler*, University of Chicago Press, Chicago 1976. pp 76 - 80.
- 82 *De Aspectibus*, libro II, Cap. 1, Parag. 2, p 25.
- 83 Ibid., libro II, Cap. 1, Parag. 3, 5, pp 25 - 26.
- 84 Ibid., libro II, Cap. 1, Parag. 2 - 6, pp 25 - 26.
- 85 Ibid., libro II, Cap. 1, Parag. 6, p 26 - 27; Ibid., libro I, Cap. 5, Parag. 25 - 26, pp 15 - 16.
- 86 David C. Lindberg, op. cit., pp 82 - 83.
- 87 D. Lindberg, Ibid., pp 87 - 92.
- 88 D. Lindberg, Ibid., p 91.
- 89 Sulla vita di Grosseteste, si veda Francio S. Stevenson, *Robert Grosseteste, Bishop of Lincoln*, Londra 1899.
- 90 Robert Grosseteste, *On Light (De luce)*; translation from the Latin, with an introduction by Clare C. Riedl. Milwaukee : Marquette university press, 2000.
- 91 Pecham, *Tractatus de perspectiva*, edited by David Lindberg. Franciscan Institute Publications, text series, 16. The Franciscan Institute: St. Bonaventure, NY, 1972, p 28.
- 92 D. Lindberg, Op. cit. , p 96. Nota 59.
- 93 Grosseteste, *On Light*, trad. Riedl, p 10; per approfondire il tema cosmogonico della luce si può far riferimento ad A. C. Crombie Alistair Cameron 1915, *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science 1100/1700*, Oxford : Clarendon press. 1953.
- 94 D. Lindberg, Op. cit., passo tratto dal testo a p 98, e afferente ad un altro testo: A source book in medieval science / edited by Edward Grant, Massachusetts : Havard University, 1974, pp 385 - 386.
- 95 Giovanni 1: 4-9.
- 96 D. Lindberg, p 99.
- 97 Traduzioni in lingua inglese di questi testi si possono trovare, ad opera di Lindberg, in Grant, Source Book, pp 385 - 391.
- 98 Sulla vita e le opere di Alberto Magno consultare T. M. Schwertner, O.P., *St. Albert the Great*, New York, 1932.
- 99 D. Lindberg, Op. cit. , p 105.
- 100 D. Lindberg, Ibid. , p 106.
- 101 D. Lindberg, Ibid. , p 107. Sulla questione si rimanda a A. G. Little, *The Franciscan School at Oxford in the Thirteenth Century*, Archivium Franciscanum Historicum 19 (1926). Questo testo contiene anche una buona base bibliografica per gli studi inerenti a Bacon.
- 102 Il testo latino dell' *Opus Maius*, con anche *De multiplicatione specierum*, fu pubblicato nel XVIII sec. da Samuel Jebb, *Fratri Rogeri Bacon ordinis minorum Opus Majus*, Londra 1733. Un'altra edizione è quella di John H. Bridges, *The Opus Majus of Roger Bacon*, divisa in due volumi, Oxford 1897.
- 103 D. Lindberg, Op. cit. , p 109.
- 104 *Opus Maius*, ed. Bridges : 2, cap. 2, p. 5. 1, dist. 6, pp 37 - 38
- 105 *Opus Maius*, ed. Bridges : 2, p. 5. 1, dist. 2, Cap. 1, pp 147 - 148. Alhazen, *De aspectibus*, pp 76 - 78.
- 106 *Opus Maius*, ed. Bridges : 2, dist. 8 - 9, pp 54 - 74. Alhazen, *De aspectibus*, libro I, cap. 5, paragr. 16, p 8; libro I, cap. 7, pp 22 - 23; ; libro II, cap. 2, paragr. 20, pp 36 - 37. *Opus Maius*, ed. Bridges : 2, pt 5.1, dist. 1, cap. 3, p 6. Alhazen, *De aspectibus*, libro II, cap. 2, paragr. 15, p 34.
- 107 D. Lindberg, Op. cit. , p 113.
- 108 *De multiplicatione specierum*, pt. 1, cap. 1, ed. Bridges, 2: 409.
- 109 *De multiplicatione specierum*, pt. 2, cap. 9, ed. Bridges, 2: 494 - 96; *Ibid.*, pt. 1, cap. 1, ed. Bridges, 2: 410.
- 110 *Opus Maius*, pt. 5. 1, dist. 5, cap. 1, ed. Bridges, 2: 31 - 32.
- 111 *Ibid.* cap. 4, ed. Bridges, 2: 52; cap. 2, 2: 49.
- 112 D. Lindberg, Op. cit. , p 115.
- 113 *Opus Maius*, pt. 5. 1, dist. 7, cap. 4, ed. Bridges, 2: 52.

- 114 D. Lindberg, Op. cit. , p 117.
- 115 D. Lindberg, Ibid. , pp 117 - 118.
- 116 D. Lindberg, Ibid. , pp 119 – 121.
- 117 Sulla vita e le opere di Henry, il testo più approfondito, in lingua tedesca è di Otto Hartwig, *Henricus de Langenstein dictus de Hassia. Zwei Untersuchungen über das Leben und Schriften Henricchs vn Langenstein*, Marburg 1857.
- 118 D. Lindberg, Op. cit. , p 124.
- 119 In breve: la teoria della moltiplicazione della specie, nata dall'eziologia, prevedeva che ogni oggetto, sostanza e strumento emetta delle specie che provocavano una serie di effetti nell'intorno.
- 120 *Preclarissimum opus*, fol. 47r – 48v.
- 121 La figura è stata ripresa dal testo di D. Lindberg, *Theories of Vision*, p 125. Egli ricalca questa immagine dal Erfurt MS, fol. 31v, e Florence MS, fol. 63r. Il cerchio più piccolo rappresenta il cristallino. In realtà Lindberg fa notare che, mentre il testo afferma che i raggi si dirigono verso il centro dell'occhio, in questa immagine invece raggiungono il centro della circonferenza (che non rappresenta l'occhio). Egli crede che questa discrepanza sia dovuta ad uno sbaglio dei manuscritti che si occuparono nel tempo di ricopiare le figure dei testi.
- 122 Questa figura proviene dal Erfurt MS F. 380, fol 35v, e dal Florence MS J.X.19, fol 72v.
- 123 Vedi a riguardo lo schema di Roger Bacon nel rispettivo paragrafo.
- 124 *Preclarissimum opus*, fol. 58v.
- 125 Figura da D. Lindberg, a sua volta da Erfurt MS F. 380, fol 35v, e dal Florence MS J.X.19, fol 72v.
- 126 Erfurt MS F. 380, fol 36v, e dal Florence MS J.X.19, fol 75v.
- 127 Nato a Parma (più giovane di Henry di Langenstein, ma la data non si conosce con certezza), Biagio Pelacani non riveste grande importanza nel campo trattato in questo capitolo. Egli studiò a Pavia e probabilmente anche a Parigi. Egli scrisse una serie di trattati, tra cui anche dei commentari aristotelici, e un testo intitolato *Questione super Perspectiva*, in cui tratta alcuni argomenti in realtà già discussi da altri. Muore a Parma nel 1416.
- 128 Sulla vita di Buridian, Ernest A. Moody, Buridian, Jean, *Dictionary of Scientific Biography*, 2: 603 – 608.
- 129 D. Lindberg, Op. cit. , p 133. Di questo argomento parla anche Vescovini, *Studi sulla prospettiva*, sulla natura del lux del lumen e del colore.

- 130 *Questiones et decisiones physicales insignium virorum*, ed. Gorge Lockert, fol. 14va e fol. 19rb.
- 131 Per chi volesse approfondire questo tema: David C. Lindberg, Op. cit., pp 132 – 142.
- 132 David C. Lindberg, Ibid., p. 144.
- 133 D. Lindberg, Ibid. , p 145.
- 134 Sulla questione della prospettiva antica: Erwin Panofsky, *La prospettiva come forma simbolica*, Feltrinelli, Milano 1999; Decio Gioseffi, *Perspectiva artificialis. Per la storia della prospettiva: spigolature e appunti*, Università degli studi di Trieste, Trieste 1957; Riccardo Migliari, *La prospettiva e Panofsky*, in *Disegnare. Idee, immagini*, n. 31, 2005, pp. 28-43; Laura Carlevaris, *Il Mosaico della scienza prospettica. Una tessera romana: la Sala delle Maschere sul Palatino*, Tesi del Dottorato di Ricerca in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente, Roma 2003.
- 135 Per approfondimenti: Antonio di Tuccio Manetti, *La vita di Brunelleschi*, Salerno 1992.
- 136 David Linberg, Op. cit. , p. 149.
- 137 Alessandro Parronchi 1914, *Studi su la dolce prospettiva*, Milano, A. Martello, 1964.
- 138 Nel *Della Pittura* Alberti scrive che : “*Restaci a dire del razzo centrico. Sarà centrico razzo quello uno solo, quale si cozza la quantità che di qua e di qua ciascuno angolo sia all'altro equale. Questo uno razzo, fra tutti gli altri gagliardissimo e vivacissimo, fa che niuna quantità mai pare maggiore che quando la ferisce. Potrebbe di questo razzo dire più cose, ma basti che questo uno, stivato dagli altri razzi, ultimo abbandona la cosa veduta; onde merito si può dire prencipe de' razzi. Parmi avere dimostrato assai che, mutato la distanza e mutato il porre del razzo centrico, subito la superficie parrà alterata. Adunque la distanza e la posizione del centrico razzo molto vale alla certezza del vedere. Ecci ancora una terza qual facci parere la superficie variata. Questo viene dal ricevere il lume. Vedesi nelle superficie speriche e concave, sendo ad uno lume, hanno questa parte oscura e quella chiara; e bene che sia quella medesima distanza e posizione di centrica linea, ponendo il lume altrove vedrai quelle parti, quali prima erano chiare, ora essere oscure, e quelle chiare quali erano oscure; e dove attorno fussino più lumi, secondo loro numero e forza vedresti più macole di chiarore e di oscuro.*” (prop. 8). Tolomeo, Damianos, Al-Kindi, Avicenna, e in maniera più determinante in Alhazen e nei successivi, avevano considerato la vista più nitida in prossimità del raggio centrale.

<sup>139</sup> Edgerton, Samuel Y., 1926, *The Renaissance rediscovery of linear perspective*, New York : Basic Books, 1965. Egli associa la costruzione dell'Alberti con la prop. 10 della recensione all'Optica di Euclide di Theon di Alexandria (Lindberg, Op. cit., cap. 8 nota 23)

<sup>140</sup> *Notebooks*, Trad. MacCurdy, pp 57 - 58.

<sup>141</sup> Ibid.

<sup>142</sup> Leonardo traduce il promemio di Pecham in italiano, e anche la prima proposizione del *Perspectiva communis*.

<sup>143</sup> Manlio Brusatin e Vittorio Mandelli, *Leonardo da Vinci , Codice C*, 80 Carte d'Artisti, Abscondita, Milano 2006.

<sup>144</sup> Il Manoscritto D è stato tradotto da Nino Ferrero, *Leonardo da Vinci: Sull'occhio*, sebbene una versione completa tradotta è quella di Donald S. Strong, *Leonardo da Vinci on the Eye*.

<sup>145</sup> Questa parte del testo è stata difficile da ritrovare nel testo in latino, e a meno di una traduzione completa del testo, al momento non ho modo di specificarne l'esatta collocazione. Le analisi fatte sul testo di Alhazen sono state eseguite utilizzando la traduzione dei primi 3 libri del *De Aspectibus* effettuata da A. I. Sabra. Bisogna precisare però, che non sono riuscito a determinare la rispondenza tra l'indice del Sabra e l'indice del *De Aspectibus* in lingua latina (che si trova in lingua italiana in appendice A). Quindi per le sperimentazioni, anche nel terzo capitolo, farò riferimento al testo del Sabra: A.I. Sabra, *the Optics of Ibn al-Haytham*, books I-III on direct vision, London 1989, pp 30-41.

<sup>146</sup> Vedi a riguardo capitolo 3, paragrafo 1.

<sup>147</sup> "Se l'ombra può esser veduta per l'aria. L'ombra sarà veduta per l'aria caliginosa o polverosa, e questo ci si mostra quando il sole penetra per gli spiracoli in luoghi oscuri, che allora si vede l'ombra interposta infra i due o più raggi solari che passano infra detti spiracoli". Trattato di Pittura, ed. Melzi, prop. 584. Vedi anche Capitolo 3, paragrafo 2.

<sup>148</sup> Per approfondire il tema dell'ottica in Leonardo da Vinci, si consiglia: Edmondo Solmi, *Nuovi studi sulla filosofia naturale di Leonardo da Vinci, il metodo sperimentale, l'astronomia, le teorie della visione*, Tip. G.Mondovi, 1905; J. Playfair McMurrich, *Leonardo da Vinci the Anatomist (1452-1519)*, published for the Carnegie institution of Washington by the Williams & Wilkins, c1930; Anna Maria Brizio, *Razzi incidenti e razzi reflessi : dal f 94 5. ed altri del codice Arundel : 3.*

*Lettura vinciana : Vinci, Biblioteca Leonardiana, 21 aprile 1963...*, G. Barbera, 1964; Giovanni Perrod, *La diottrica oculare di Leonardo da Vinci*, Tip. della Gazzetta int. di Medicina, 1907; Vasco Ronchi, *Leonardo e l'ottica*, s.n. 1954.

<sup>149</sup> D. Linberg, Op. cit., *Artist and Anatomists of the Renaissance*, Leonardo da Vinci, p. 159.

<sup>150</sup> *The literary works of Leonardo da Vinci / compiled and edited from the original manuscripts by Jean Paul Richter; commentary by Carlo Pedretti.*, Oxford : Phaidon Press, 1977, 1:134. Cf. *The notebooks of Leonardo da Vinci / arranged, rendered into English and introduced by Edward MacCurdy*, London : J. Cape, 1938, p 994.

<sup>151</sup> *Literary Works*, trad. Richter, 1:139 - 140.

<sup>152</sup> D. Lindberg, Op. cit., p 161.

<sup>153</sup> Capitolo 1, parag. 5.

<sup>154</sup> *Literary Works*, trad. Richter, 2: 99. Il testo cita: "Dico il vedere essere operato da tutti li animali mediante la luce; ...impero chè chiaro si comprende, i sensi ricievento le similitudini delle cose non mandano fori di loro alcuna virtù; anzi mediante l'aria, che si trova infra l'obietto e 'l senso, incorpora in sé le spetie delle cose, e per lo contatto, che à col senso, le porgie a quello."

<sup>155</sup> *Literary Works*, trad. Richter, 1:120, par. 21. Cf. *Notebooks*, trad. MacCurdy, p 232.

<sup>156</sup> David Linberg, Op. cit., *Artist and Anatomists of the Renaissance*, Leonardo da Vinci, p. 162.

<sup>157</sup> Donald Sanderson Strong, *Leonardo on the eye : an english translation and critical commentary of Ms. D. in the bibliotheque nationale*, Paris, with studies on Leonardo's methodology and theories on optics / dissertation ..., Garland 1979, pp 89 - 110; D. Lindberg, Op. cit., p 162, nota 78: Strong nota che alcuni disegni di Leonardo mostrano il nervo ottico penetrare nel cristallino. Gli autori del medioevo, però, consideravano spesso il vitreo e il cristallino come formanti un'unica sfera, non considerando che esse avessero in realtà 2 differenti consistenze e funzioni. Forse Leonardo prese questa sfera, e la considerò come un unico umore omogeneo, con i nomi che già aveva assegnati nel corso della storia (la sfera del cristallino e del vitreo). Questo però è uno inspiegabile errore. Ma i trattatisti medioevali avevano specificato che l'albugineo è situato di fronte al cristallino, sebbene alcuni disegni lo raffigurino dietro il vitreo; Lindberg , *Pecham*, p 115 e tavole 1 - 4. E' anche possibile che l'errore di Leonardo derivi da una mala interpretazione di un passo di

Alhazen, *De Aspectibus*, Libro I, cap. 5, par. 4, o del *Perspectiva* di Witelo, Libro III, teor. 25, p 97. Qui si afferma che il nervo ottico si estende alla circonferenza dell'umore glaciale (ad circumferentiam glacialis). Quello che i due autori intendevano era il retro del vitreo e non il cristallino. Leonardo avendo unito i due umori glaciali, e posizionati al centro dell'occhio, non aveva molta scelta.

158 *Notebooks*, trad. MacCurdy, p 232.

159 *Notebooks*, trad. MacCurdy, p 251.

160 Esiste anche uno schizzo realizzato da Leonardo nel manoscritto D *Sull'occhio*. Anche in Donald S. Strong, "Leonardo da Vinci on the Eye", pag. 57.

161 D. Lindberg, Op. cit., p 164. From Strong, *Leonardo on the Eye*.

162 D. Lindberg, Ibid., p 164. From Strong, *Leonardo on the Eye*, pp 78, 89 – 90. *Notebooks*, trad. MacCurdy, p 237.

163 D. Lindberg, Ibid., p 164. From Strong, *Leonardo on the Eye*, pp 59 – 60, 113.

164 D. Lindberg, Ibid., p 164. From Strong, *Leonardo on the Eye*, p 68.

165 D. Lindberg, Ibid., p 164, nota 91: Questa importante conclusione venne espressa per primo da Archimede, secondo le fonti pervenuteci. *The Works of Archimedes*, trad. Thomas L. Heath, 2° Ed., Cambridge 1912. A. Lejeune, *La dioptré d'Archimède*. Venne successivamente ripresa anche da Alhazen, *De Aspectibus*, Libro VII, cap. 6, paragr. 37, p 269.

166 Strong, *Leonard on the Eye*, p 73.

167 Leonardo scrive: *La sfera vitrea (i.e. cristallina) è posta nella mezzeria dell'occhio in modo da invertire di nuovo le specie che si intersecano nel piccolo foro della pupilla*. Strong, *Leonard on the Eye*, p 56.

168 Leonardo considera il fatto che i raggi che si intersecano nella pupilla non creano confusione. Egli spiega tale fenomeno prendendo in esame i raggi solari che attraversano due vetri colorati sovrapposti, per esempio blu e gialli. In nessun caso i raggi usciranno di una colorazione gialla o blu, ma avranno piuttosto una colorazione verde. Le specie si mischiano. Se la stessa cosa avvenisse per le immagini dei colori che giungono all'occhio, non riusciremmo più a distinguere i colori separatamente. È chiaro che questo non avviene, pertanto nessun tipo di fusione o intreccio avviene tra le specie che attraversano la pupilla. *Notebooks*, trad. MacCurdy, p 260.

169 Strong, *Leonard on the Eye*, p 56.

170 *Anathomia* (Pavia 1478), ristampato in facsimile in *Anatomies de Mondino dei Luzzi et de Giulio Vigevano*, Ernest Wichercheimer.

171 Gabriele Zerbi, *Liber anathomiae corporis humani & singulor. membror. illius: edit' per excellentissimum philosophum ac medicum, D. Gabrielem de Zerbis veronensem...*, pt. 1, [Colophon: Venetijs, p. presbyter. Bonetum locatellum bergomensem. Expensis heredum nobilis viri domini Octauiani Scoti, 1502, fol. 123r.; D. Lindberg, Op. cit., pp 168 – 177.

172 Vesalius, *De humani corporis fabrica libri septem*, Basileae, ex officina I. Oporini, 1543, p 643.

173 Vesalius, *De humani corporis fabrica*, p 646.

174 Ibid., p 219.

175 La maggior parte dei testi che trattano di Platter sono in lingua inglese o tedesca. D. Lindberg, Op. cit., pp 175 – 177.

176 Felix Platter, *De corporis humani structura et usu...libri III*, p 187.

177 Platter, Ibid., p 187.

178 Non ci fu una edizione del 1575, tuttavia esiste una seconda edizione di Lyon (ma non Messina) del 1613. L'edizione del 1611 è un insieme di più trattati, in cui il Photismi è solo il primo. Maurolico fa cenno nella sua opera a Bacon, Witelo, Pecham, l'optica e la Catoptrica di Euclide, e alle opere di Alhazen. Sulla biografia di Maurolico, Arnaldo Casotti, *Maurolico, Francesco*.

179 Sullo sviluppo della teoria della camera oscura: D. Lindberg, *The Theory of Pinhole Images from Antiquity to the Thirteenth Century*, in Journal Archive for History of Exact Sciences Publisher Springer Berlin / Heidelberg, Volume 5, Number 2 / January, 1968; D. Lindberg, *The Theory of Pinhole Images in the Fourteenth Century*, in Journal Archive for History of Exact Sciences Publisher Springer Berlin / Heidelberg, Volume 6, Number 4 / January, 1970; D. Lindberg, *A Reconsideration of Roger Bacon's Theory of Pinhole Images*, in Journal Archive for History of Exact Sciences Publisher Springer Berlin / Heidelberg, Volume 6, Number 3 / January, 1970.

180 *Photismi de lumine et umbra*, Napoli, p. 73

181 D. Lindberg, Op. cit., pp 182 – 185.

182 Giacomo della Porta, *Magia naturalis*, Napoli 1589.

183 Kepler, *Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur*, Francoforte 1604, p 47.

184 D. Lindberg, Op. cit., p186 – 189.

185 Witelo, *Perspectiva*, Libro 3, teor. 23, ed. Risneiro, pp 95 – 96.

- 186 *Paralipomena*, p 185.
- 187 D. Lindberg, *Op. cit.*, p 189.
- 188 *Paralipomena*, p 185.
- 189 *Ibid.*, p 184.
- 190 *Ibid.*, p. 184.
- 191 *Ibid.*, pp. 153 - 54.
- 192 Solo della Porta aveva approfondito gli studi sulle lenti non sferiche. G. della Porta, *De refractione*, pp. 41 – 64, 175 – 188.
- 193 *Paralipomena*, pp. 162 - 163.
- 194 *Ibid.*, pp 166 – 167.
- 195 *Ibid.*, p 175.
- 196 *Ibid.*, p 178. La sola maniera per rimediare alla sfocatura in L, per Kepler, è quella di spostare il foglio più vicino possibile alla sfera in periferia. Ma anche questa maniera non risolve del tutto il problema.
- 197 *Ibid.*, p 154.
- 198 *Paralipomena*, p 155.
- 199 *Ibid.*, p 152.
- 200 *Ibid.*, p 152.
- 201 *Ibid.*, p 152 - 153.
- 202 *Dioptrice*, pp 23 - 25.
- 203 D. Lindberg, *Op. cit.*, pp. 205 – 206.

