

## **L'OCCHIO UMANO** e della maggioranza dei Vertebrati

Riferimenti agli articoli O3, "Le lenti sferiche" ed O12, "L'occhio" (della serie "Esperienze di ottica")

Per inquadrare il problema, ci sembra utile cominciare con una trattazione generale di come è strutturato l'occhio in alcuni gruppi animali, in modo da renderci conto di come, nel corso dei tempi geologici, gli organi sensibili alla luce siano evoluti: da semplici "macchie fotosensibili", capaci di indicare all'animale solo il livello dell'illuminazione ambiente, a primitivi "occhi a fossetta", capaci di indicare la direzione di provenienza della luce, ai primi occhi capaci di creare un'immagine grossolana degli oggetti, fino al sofisticato occhio dei Vertebrati. Un organo complesso e raffinato come l'occhio umano non può, evidentemente, essersi formato in un solo gruppo animale, né in tempi brevi, né "per caso"<sup>1</sup>: dietro la situazione attuale vi è una storia evolutiva durata miliardi di anni ed una lunga successione di strutture sempre più complesse ed adattate a sempre nuove "nicchie ecologiche", cioè modi di vivere. Un occhio semplice come quello delle meduse, ad es., sarebbe inutile ad un predatore terrestre, che ha ben altre esigenze; viceversa, un occhio complesso come quello di un'aquila sarebbe un peso inutile per una medusa. È sempre questione di adattamento fra le strutture-funzioni di un organo e le esigenze di sopravvivenza di una specie nel suo peculiare ambiente di vita.

Gli "organi di senso" sono quegli organi che permettono ad un animale di avere qualche informazione sul mondo circostante, cioè di percepire qualche stimolo proveniente dal mondo esterno<sup>2</sup>.

Come "occhio" va inteso qualunque organo di senso capace di essere stimolato dalla "luce".

- Si indica come **luce** la radiazione ottica, cioè quella radiazione elettromagnetica che ha una lunghezza d'onda compresa fra 0,4 e 0,75  $\mu$ ; il simbolo  $\mu$  indica il "micron" o millesimo di mm. Tale radiazione è chiamata "ottica" poiché è capace di stimolare l'occhio umano medio. Vedi l'articolo O4: "Lo spettro ottico" nella serie "Esperienze di Ottica".

Si ricordi però che certi animali sono sensibili a radiazioni fuori dello spettro ottico: all'ultravioletto (insetti, uccelli, ecc.) ed all'infrarosso (certi serpenti). Si può ancora parlare di "occhi". •

La sensibilità alla luce di un organo animale si può manifestare in tre modi principali:

- sensibilità generica, capace di rivelare solo la presenza e l'intensità di una sorgente di luce. Si può parlare di **fotosensibilità**.
- sensibilità direzionale, capace di rivelare anche la direzione di provenienza della luce, cioè la posizione della sorgente.
- visione, cioè capacità di rivelare forma e posizione di un oggetto.

Vediamo più in dettaglio.

1) **SENSIBILITÀ GENERICA** - Questa è fornita da gruppi di cellule sensibili, che si trovano sull'epidermide, presso la superficie del corpo (**macule oculari**). Sotto le cellule sensibili, vi può essere uno strato di cellule scure, che assorbe la luce che viene dall'esterno dopo aver traversato l'organismo (ciò avviene spesso in piccoli animali acquatici, il cui corpo è in genere trasparente); in questo modo, l'animale può distinguere da che lato proviene la luce.

Si trovano macule oculari in certe meduse, in molti lombrichi, sanguisughe, ecc. Vedi le figure 1, 2 e 3.

---

<sup>1</sup> È questo uno degli argomenti più spesso usati dagli antievoluzionisti, ma la questione si può chiarire solo in una visione storica dei fatti, cioè tenendo conto dei tempi lunghissimi trascorsi dalla comparsa della vita fino ad oggi.

<sup>2</sup> Vi sono però anche organi di senso capaci di informare sullo stato di organi interni: sono i "propriocettori", come le terminazioni che ci informano sullo stato di tensione dei muscoli, quelle dolorifiche, ecc.

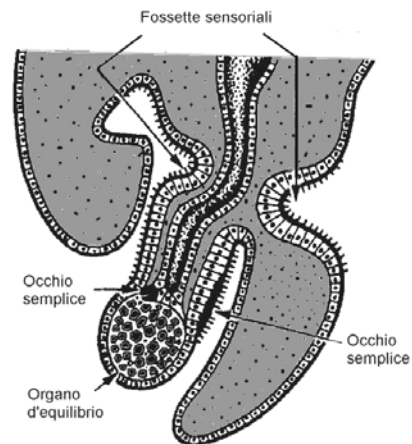
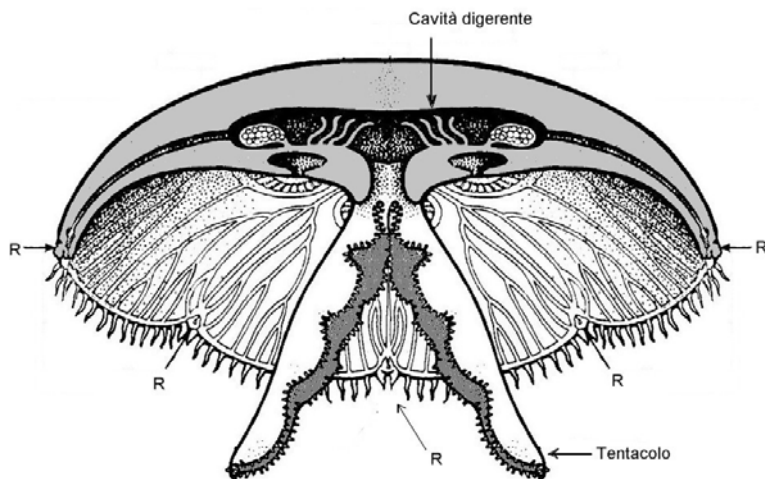


Fig. 1 - La medusa *Aurelia* presenta, lungo il margine dell'ombrello, una serie di organi di senso composti, detti **ropali** (R in figura), che svolgono varie funzioni, oltre quella di sensibilità alla luce.

Fig. 1 e 2 da: V. e J. PEARSE - M. e R. BUCHSBAUM - *Invertebrati viventi* - Zanichelli, Bologna, 1993, modif.

Fig. 2 - Sezione ingrandita di un ropalio della medusa di fig. 1. Sono indicate come "occhio semplice" due ammassi di cellule fotosensibili (stessa fonte della fig. 1).

2) **SENSIBILITÀ DIREZIONALE** - Questa è fornita da strati di cellule sensibili disposte al fondo di una fossetta incavata, alloggiata presso la superficie del corpo ed aperta verso l'esterno attraverso un foro più o meno piccolo. Il foro consente il passaggio di un ristretto fascio di luce, che colpisce un diverso punto del tessuto sensibile in relazione alla posizione della sorgente. Quest'ultima può così essere localizzata.

Con un organo simile, chiamato **occhio a fossetta**, l'animale può voltarsi con precisione in direzione della sorgente o in direzione opposta (realizzando così uno dei casi di "fototropismo", un movimento di avvicinamento od allontanamento da una sorgente luminosa). Occhi a fossetta si trovano in molti Molluschi, Anellidi (vermi segmentati), ecc. Vedi la fig. 4.

3) **VISIONE** - Il riconoscimento della forma degli oggetti può essere effettuato con due strutture completamente diverse:

◊◊ **L'occhio composto** degli insetti, Crostacei, ecc. in cui numerosi occhi elementari (**ommatidi**)<sup>3</sup> sono disposti a formare un occhio complesso, più o meno emisferico; i singoli ommatidi sono molto allungati, a bastoncino, e disposti come i raggi della semisfera, per cui essi "puntano" ognuno in una diversa direzione. Il mondo circostante viene percepito come un mosaico di punti contigui ed equidistanti. Vedi la fig. 5.

◊◊ **L'occhio complesso** dei Vertebrati e dei Cefalopodi (Molluschi, fig. 6), che si può pensare come un occhio a fossetta più o meno perfezionato, in cui, presso il foro d'ingresso della luce, si trovano dei tessuti trasparenti capaci di funzionare come una lente convergente<sup>4</sup>. La lente produce sul fondo della "fossetta" un'immagine reale, impiccolita e rovesciata degli oggetti esterni, allo stesso modo dell'obbiettivo di una macchina fotografica, come appare in fig. 6, 7 ed 11 (vedi anche l'articolo O3, figure da 46 a 48).

Vogliamo ora sviluppare proprio il confronto fra l'occhio dei Vertebrati, in particolare dell'Uomo, ed uno strumento ottico semplice, come la macchina fotografica. Per far questo, cominciamo ad approfondire la struttura (anatomia) e le funzioni (fisiologia) dell'occhio umano.

<sup>3</sup> Nelle libellule, il numero di ommatidi può arrivare a 20.000 per ogni occhio.

<sup>4</sup> Vi sono occhi simili a quelli dei Vertebrati, sia pure rudimentali, anche in molti ragni (spesso in numero di otto, disposti a corona in cima al capo) ed in molti insetti (spesso in numero di tre, in mezzo agli occhi composti). Negli occhi dei ragni, la retina è spesso mobile, in modo che l'animale può seguire gli spostamenti della preda senza voltare il capo, il quale non si può muovere essendo solidale col torace.

Fig.3 - Gruppo di cellule fotosensibili sotto l'epidermide di una sanguisuga. È visibile lo strato ricco di pigmento (colorante) scuro che fa da schermo su un lato alle cellule sensibili.

Da: V. e J. PEARSE - M. e R. BUCHSBAUM - Invertebrati viventi - Zanichelli, Bologna, 1993, modif.

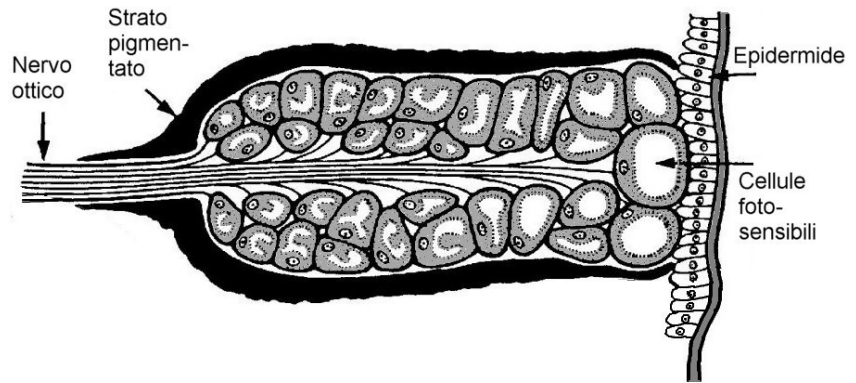


Fig. 4 - Occhio a fossetta di *Nereis*, un anellide marino, lontano parente dei lombrichi. Anche qui, le parti sensibili alla luce (rabdomi) sono schermate da cellule scure ricche di pigmento ("cellule di supporto"). Manca una "lente" cioè una struttura convergente capace di creare un'immagine del mondo esterno. Non può quindi essere percepita la forma degli oggetti.

Da: V. e J. PEARSE - M. e R. BUCHSBAUM - Invertebrati viventi - Zanichelli, Bologna, 1993, modif.

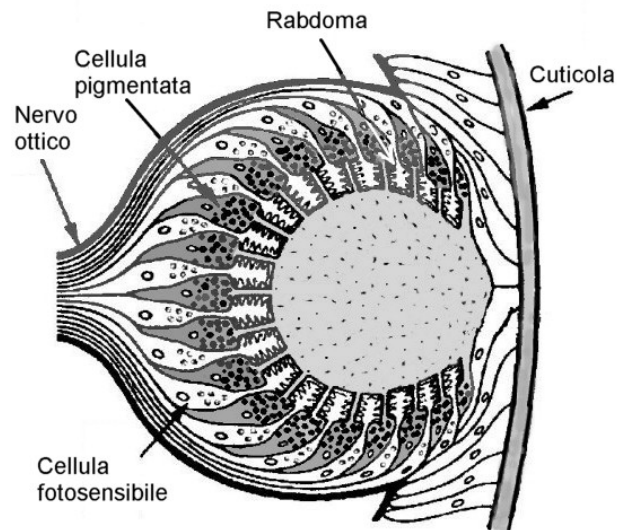
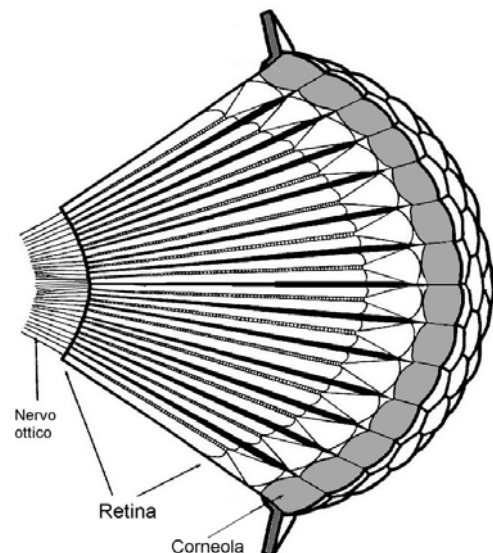


Fig. 5 - Schema di occhio "composto" di insetto, costituito da una moltitudine di piccole piramidi, tutte con il vertice verso il centro dell'organo. Ad ognuna di queste piramidi, costituenti un elemento sensibile (ommatidio), corrisponde una faccetta esagonale sulla superficie esterna dell'occhio composto. Al di sotto della faccetta si trova un ispessimento della parete esterna, con le superfici esterna ed interna convesse, che funge da lente convergente e prende perciò il nome di corneola, per similitudine con la cornea dell'occhio dei Vertebrati.

Da: V. e J. PEARSE - M. e R. BUCHSBAUM - Invertebrati viventi - Zanichelli, Bologna, 1993, modif.

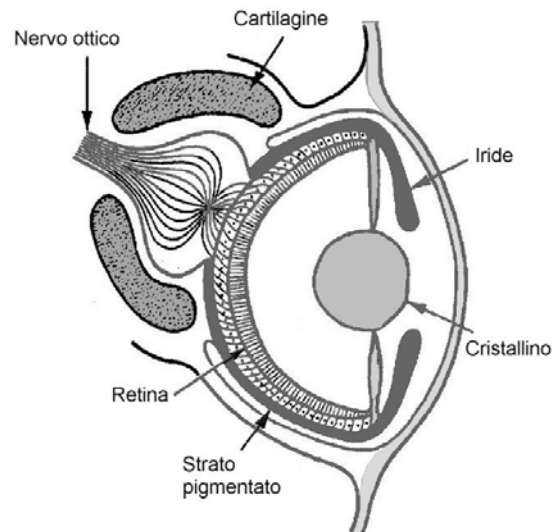


ANATOMIA DELL'OCCHIO UMANO - Vedi la fig. 7 .

Visto dall'esterno, l'occhio umano assomiglia ad una sfera (**globo oculare**) del diametro medio di 23 - 24 mm. Da questa forma all'incirca sferica, si discosta la parte anteriore, che affiora fra le palpebre aperte ed appare come una calotta sferica di circa 10 mm di diametro, sporgente rispetto al globo, liscia e trasparente; è la **cornea** (a destra in fig. 7).

Fig. 6 - Schema dell'occhio di seppia. Notare la massa sferoidale di tessuto che funziona da lente e lo strato scuro pigmentato, esternamente alla retina. Sul davanti, lo strato pigmentato assume la funzione di diaframma della lente, come nel caso della nostra "iride".

Da: V. e J. PEARSE - M. e R. BUCHSBAUM - Invertebrati viventi - Zanichelli, Bologna, 1993, modif.



Verso l'interno dell'occhio, dietro la cornea, si trova un anello di tessuto colorato, di colore variabile da una persona all'altra, detto **iride**<sup>5</sup>. Al centro dell'iride vi è un foro, la **pupilla**, da cui entra la luce. Subito dietro la pupilla, vi è una piccola massa di tessuto gelatinoso trasparente, a forma di lente biconvessa asimmetrica, detta **cristallino**. La struttura del cristallino è complessa, a strati più o meno concentrici. Esso è sospeso ad una raggiera di filamenti ("zonula di Zinn") che si aggancia ad un anello ingrossato, ricco di fibre muscolari, detto **corpo ciliare** (fig. 7).

Fra cornea e cristallino vi è uno spazio ripieno di liquido trasparente (**umor acqueo**), mentre lo spazio dietro il cristallino, che è la massima parte del volume interno dell'occhio, è occupato da un materiale gelatinoso, detto **umor vitreo** o **corpo vitreo**.

Dall'esterno all'interno del globo, la parete dell'occhio al di fuori della cornea è costituita da tre strati:

1) **Sclerotica** o **sclera**, fibrosa, tenace, biancastra, con numerosi vasi sanguigni. La cornea, citata sopra, non è che la parte anteriore, prominente e trasparente, della sclera.

2) **Coroide**, formata di tessuto più tenero, ricchissimo di sostanze coloranti (pigmenti) scuri nonché di capillari. Come per altri casi citati sopra, la coroide ha lo scopo di assorbire tutta la luce che non viene assorbita dalla retina e che, diffondendosi all'interno dell'occhio, ridurrebbe il contrasto. L'iride ed il corpo ciliare rappresentano solo la parte anteriore della coroide, che acquista caratteristiche particolari.

3) **Rètina**, formata di cellule e fibre nervose in più strati, il più esterno dei quali, in prossimità della coroide, contiene gli elementi sensibili alla luce chiamati per la loro forma **coni** e **bastoncelli**<sup>6</sup>. Nella fig. 8 si vede uno schema della struttura della rètina. A sinistra, lo strato pigmentato o coroide; poi, uno strato di cellule piatte anch'esse pigmentate. Più internamente, le cellule fotosensibili (coni e bastoncelli), collegate con sottili fibre ad altre cellule, in parte fornite di due prolungamenti, e dette perciò "bipolari". Ancora più verso il centro del globo oculare vi è uno strato di cellule nervose ("ganglionari") con molte ramificazioni brevi ("dendriti") a contatto con le cellule bipolari, ed una lunga fibra ("neurite" o "cilindrassa") che va a far parte del nervo ottico. Si noti che questo tipo di retina è detto "inversa" poiché le fibre che collegano le cellule ganglionari con i centri nervosi del cervello si trovano all'interno della retina e quindi la luce che attraversa la pupilla deve attraversare anche loro prima di eccitare le cellule sensibili (coni e bastoncelli).

Tutte le fibre convergono verso un punto della rètina (**papilla**, fig. 7) per poi uscire dal globo oculare e costituire il "nervo ottico". In corrispondenza della papilla, la retina non contiene cellule sensibili ed è quindi cieca; per rivelare questo **punto cieco**<sup>7</sup> basta osservare la fig. 9.

<sup>5</sup> Con riferimento all'iride, intesa come arcobaleno, per la varietà dei colori che può assumere.

<sup>6</sup> Nell'occhio umano vi sono circa 4/6 milioni di coni e 100/130 milioni di bastoncelli per ogni occhio.

<sup>7</sup> Il punto cieco si trova a circa 4 mm dalla "fovea" (vedi oltre), in direzione del naso.

Fig. 7 - Schema di occhio umano in sezione, visto da sopra. La sezione passa per l'asse antero-posteriore dell'organo e per il punto cieco.

Il cristallino è stato disegnato a strati concentrici, come una cipolla, poiché questa è la sua struttura, ma in realtà il tutto è assai trasparente.

Da: "Enciclopedia della Scienza e della Tecnica", Mondadori, Milano, 1963, modif.

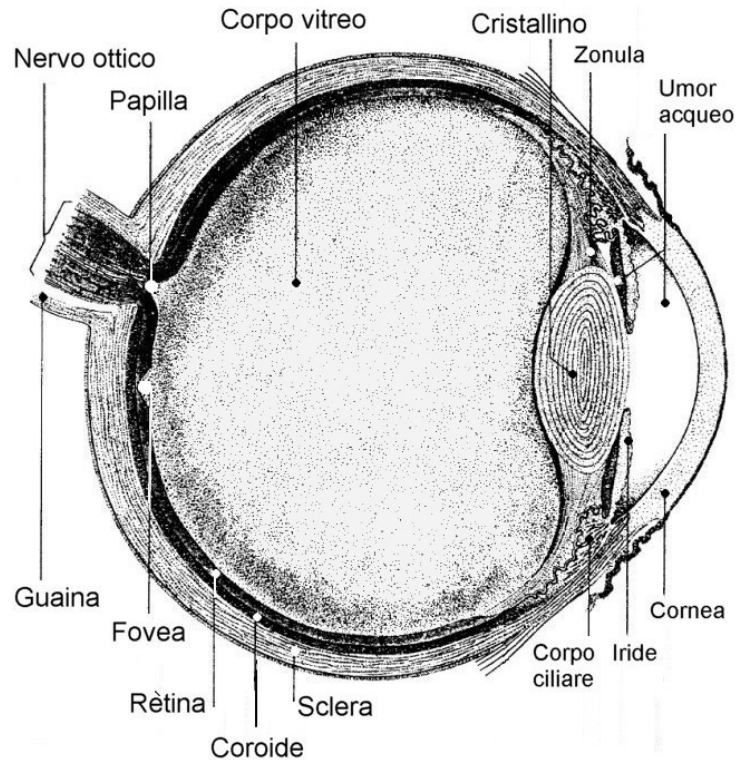
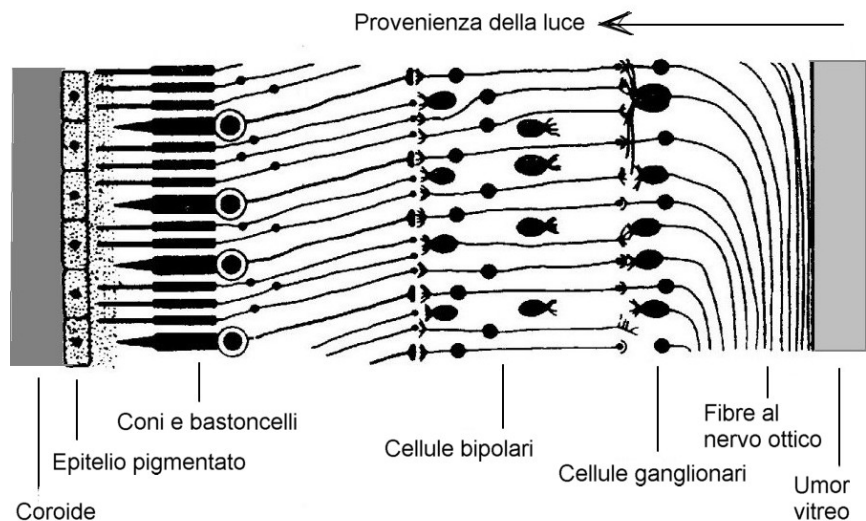


Fig. 8 - Schema della struttura della rètina nell'occhio umano.

Da: A. FIORENTINI, Occhi ed occhiali, Fondaz. I. Porro, Giunti, Firenze, 1967, modif.



+

O

Fig. 9 - Figura per la dimostrazione del **punto cieco** (vedi il testo).

Si fissi bene, senza muovere l'occhio e con il capo ben fermo, la crocetta della fig. 9 con l'occhio destro; l'occhio deve stare ad almeno 30 cm dal foglio; l'occhio sinistro deve essere chiuso. Se ora si avvicina lentamente il capo al foglio, verrà un momento in cui il cerchietto nero a destra scomparirà: la sua immagine è caduta sul punto cieco. Avvicinandosi ancora, il cerchietto tornerà visibile. Fissare sempre la crocetta.

Al centro della retina vi è una zona giallastra (**macula lutea**) al cui centro vi è una piccola depressione di pochi decimi di mm di diametro (**fovea**) in cui la densità delle cellule sensibili, e quindi la risoluzione dell'occhio, è massima. Normalmente, noi muoviamo gli occhi in modo che l'immagine dell'oggetto fissato cada sulla fovea.

Si noti che la retina s'interrompe prima del corpo ciliare (fig. 7) poiché, oltre quel limite, sarebbe inutile: l'immagine non si forma più.

## FUNZIONI NERVOSE DELL'OCCHIO

Vogliamo qui rapidamente descrivere alcuni aspetti del funzionamento dell'occhio umano che sono legati alla parte nervosa di esso, essenzialmente alla retina.

### ◇◇ **Adattamento al buio**

Quando una persona passa da un ambiente normalmente illuminato ad uno quasi buio, inizialmente è quasi cieca; poi riacquista gradatamente la visione. Inizialmente, l'adattamento è veloce, ma il suo completamento richiede almeno 40 minuti. Questo adattamento presuppone un aumento di sensibilità ed è dovuto a tre cause: 1) un fenomeno chimico, cioè la rigenerazione della **porpora retinica** o **rodopsina**. Questa sostanza, contenuta nei bastoncelli, si altera per effetto della luce e dà avvio alla stimolazione nervosa delle cellule sensibili; al buio, essa rigenera rapidamente ed il suo accumulo aumenta la sensibilità delle cellule. 2) Un fenomeno nervoso, per il quale le singole cellule ganglionari (vedi sopra) ricevono impulsi da un numero maggiore di bastoncelli, i cui effetti vengono così a sommarsi. A causa del secondo meccanismo, in concomitanza con l'adattamento al buio si verifica un calo dell'acuità visiva, specialmente nella fovea<sup>8</sup>, e della percezione dei colori, soprattutto del giallo-arancio-rosso. 3) Un fenomeno ottico: l'allargamento della pupilla operato, in via riflessa, da apposite fibre muscolari. Si è detto sopra che al centro dell'iride vi è un foro circolare, la pupilla, attraverso cui passa tutta la luce che va poi a distribuirsi sull'intera retina. Il diametro di questo foro non è costante: si allarga fino ad 8 mm circa al buio, si riduce anche fino ad 1 mm alla luce viva<sup>9</sup>. In questo senso la pupilla dell'occhio è paragonabile al diaframma dell'obbiettivo delle macchine fotografiche, in particolare di quelle dotate di esposimetro automatico: la variazione del suo diametro è comandata in modo inconscio, per un "riflesso" nervoso, sulla base della luminosità media dell'ambiente.

Quando si verifica una certa anomalia, per la quale manca l'adattamento al buio, la persona diviene quasi cieca in luce crepuscolare e si parla di **emeralopia**<sup>10</sup>.

### ◇◇ **Adattamento alla luce intensa**

Passando dal buio alla luce viva, avvengono fenomeni inversi: si ha un primo periodo di abbagliamento, seguito da una perdita di sensibilità che consente, dopo un poco, di riprendere la visione corretta. L'adattamento alla luce è più veloce di quello al buio: infatti, si completa in pochi minuti. Oltre ai meccanismi chimici e nervosi già citati, anche qui esiste un meccanismo più strettamente ottico: il restringimento automatico della pupilla.

Sembra che l'adattamento alla luce intensa sia dovuto anche alla migrazione dei granuli scuri nelle cellule pigmentate su cui si appoggiano le cellule sensibili.

### ◇◇ **Persistenza**

Il fatto che l'adattamento al buio o alla luce siano relativamente lenti spiega il fenomeno della persistenza, per il quale un'immagine che si forma per breve tempo sulla retina produce una sensazione che dura per una frazione di secondo dopo lo stimolo. Se la retina riceve una serie di immagini di breve durata intercalate da brevi periodi di buio, può non percepire lo stacco fra ogni immagine e la successiva ed avere la sensazione di un'immagine unica (**fusione**). Se le

---

<sup>8</sup> Vedremo che nella fovea prevalgono i coni, che sono meno sensibili dei bastoncelli.

<sup>9</sup> Le variazioni di diametro della pupilla sono dovute alla presenza, nell'iride, di fibre muscolari radiali e circolari.

<sup>10</sup> L'emeralopia è spesso dovuta a carenza di vitamina A, un precursore chimico della rodopsina.

successive immagini sono leggermente diverse l'una dall'altra, si può avere la sensazione di movimento, come avviene nel cinematografo ed in televisione<sup>11</sup>.

Allo stesso meccanismo della persistenza sono dovute le **immagini postume**. Si tratta di questo: osservando un oggetto molto illuminato (es. il riquadro di una finestra in pieno giorno) e poi volgendo gli occhi su un fondo scuro, o chiudendo le palpebre, si continua a vedere l'oggetto di prima, sia pure molto confuso e pallidissimo; le reazioni chimiche provocate dalla luce nella retina non si annullano istantaneamente col passaggio luce-buio.

Le immagini postume sono "positive", cioè riportano gli stessi chiari-scuro dell'oggetto, se la stimolazione della retina è breve; se la stimolazione è prolungata, si può avere un affaticamento della retina e l'immagine postuma apparirà con contrasto invertito.

#### ◇◇ **Risoluzione**

Se, in un oggetto qualunque, consideriamo due punti vicini, possiamo vedere come distinti, cioè **risolti**, quei due punti solo se i due punti corrispondenti nell'immagine formata sulla retina cadono su due diverse cellule sensibili; è questo il limite anatomico della risoluzione dell'occhio. Anche il sistema di lenti dell'occhio (vedi sotto) ha un suo limite di risoluzione legato alle aberrazioni ed alla diffrazione (vedi l'articolo O5, "Le aberrazioni delle lenti", ed il manuale "Problemi tecnici della microscopia...", Capp. 13 e 18), ma il limite ultimo è dato dalla distanza fra le cellule. Questa distanza è di 4 - 5  $\mu$  in corrispondenza della fovea, molto maggiore altrove. Questa massima densità di cellule nella fovea spiega perché, quando "fissiamo" un oggetto, ruotiamo istintivamente gli occhi in modo che la sua immagine cada proprio sulla fovea: la massima risoluzione si ha infatti in essa, e corrisponde ad una distanza fra due punti dell'oggetto di circa 0,1 mm, se l'oggetto stesso si trova a 250 mm dall'occhio<sup>12</sup>.

#### ◇◇ **Sensibilità al contrasto**

Si chiama "contrasto", semplificando molto, la differenza di luminosità fra una regione ed un'altra di un oggetto o di un'immagine.<sup>13</sup>

L'occhio umano percepisce il contrasto solo se è superiore a circa il 2 % (legge di Weber), ma la sua sensibilità dipende dal colore: è massima per i contrasti in bianco e nero.

#### ◇◇ **Sensibilità ai colori** (sensibilità cromatica)

Sembra che i bastoncelli della retina, uno dei due tipi di cellule sensibili, siano incapaci di discriminare i colori per cui, da soli, ci fornirebbero la visione in bianco e nero. Essi però possono percepire luminosità più basse. Le altre cellule sensibili (coni) sarebbero invece sensibili ai colori, anche se hanno bisogno di una stimolazione più elevata. I bastoncelli prevalgono numericamente, ma nella piccola regione centrale detta "fovea" (vedi sopra) prevalgono i coni. Sembra che vi siano varie categorie di coni, sensibili a diverse bande spettrali, almeno tre; vi sono varie teorie in merito<sup>14</sup>.

Dalla combinazione dell'eccitazione di varie categorie di coni si avrebbe la percezione dei colori misti. Si noti che la percezione dei colori, del loro contrasto, ecc. è affidata a molti centri nervosi, oltre 30, che lavorano in parallelo per non rallentare troppo la percezione finale.

Ed ogni "centro" rappresenta una struttura complessa. La sola zona V1 della corteccia visiva (nel lobo occipitale del cervello) contiene circa 300 milioni di neuroni.

Vi sono però persone che non percepiscono i colori. La causa di questo difetto sembra risiedere nella funzionalità dei coni. L'assenza di percezione di TUTTI i colori (*acromatopsia* o

<sup>11</sup> A seconda dell'illuminazione media, del colore e di altri fattori, la fusione, e quindi la percezione di un'unica immagine, avviene con una frequenza minima di immagini da 10 a 70 al secondo. Nella TV analogica, oltre alla successione delle immagini (25 + 25 / sec), vi è la scomposizione di ogni immagine in righe parallele, che si succedono alla frequenza di oltre 16.000 righe al secondo. Ma il nostro occhio percepisce un'immagine stabile.

<sup>12</sup> Questo corrisponde ad un angolo di 1 - 2 minuti primi.

<sup>13</sup> Il contrasto si può esprimere in percentuale come  $C = \frac{I' - I''}{I' + I''} \times 100$ , in cui  $I'$  ed  $I''$  sono le luminosità massima e minima nel piano dell'oggetto o dell'immagine.

<sup>14</sup> Se chiamiamo B i coni sensibili al blu-viola, V quelli sensibili al verde ed R quelli sensibili all'arancio-rosso, le lunghezze d'onda di massima sensibilità sarebbero (John D. Mollon, 1983): 419 nm per i coni B, 531 nm per i coni V e 558 nm per i coni R. Come si vede, i coni V ed R sono assai simili quanto a lunghezza d'onda di massima sensibilità. Il rapporto numerico fra i tre tipi di coni sarebbe: B:V:R = 1:20:40.

*tritanopia*) è, per fortuna, un caso molto raro. Più frequente è l'insensibilità al rosso (*protanopia*) oppure al rosso-verde (*deuteranopia*). In questi casi si parla di **daltonismo**, in ricordo del chimico e fisico inglese J. Dalton che ne era affetto e lo descrisse nel 1794.

Il daltonismo è assai più frequente negli uomini che nelle donne; la ragione di ciò sta nel fatto che il corretto funzionamento dei coni è legato a due coppie di geni situati nei "cromosomi del sesso", indicati con XX. Nelle donne, un difetto in uno solo dei cromosomi X viene compensato dall'altro cromosoma X e non dà segni manifesti; nell'uomo, essendovi un solo cromosoma X, il daltonismo si manifesta se quell'unico cromosoma è difettoso poiché manca il cromosoma omologo. La donna daltonica deve essere omozigote rispetto ai geni difettosi.

La figura che segue può essere utile per rivelare la presenza di daltonismo, almeno in certe sue forme: la fascia superiore contiene tutti i colori puri dello spettro (a parte le imperfezioni della riproduzione tipografica); il quadrato inferiore sinistro presenta colori misti. Osservando bene la figura, un occhio sano percepisce la povertà di colori della seconda fascia dall'alto e del quadrato in basso a destra. Se invece chi osserva trova poca o punta differenza fra le due fasce orizzontali o fra i due quadrati in basso, c'è da preoccuparsi.

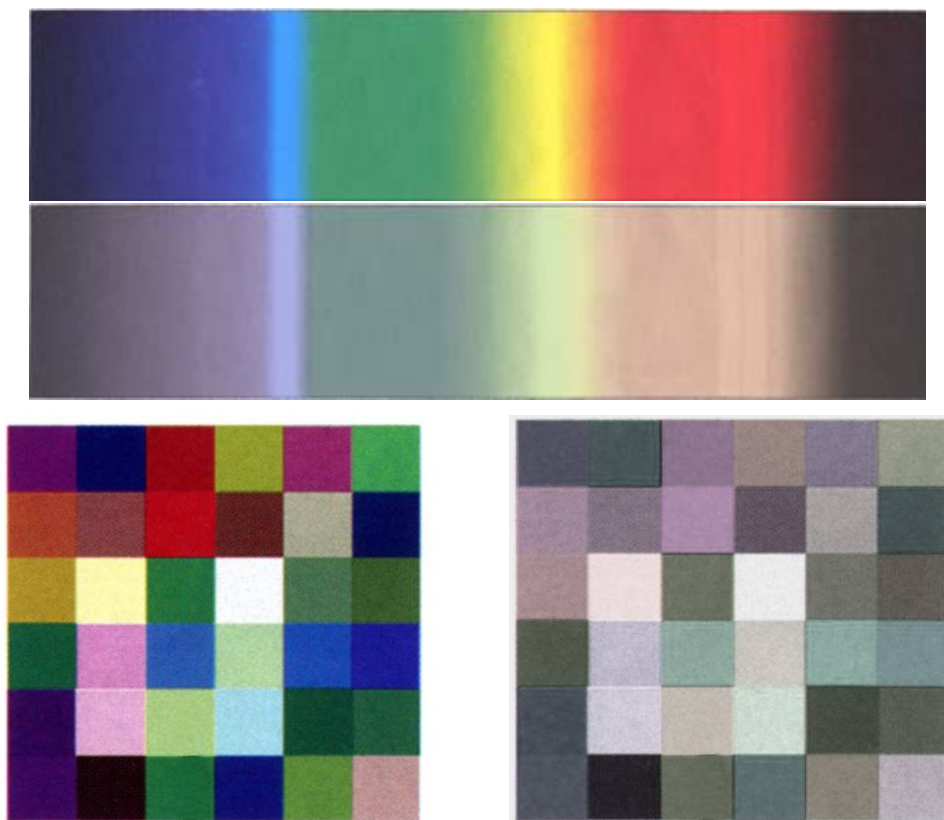


Fig. 10 - Le due fasce orizzontali superiori, oppure i due quadrati in basso sono uguali, ma differiscono per la saturazione dei colori. Un occhio che non percepisce tale forte differenza è probabilmente daltonico.

### FUNZIONI OTTICHE DELL'OCCHIO (Vedi l'articolo O3 in "Esperienze di ottica")

Sotto questo titolo intendiamo ora valutare il funzionamento dell'occhio considerandolo solo come un sistema capace di formare un'immagine degli oggetti esterni e di proiettarla sulla retina. Tale immagine dovrà essere "reale", rovesciata, impiccolita, come si può vedere dalla fig. 11 (come pure dalle figg. 46 - 48 dell'articolo O3 {"Le lenti"} della serie "Esperienze di ottica" e dalla fig. 11 del manuale "Problemi tecnici della microscopia...", Cap. 2). Se l'occhio sta fissando un oggetto puntiforme  $A_\infty$  oppure F a grande distanza (fig. 11), i raggi che collegano tale punto con l'occhio arrivano all'occhio medesimo pressoché paralleli. Pertanto, i mezzi trasparenti dell'occhio fanno convergere tali raggi in un punto come A', oppure in quello indicato con "Fuoco", come farebbe una qualunque lente convergente. Infatti, l'occhio contiene

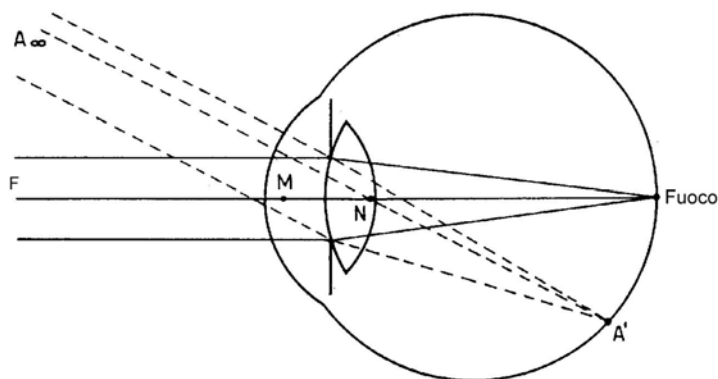
almeno due sistemi convergenti: la cornea ed il cristallino (fig. 7 e, schematicamente, fig. 11). Se l'occhio fissa il punto  $F$ , la sua immagine ("Fuoco") cade sulla fovea<sup>15</sup>; l'immagine di un altro punto  $A_{\infty}$ , distante da  $F$ , cade su un altro punto  $A'$ , distante dalla fovea, ma sempre sulla retina.

È questo il principio di funzionamento di una macchina fotografica, di una cinepresa o una telecamera: in luogo della pellicola, del CCD o di altra superficie sensibile, abbiamo la retina; in luogo dell'obbiettivo abbiamo il sistema «cornea + umor acqueo + cristallino + umor vitreo». L'immagine fornita da questo "obbiettivo" viene subito analizzata dalle cellule sensibili della retina e poi elaborata dai centri nervosi. Questa elaborazione spiega, fra l'altro, come mai le immagini retiniche, rovesciate, vengano percepite come diritte.

Fig. 11 - Schema per la formazione delle immagini retiniche nell'occhio emmetrope, cioè senza difetti di convergenza.

Se il muscolo ciliare è rilassato (occhio non accomodato), un oggetto puntiforme come  $A_{\infty}$  o  $F$ , a distanza infinita (molto grande) forma un'immagine sul fondo dell'occhio, cioè sulla retina ( $A'$  o "fuoco").

Da: A. FIORENTINI, Occhi ed occhiali, Fondaz. I. Porro, Giunti, Firenze, 1967, modif.



La prima differenza che si può notare fra occhio e macchina fotografica è che la retina non è piana come una pellicola, ma ricurva. Poiché il globo oculare deve ruotare all'interno dell'orbita, la sua rotazione in tutte le direzioni è facilitata dalla sua forma sferica. Ma la curvatura della retina non è una conseguenza dannosa della forma sferica del globo: essa si adatta alla curvatura dell'immagine; infatti, un sistema relativamente semplice come quello costituito da cornea e cristallino produce sempre un'immagine non piana, con la concavità verso la lente: è questo un esempio di un'aberrazione detta "curvatura di campo" (vedi O5, "Le aberrazioni" ed il manuale "Problemi tecnici della microscopia...", Cap. 13.1.1).

Dunque, sulla retina si forma un'immagine fedele del mondo esterno, più o meno tutta a fuoco. Curva la retina.

Una seconda differenza fra occhio e macchina fotografica sta nel sistema di messa a fuoco. Come è detto meglio nell'articolo O3, della serie "Esperienze di Ottica", oppure nel manuale "Problemi tecnici della microscopia...", Cap. 2.6 ed in qualunque trattato di fisica, diminuendo la distanza fra l'oggetto e la lente, aumenta la distanza lente-immagine. Affinché l'immagine si formi sempre sulla superficie sensibile (pellicola o retina), indipendentemente (entro certi limiti) dalla posizione dell'oggetto, occorre un meccanismo di messa a fuoco che, nell'occhio, si chiama **accomodazione**. Nella macchina fotografica la messa a fuoco è ottenuta allontanando od avvicinando la lente alla pellicola per mezzo di un movimento a vite; nell'occhio invece è ottenuta modificando la forma (e quindi la "potenza") del cristallino<sup>16</sup>. La lente cristallina è, infatti, costituita da tessuto molle che può deformarsi sotto l'azione di fibre muscolari contenute nel corpo ciliare: fibre circolari (muscolo di Müller) e radiali (muscolo di Brücke)(vedi sopra ed in fig. 7).

- Le fibre muscolari del corpo ciliare sono innervate dal nervo "oculomotore comune", il terzo dei nervi cranici, che contribuisce anche al "sistema parasimpatico". Questo nervo comanda anche il muscolo

<sup>15</sup> Si tratta di un'approssimazione: si presuppone intanto che  $F$  giaccia sull'asse dell'occhio, ma l'asse geometrico di simmetria dell'occhio non passa esattamente per la fovea.

<sup>16</sup> In molti pesci, l'accomodazione è invece ottenuta spostando avanti ed indietro il cristallino, come nella macchina fotografica.

sfintere della pupilla (si chiama “sfintere” un muscolo anulare che provoca il restringimento di una qualunque apertura).•

Si noti che, pur essendo adibito all’accomodazione, il cristallino ha una potenza<sup>17</sup> di meno di 20 diottrie, cioè meno della metà della potenza della cornea (più di 40 D). La focale complessiva dei mezzi rifrangenti dell’occhio è di quasi 23 mm, equivalenti ad una focale di 17 mm in aria (quasi 60 D).

L’occhio in riposo è “accomodato” per la visione “all’infinito”, cioè per mettere a fuoco oggetti a distanza “infinita” o comunque superiore a qualche metro<sup>18</sup>. Quando fissiamo un oggetto lontano, dunque, i muscoli del corpo ciliare sono rilassati. Come conseguenza di ciò, risulta che tutti gli strumenti ottici da applicare all’occhio (binocoli, cannocchiali, mirini, microscopi, ecc.) dovrebbero fornire un’immagine virtuale “all’infinito” per consentire la visione con occhio rilassato, senza fatica. Purtroppo, molti costruttori, specie di mirini fotografici e visori, non rispettano questa condizione e presuppongono uno sforzo di accomodazione.

Quando invece si fissa un oggetto vicino (“a distanza finita”), occorre “mettere a fuoco” o “accomodare” l’occhio per avere l’immagine più nitida possibile sulla retina, quindi occorre modificare la forma del cristallino.

La distanza massima di messa a fuoco corretta (**punto remoto**) per un occhio normale è allora l’infinito; la distanza minima (**punto prossimo**) dipende da fattori individuali, in particolare dall’età. Per un occhio normale, il punto prossimo è a 10 cm dall’occhio a 20 anni, a 14 cm a 30 anni, a 30 cm a 40 anni, a 50 cm a 50 anni, a 4 metri a 60 anni. Questa graduale perdita del potere di accomodazione con l’età si chiama **presbiopia**; la persona presbite, se non ha altri difetti di vista, vede bene da lontano, ma vede sempre più sfocato, via via che l’oggetto si avvicina. Per correggere la presbiopia nella visione da vicino occorre “aggiun-gere potenza” all’occhio, cioè compensare con lenti convergenti la mancata accomodazione del cristallino. In assenza di altri fattori, ad un presbite completo occorrerà una lente da due diottrie (+ 2 D) per vedere nitidamente a 50 cm di distanza, da + 3 D a 33 cm, da + 4 D a 25 cm, ecc.

## Le ametropie

Se un occhio normale si usa chiamare **emmètrope**, un occhio in cui vi sia un difetto di convergenza dei mezzi trasparenti si chiama **amètrope**. L’ametropia può riguardare difetti di convergenza “sferica”, cioè difetti correggibili con lenti sferiche<sup>19</sup>. Vi sono due forme di tale ametropia.

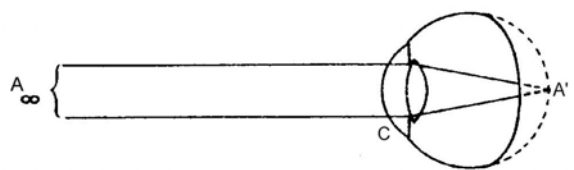
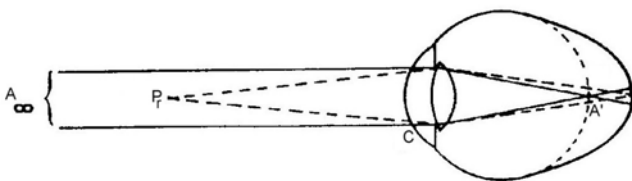


Fig. 12 - Schema di occhio miope.

Schema di occhio ipermetrope.

Da: A. FIORENTINI, Occhi ed occhiali, Fondaz. I. Porro, Giunti, Firenze, 1967, modif.

<sup>17</sup> La potenza di una lente, che si esprime in **diottrie (D)**, è pari all’inverso della sua lunghezza focale, espressa in metri.

<sup>18</sup> In ottica, una lunghezza si considera infinita quando è assai superiore alla focale o ad altri parametri delle lenti considerate.

<sup>19</sup> Trascuriamo qui altre forme di ametropia per difetti di potenza cilindrica (astigmatismo).

#### ◇◇ **Miopia** (fig. 12 a sinistra)

In sostanza, il fuoco dell'occhio, il punto di convergenza dei raggi provenienti da un oggetto lontano ( $A_\infty$  in fig. 12) si forma PRIMA della retina ( $A'$ , parte sinistra di fig. 12): la potenza dei mezzi convergenti dell'occhio (cornea e cristallino) è troppo elevata in confronto alla lunghezza del bulbo. La causa può venire da un eccesso di curvatura di quei mezzi convergenti o da un eccesso di indice di rifrazione del cristallino o dell'umor acqueo o, più spesso, da una forma allungata, non sferica, del bulbo.

Per avere la visione nitida, occorre che l'oggetto sia avvicinato all'occhio (il miope senza occhiali, infatti, tende sempre ad avvicinarsi agli oggetti che osserva); è come dire che il punto remoto (**Pr** nella parte sinistra di fig. 12) non è all'infinito come nell'occhio emmetrope (fig. 11), ma ravvicinato.

Il rimedio alla miopia (a parte interventi medici o chirurgici) è l'uso di occhiali con lenti divergenti, in grado di neutralizzare in giusta misura la potenza eccessiva delle lenti dell'occhio.

#### ◇◇ **Ipermetropia** (fig. 12 a destra)

Si tratta del difetto opposto: il fuoco, l'immagine di un oggetto lontano, si forma OLTRE la retina; l'immagine retinica è sfuocata per insufficiente potenza delle lenti dell'occhio o per insufficiente lunghezza del bulbo. La persona vede sfuocato da lontano ed ancor più per oggetti vicini. L'ipermetrope deve indossare lenti convergenti o "positive", la cui potenza si somma a quella (insufficiente) dell'occhio.

Naturalmente, un occhio non normale, affetto da ametropia sferica, non può essere contemporaneamente miope ed ipermetrope. Viceversa, la presbiopia o perdita di accomodazione si può verificare in un occhio miope o emmetrope o ipermetrope. Come si è detto, in una persona anziana la condizione di presbiopia è fisiologica.

Risulta anche che un'opportuna lente convergente può correggere allo stesso tempo presbiopia (per la visione da vicino) ed ipermetropia, mentre un miope che diventa presbite con l'età può veder bene da vicino senza occhiali e da lontano con occhiali divergenti.<sup>20</sup>

### LA VISIONE DEL RILIEVO E DELLA DISTANZA (visione stereoscopica)

Di solito noi percepiamo o valutiamo, almeno inconsciamente, non solo la forma ma anche il rilievo, cioè la profondità degli oggetti e la loro distanza da noi: li percepiamo "in tre dimensioni".

Questo apprezzamento viene compiuto non dall'occhio ma dai centri nervosi, in base a vari elementi:

- gli oggetti davanti o dietro a quello fissato (quello su cui l'occhio accomoda) appaiono più o meno sfocati;
- per fissare oggetti più o meno lontani dobbiamo usare diversamente l'accomodazione;
- gli oggetti appaiono più piccoli quando sono più lontani; questo meccanismo di valutazione si basa sul fatto che, spesso, l'esperienza ci indica le dimensioni normali degli oggetti;
- i nostri occhi distano fra loro di 6 - 7 cm; dunque, gli oggetti vicini vengono visti dai due occhi da un punto di vista diverso. Questo significa che le due immagini retiniche sono leggermente diverse. I nostri centri nervosi riescono a "fondere" le due immagini, nel senso che ci danno la percezione di un unico oggetto, ma la differenza fra le due immagini, che dipende dalla distanza dell'oggetto, fornisce un elemento in più per valutare la distanza da noi dei vari oggetti o dei vari punti di un oggetto, quindi la profondità di esso. Questo meccanismo, importantissimo, non funziona per oggetti più lontani di 10 o 20 metri poiché la differenza fra le due immagini retiniche diviene insufficiente; rimangono gli altri meccanismi qui citati;

---

<sup>20</sup> Col passare degli anni, oltre alla presbiopia, è normale il presentarsi di una debole ipermetropia (per almeno una diottria), per cui il presbite deve spesso indossare lenti convergenti, per vedere da vicino, più forti di quanto sarebbe dovuto alla sola presbiopia. Per guardare da lontano, inoltre, esso ha ancora bisogno di deboli lenti convergenti.

– per fissare oggetti vicini dobbiamo “convergere” gli occhi: se chiamiamo “asse visuale” la direzione di fissazione, cioè quella retta che passa per la pupilla e per la fovea, ossia la direzione dello sguardo che ci dà la visione più distinta, allora gli assi visuali dei due occhi sono paralleli quando fissiamo un punto molto lontano, ma convergono sempre più, via via che l’oggetto fissato si fa più vicino<sup>21</sup>. Questo movimento degli occhi fornisce ai centri nervosi un’altra informazione sulla distanza dell’oggetto.

Questi centri, attraverso vari circuiti nervosi, comandano dunque, spesso al di fuori della nostra coscienza, vari movimenti; abbiamo esaminato già l’accomodazione e la convergenza. Ma anche il restringimento della pupilla è legato per via riflessa all’accomodazione. Tutti questi meccanismi neuro-muscolari dipendono da centri nervosi che sono collegati fra loro, per cui l’uno influenza spesso anche gli altri. In senso lato si può parlare di meccanismi riflessi, ma comunque i nostri centri nervosi, attraverso gli stessi impulsi motori che inviano ai muscoli o tramite appositi sensori disseminati un po’ dovunque, ricevono tutte le informazioni sulla contrazione dei muscoli oculomotori, ciliari e pupillari, informazioni utili per valutare lo stato di convergenza e di accomodazione, e quindi la profondità e la distanza degli oggetti che osserviamo.

Con la volontà, e magari con un certo esercizio, è possibile comandare alcuni di questi movimenti dell’occhio: per lo meno la convergenza (“fare gli occhi storti”, cioè creare uno strabismo volontario) e l’accomodazione (chiudendo un occhio per non essere influenzati dalla convergenza, si possono fissare con l’altro occhio vari oggetti a diversa distanza, a condizione di non essere presbiti).

## LE ILLUSIONI OTTICHE

Una prima elaborazione delle immagini viene eseguita nella retina stessa. Infatti, non si pensi che per ogni cono o bastoncello vi sia una fibra nervosa che attraversa il nervo ottico e comunica ai centri nervosi la composizione, punto per punto, dell’immagine retinica<sup>22</sup>. In un sensore fotografico digitale (CCD o simili), ogni “pixel”, cioè ogni elemento sensibile, invia un segnale individuale all’elettronica di elaborazione; ma la retina umana contiene, come già detto, circa 130 milioni di cellule sensibili (130 megacellule, si direbbe in gergo elettronico) ed un nervo ottico con 130 milioni di fibre avrebbe un diametro di diversi centimetri. Impraticabile. Il nostro nervo ottico contiene, infatti, circa 1 milione di fibre: come dire che i segnali di oltre cento cellule confluiscono in una fibra sola.

Nella retina allora, a causa delle fitte interconnessioni fra le cellule bipolari e le gangliari, i segnali delle singole cellule sensibili sono integrati in modo da venire “ridotti” in segnali meno numerosi ma più complessi: per es. una linea, una macchia di un certo colore, ecc. I segnali complessi sono così ridotti di numero e la quantità di fibre nel nervo ottico è compatibile con le esigenze anatomiche del nervo stesso e del cervello.

Ma non possiamo limitarci all’elaborazione retinica delle immagini. Occorre infatti considerare alcuni fenomeni che dipendono dall’interpretazione delle immagini ricevute dal nostro occhio. Interpretazione dovuta non tanto alle funzioni svolte dall’occhio stesso, ma alla manipolazione dei segnali nervosi effettuata all’interno di organi specializzati del cervello, i “centri nervosi visivi”. Il senso della vista ci dà spesso delle impressioni errate sulla forma o sulle dimensioni degli oggetti, in quanto la nostra psiche formula incoscientemente delle ipotesi sulla base delle sue esperienze precedenti e le “proietta” sugli oggetti stessi. Come diceva un filosofo, noi non crediamo ciò che vediamo, ma vediamo ciò che crediamo (di vedere).

---

<sup>21</sup> La convergenza degli assi visuali è assicurata dai muscoli oculomotori interni che collegano il globo oculare al lato mediano della cavità dell’orbita.

<sup>22</sup> Questo vale soprattutto per i bastoncelli.

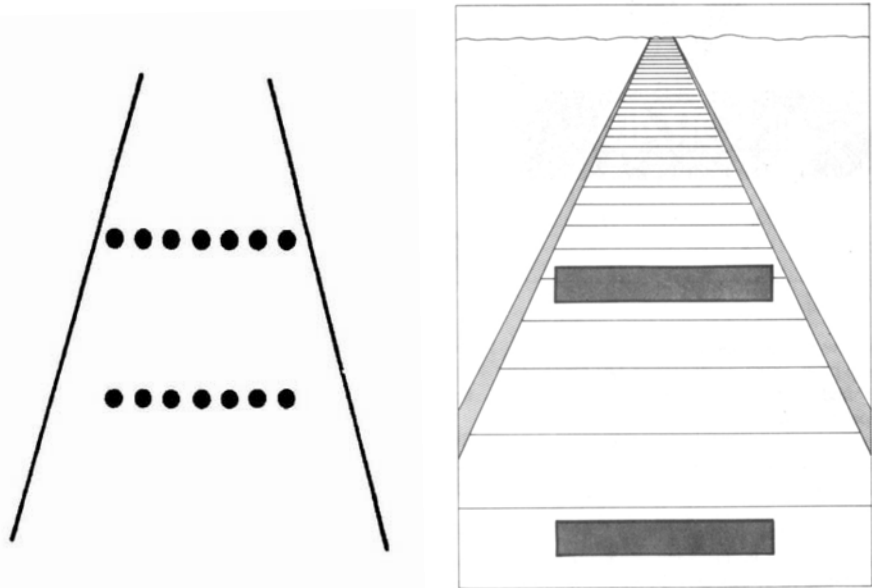
Si può parlare, più propriamente, di “illusioni ottico-geometriche”. La percezione appare in questi casi come un fenomeno unitario, non dovuto ad una somma di sensazioni, ma come costruzione globale, cui partecipa tutto il sistema percettivo, dalle cellule fotosensibili della retina, alle cellule ganglionari di essa (capaci di una prima elaborazione), ai vari centri encefalici (capaci di rappresentare i vari elementi geometrici dell’immagine come elementi separati {linee verticali, orizzontali, ricurve, ecc.}), fino alla coscienza, che confronta l’immagine globale con le esperienze precedenti, la memoria, ecc.

Vediamo qualche esempio.

La lunghezza di un segmento viene stimata dal nostro cervello non per una misura assoluta, ma per confronto con strutture geometriche vicine (fig. A).

Fig. A

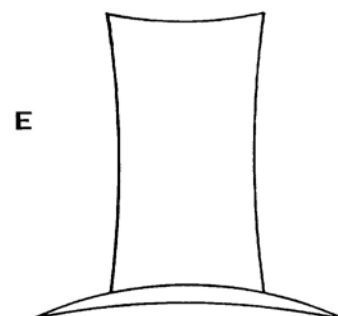
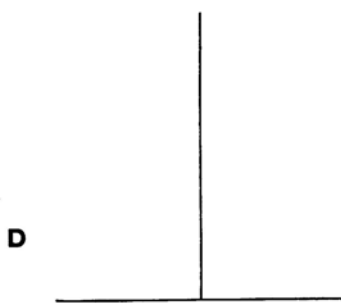
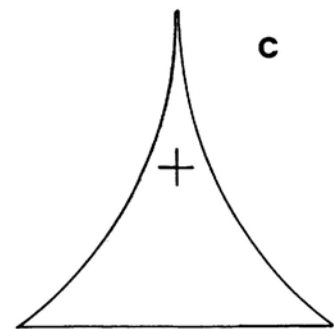
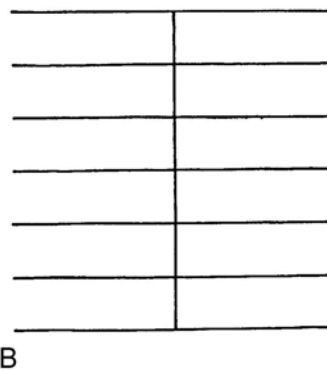
Nelle figure qui accanto, la “illusione di Ponzo” o “dei binari” ci porta a vedere la fila superiore dei pallini, o il rettangolo superiore, come più lungo del suo corrispettivo in basso, ma sono identici.



Le figure B , C , D ed E hanno un’altezza identica alla larghezza.

Fig. B - E

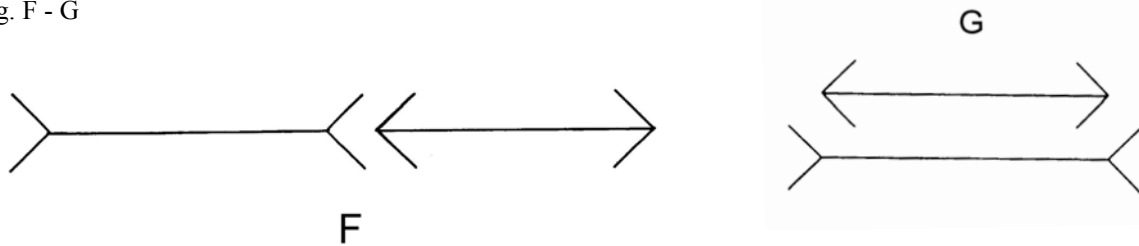
Evidentemente, l’uomo è vissuto nei lunghi tempi della sua evoluzione, in mezzo ad alberi più alti che larghi, e con lo stesso criterio interpreta tutto ciò che vede. Anche se la figura è ruotata di 90° (D2), tende sempre a vedere il segmento centrale più lungo (gli ricorda un albero abbattuto?).



D2

In B , si osserva che un segmento appare tanto più lungo quanto più è diviso. La crocetta nella figura C si trova esattamente a metà altezza. Nelle figure D e D2 , i due segmenti hanno la stessa lunghezza.

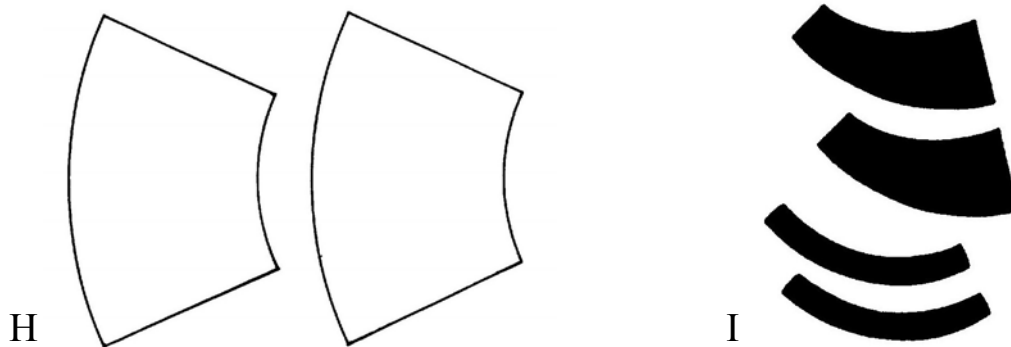
Fig. F - G



Nelle figure F e G si illustra l'“effetto di Müller-Lyer”, dovuto alla diversa inclinazione dei segmenti a freccia terminali. I quattro segmenti orizzontali sono uguali, ma non appaiono tali.

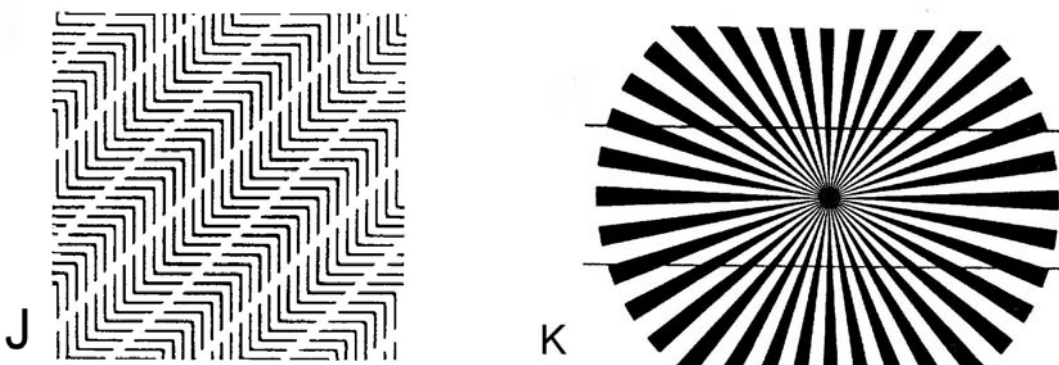
I due settori circolari di ogni coppia nelle figure H ed I sono ancora identici. Si parla di “effetto di contrasto”.

Fig. H - I



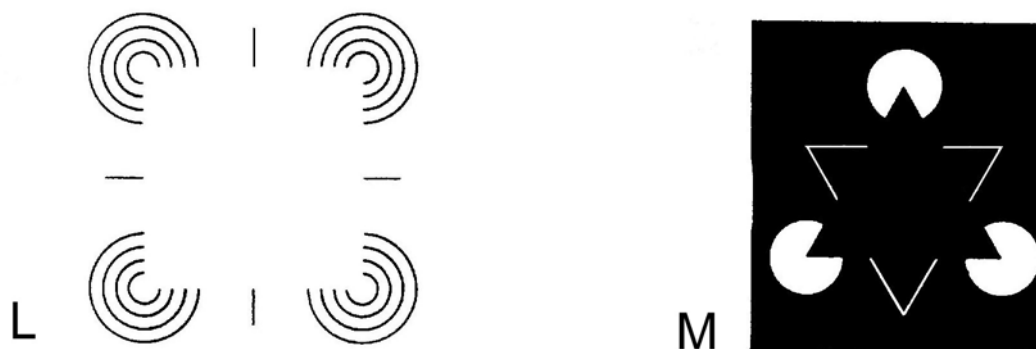
Le linee principali di fig. J e K sono parallele fra loro. La figura J si chiama “linee di Zöllner”. In essa, la percezione del parallelismo è alterata dai segmenti trasversali.

Fig. J - K



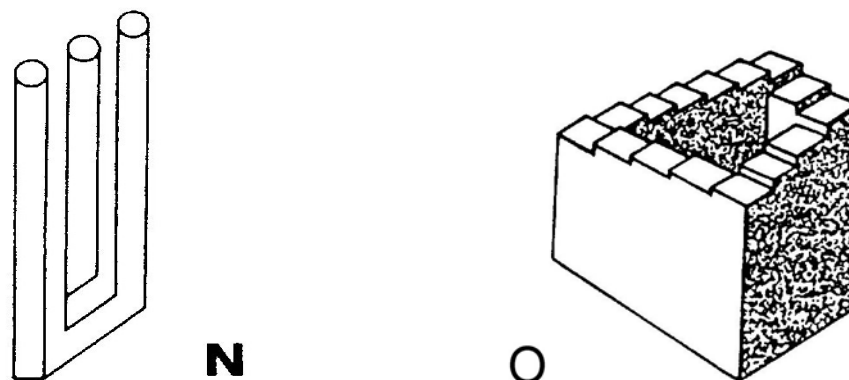
Nelle figure L ed M non vi sono né quadrati né triangoli. Solo elementi grafici che li suggeriscono. E l'occhio completa l'immagine aggiungendo ciò che manca per avere ciò che gli è più familiare: un quadrato ed un triangolo.

Fig. L - M



Nelle figure N ed O, la forma dell'oggetto è "impossibile", nel senso che l'oggetto suggerito non è realizzabile. Qui, la nostra tendenza a vedere una figura "realistica" si oppone con un disegno astratto che non rappresenta alcun oggetto "possibile". Non si tratta di un'illusione in senso stretto, ma di una nostra abitudine a considerare oggetti reali, che si scontra con un disegno volutamente irreali.

Fig. N ed O

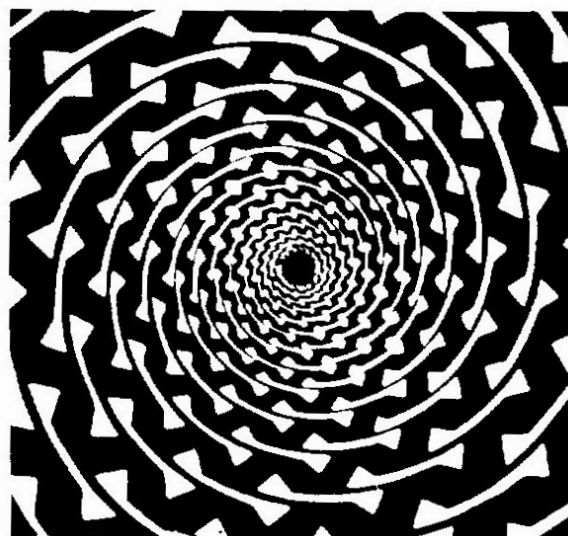


La figura P si può definire sconvolgente.

Fig. P

Se si seguono con una punta di matita le file ricurve di segmenti, ci si accorge che sono circolari, tanti cerchi concentrici. Eppure appaiono come spirali, poiché i singoli segmenti (quelli terminati da due triangolini) non giacciono sul cerchio, ma sono inclinati rispetto ad esso, e l'occhio si fa ingannare da questa inclinazione. Solo il centro dei segmenti (od uno dei loro estremi) giace sempre su un cerchio.

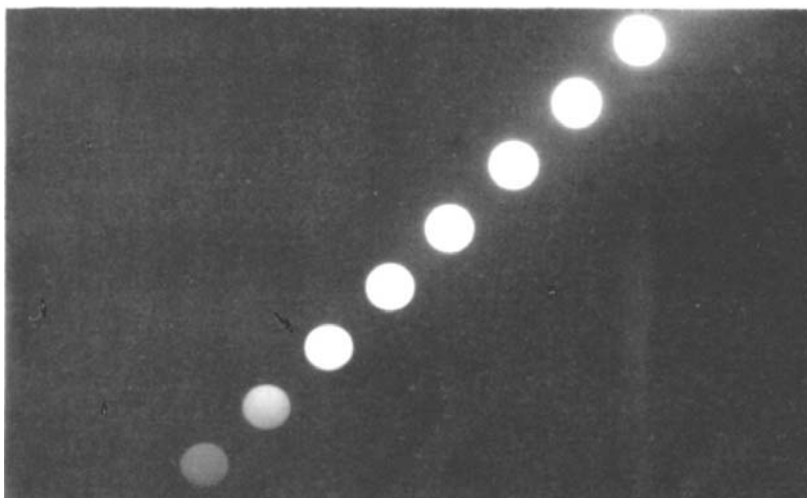
Da: R. W. Pohl.



Un vecchio problema riguarda la valutazione delle dimensioni di un oggetto: il nostro occhio (o il nostro cervello) colloca incoscientemente ogni oggetto osservato nell'ambiente complessivo e lo valuta in relazione a ciò che lo circonda. La luna od il sole, se vicini all'orizzonte, vengono stimati come vicini a noi e quindi più grandi. Se alti nel cielo, ci sembrano più piccoli. La cosa appare evidente nel caso della luna, che si può fissare senza restare abbagliati. Però .... (fig. Q).

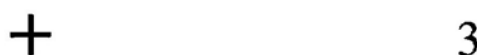
Fig. Q

Qui entra in gioco l'“effetto orizzonte”: ciò che è vicino all'orizzonte, come la luna od il sole all'alba od al tramonto, ci appare più grande, semplicemente perché lo interpretiamo come più vicino a noi, alla nostra portata. Ma la fotografia del sole in tempi successivi, con una serie di esposizioni (distanziate di pochi minuti l'una dall'altra), a macchina fotografica fissa, dimostra che il diametro del sole non cambia, salvo lo schiacciamento subito dopo il sorgere, dovuto alla rifrazione sulla superficie superiore dell'atmosfera, che si comporta all'incirca come una lente cilindrica.



Ma le cose sono più complicate, quando si tratta della “concentrazione”, della nostra capacità di isolare un oggetto da un campo visivo complesso. Un limite a questa capacità appare nel “fenomeno dell'affollamento” (“crowding”) di fig. R.

Fig. R - Gli effetti dell'“affollamento”



Fissando attentamente la croce qui sopra, con uno o due occhi, è possibile riconoscere il numero 3, sulla destra, con la “coda dell'occhio”: i nostri centri nervosi di “riconoscimento delle forme” e “interpretazione dei numeri” sono attivi.



Fissando ora la croce nella figura qui sopra è quasi impossibile il riconoscimento della cifra 3. Nulla è cambiato, salvo il fatto che la cifra 3 è ora circondata da altre cifre: i nostri centri nervosi sono “distratti” e non riescono a concentrarsi sulla cifra centrale del gruppo.

Altra illusione ottica è quella che ci fa apparire diverse le dimensioni di due oggetti uguali, quando il loro contrasto rispetto al fondo è diverso. Si parla di “irradiazione” in quanto l'oggetto più chiaro del fondo “si allarga” e sembra invadere il campo, mentre quello scuro sembra restringersi (Fig. S). Ciò dipende dal fatto che la zona più illuminata sulla retina irradia un poco di luce verso le cellule che la circondano e le zone chiare s'ingrandiscono per diffusione.

Fig. S - La “irradiazione” altera le dimensioni apparenti degli oggetti.



Concludendo, non fidiamoci di ciò che ci appare: le nostre percezioni ed i nostri giudizi (di solito) c’ingannano.

-----

PS: Nell’articolo O 12 (“L’Occhio”, della serie “Esperienze di ottica”), viene illustrato un dispositivo didattico che può chiarire alcune funzioni ottiche dell’occhio: la formazione delle immagini retiniche, le ametropie sferiche e la loro correzione con lenti da occhiali “sferiche”.

Si tratta di un pallone sferico di vetro di circa 500 cc di capacità, pieno di acqua intorbidata con poche gocce di inchiostro di china bianco. Il pallone è un modello del globo oculare; da un lato di esso si può sistemare una lente convergente (modello della cornea + cristallino); il lato opposto rappresenta il fondo oculare con la retina.

Tre diverse lenti sono montate su una tavoletta che può scorrere davanti al “globo”. Con esse si può simulare il comportamento dell’occhio miope, emmetrope ed ipermetrope.

Con altre lenti da occhiali, è possibile dimostrare la correzione di queste ametropie e simulare anche l’astigmatismo.