

## O 12 - L'OCCHIO

In quest'articolo vogliamo illustrare l'occhio umano dal punto di vista strettamente "ottico", considerandolo cioè come uno strumento ottico, senza occuparci troppo della sua anatomia e della sua istologia (struttura a livello di tessuti). Per una visione più naturalistica, per approfondire l'anatomia e la fisiologia dell'occhio, si faccia riferimento all'articolo 6 "L'occhio umano", presente in questo sito nella serie "Approfondimenti di Scienze Naturali" o a qualche trattato di Anatomia umana, Anatomia Comparata e Fisiologia. L'articolo O3 ("Le lenti", in questa serie: "Esperienze di ottica") riassume la teoria della formazione delle immagini reali.

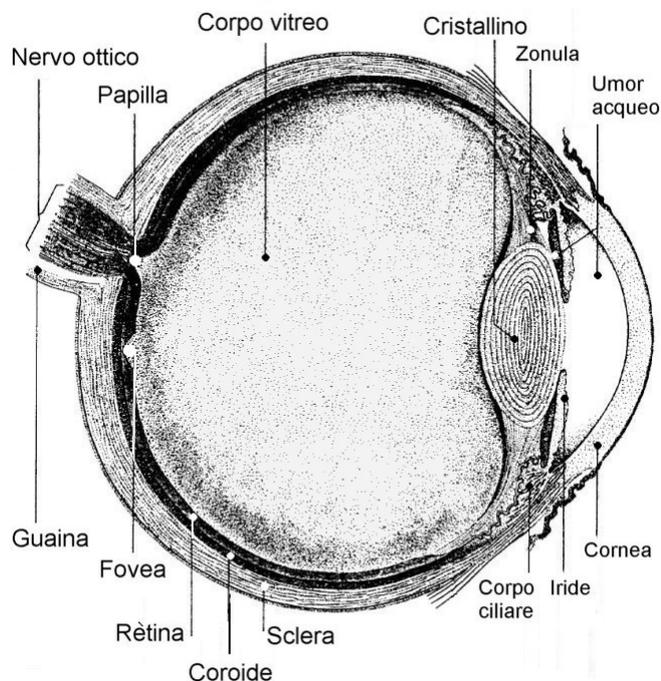
Vedremo poi di chiarire il funzionamento dell'occhio, sempre come strumento ottico, realizzandone un modello con materiali sempre facili da reperire. Rispetto a tutte le esperienze proposte finora, forse in questo caso occorrerà una ricerca più lunga per i materiali e qualche spesa in più, ma non sarà tempo perso.

Riassumiamo prima di tutto i dati essenziali sulle parti strettamente ottiche dell'occhio.

Fig. 195 - Sezione schematica dell'occhio umano destro, visto dall'alto.

Richiamiamo qui alcune immagini ed alcuni concetti già discussi nell'articolo 6 ("L'occhio umano e della maggioranza dei Vertebrati", in questo sito, nella serie "Approfondimenti di scienze naturali").

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



Dall'esterno all'interno, la parete dell'occhio fuori della cornea è costituita da tre strati (fig. 195):

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

2) **Coroide**, formata di tessuto più tenero, ricchissimo di sostanze coloranti (pigmenti) scuri. L'iride ed il corpo ciliare sono solo la parte anteriore della coroide, con caratteristiche particolari.

3) **Rétina**, 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>106</sup>. La rétina rappresenta lo strato fotosensibile dell'occhio. La sua zona centrale (**fòvea**) possiede una risoluzione assai maggiore di tutta la parte restante.

Tutte le fibre provenienti dalle cellule fotosensibili convergono verso un punto della rétina (**papilla**, fig. 195) 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; rivelare la presenza di questo **punto cieco**<sup>107</sup> è facile; proponiamo un primo, semplice, esperimento (fig.

<sup>106</sup> Nell'occhio umano vi sono circa 4/6 milioni di coni e 100/130 milioni di bastoncelli.

<sup>107</sup> Il punto cieco si trova a circa 4 mm dalla "fovea" (vedi oltre), in direzione del naso.

196).

Ci si concentri bene sulla crocetta della fig. 196 utilizzando l'occhio destro, senza muovere l'occhio medesimo; l'occhio deve stare a circa 35 cm dal foglio; l'occhio sinistro deve stare chiuso. Se ora si avvicina lentamente il capo al disegno, verrà un momento in cui il cerchietto nero scomparirà: la sua immagine è caduta sul punto cieco. Basterà abbassare od alzare di poco lo sguardo perché il cerchietto riappaia. Se la cosa non funziona, è probabile che il foglio o il capo non stia ben dritto.



Fig. 196 - Figura per la dimostrazione del **punto cieco**.

Sul davanti, la retina si interrompe poco oltre la metà del bulbo; la corioide va un poco oltre, ispessendosi in un anello dotato di fibre muscolari (corpo ciliare) e terminando in un dischetto colorato (iride). Al centro dell'iride, un forellino a diametro variabile (pupilla) attraverso il quale entra la luce. Davanti e dietro la pupilla, una serie di mezzi trasparenti (dall'esterno: cornea, umor acqueo, cristallino, umor vitreo, fig. 195). Complessivamente, questi mezzi si comportano come una lente convergente la cui potenza è dovuta per circa 2/3 alla cornea ed 1/3 al cristallino.

## FUNZIONI OTTICHE DELL'OCCHIO

Intendiamo ora valutare il funzionamento dell'occhio in quanto costituisce 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. 197 (vedi anche l'articolo O3, "Le lenti", figg. 46-48). Se l'occhio sta fissando un oggetto puntiforme  $F$  a grande distanza, 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, detto "Fuoco", come farebbe una qualunque lente convergente. Abbiamo già descritto gli elementi convergenti dell'occhio: la cornea ed il cristallino (fig. 195 e, schematicamente, fig. 197). Se l'occhio fissa il punto  $F$  posto sul suo asse ottico, la sua immagine ("Fuoco") cade sulla fovea; l'immagine di un altro punto  $A_{\infty}$ , distante da  $F$ , cade su un altro punto  $A'$ , distante dalla fovea, ma sempre sulla retina.

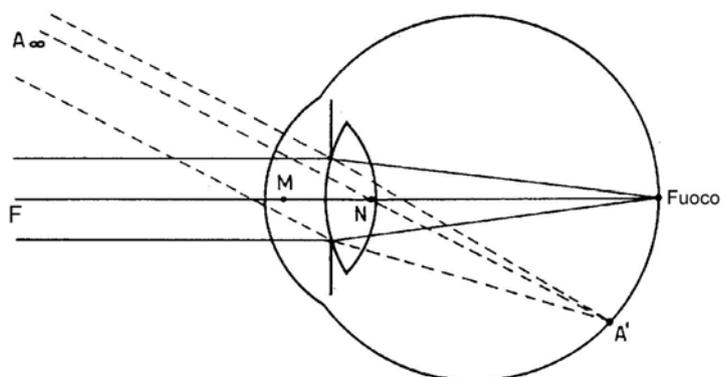
Dunque, sulla retina si forma un'immagine fedele del mondo esterno; tale immagine viene analizzata dalle cellule sensibili della retina e poi elaborata dai centri nervosi. Questa elaborazione spiega, fra l'altro, come mai le immagini retiniche, rovesciate, vengano percepite come diritte.

Fig. 197 - Schema per la formazione delle immagini sullo strato sensibile (retina) posto al fondo del globo oculare.

Due punti a grande distanza ( $A_{\infty}$  ed  $F$ ) formano un'immagine a fuoco sulla retina ( $A'$  e "Fuoco").

Si suppone un occhio senza difetti di rifrazione (emmetrope) e non "accomodato".

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



A parte questo, il principio di funzionamento è lo stesso di quanto avviene in una macchina fotografica, in una cinepresa o una telecamera: in luogo dell'obiettivo abbiamo il sistema «cornea + umor acqueo + cristallino + umor vitreo»; in luogo della pellicola o di altra superficie sensibile, abbiamo la retina. L'immagine prodotta è sempre reale, rovesciata, impiccolita.

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 va considerata 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.

Una seconda differenza fra occhio e macchina fotografica sta nel sistema di messa a fuoco. Com'è detto meglio nell'articolo O3, "Le lenti", 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), occorre un meccanismo di messa a fuoco che, nell'occhio, si chiama **accomodazione**. Nella macchina fotografica la messa a fuoco è ottenuta allontanando o avvicinando la lente alla pellicola per mezzo di un movimento a vite; nell'occhio è ottenuta modificando la forma (e quindi la "potenza") del cristallino<sup>108</sup>. La lente cristallina è infatti costituita da tessuto molle che può deformarsi sotto l'azione di fibre muscolari contenute nel corpo ciliare (vedi sopra e in fig. 195): fibre circolari (muscolo di Müller) e radiali (muscolo di Brücke).

L'occhio in riposo è "accomodato" per la visione all'infinito, cioè per mettere a fuoco oggetti a distanza "infinita" o comunque di oltre un metro<sup>109</sup>. Quando fissiamo un oggetto lontano, dunque, i muscoli del corpo ciliare si trovano in posizione "di riposo". 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.

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 modificare la forma del cristallino; questo meccanismo entra in gioco di solito in maniera del tutto automatica ma, con qualche attenzione, soprattutto operando con un solo occhio, può essere dominato dalla volontà. In assenza di accomodazione, l'immagine di un oggetto vicino si formerebbe oltre la retina (fig. 202) e vedremmo "sfocato".

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 prèsbite, se non ha altri difetti di vista, vede bene da lontano, ma vede sempre più sfocato, via via che l'oggetto si avvicina. Quando si guarda vicino, per correggere la presbiopia occorre "aggiungere 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<sup>110</sup> (+ 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

Riassumiamo qui anche i principali difetti ottici delle "lenti" dell'occhio poiché il modello che proporremo fra poco consente di simulare anche quelle.

Se un occhio normale si può chiamare **emmétrope**, un occhio in cui vi sia un difetto di convergenza dei mezzi trasparenti si chiama **amétrope**. L'ametropia può riguardare difetti di convergenza "sferica", cioè difetti correggibili con lenti sferiche<sup>111</sup>. Vi sono due forme di tale ametropia.

◇◇ **Miopia** o "convergenza corta" (fig. 198, a sinistra)

In sostanza, il fuoco dell'occhio, il punto di convergenza dei raggi provenienti da un oggetto lontano ( $A_\infty$ , in fig. 198) si forma PRIMA della retina ( $A'$ , parte sinistra di fig. 198): la potenza dei mezzi convergenti dell'occhio miope (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

<sup>108</sup> In molti pesci, l'accomodazione è invece ottenuta spostando avanti ed indietro il cristallino, a somiglianza di quanto avviene nella macchina fotografica.

<sup>109</sup> In ottica, una lunghezza si considera infinita quando è assai superiore alla focale o ad altri parametri delle lenti considerate.

<sup>110</sup> Il simbolo D indica la diottra, l'unità di misura della potenza (potere convergente) di una lente. La potenza di una lente, espressa in diottrie, è pari all'inverso della sua focale, espressa in metri. L'uso delle diottrie è comune per le lenti da occhiali. In ottica generale, si preferisce indicare la focale, espressa in mm.

<sup>111</sup> Alla fine, accenneremo anche ad altre forme di ametropia per difetti di potenza cilindrica (astigmatismo).

forma allungata, non sferica, del bulbo.

Per avere la visione nitida, occorre che l'oggetto venga avvicinato all'occhio (il miope senza occhiali infatti tende sempre ad avvicinarsi agli oggetti che osserva); è come dire che il punto remoto ( $P_r$  nella parte sinistra di fig. 198) non è all'infinito come nell'occhio emmetrope (fig. 197), ma è ravvicinato. Solo un oggetto posto in  $P_r$  può dare un'immagine a fuoco sulla retina del miope (linee tratteggiate in fig. 198, sinistra).

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

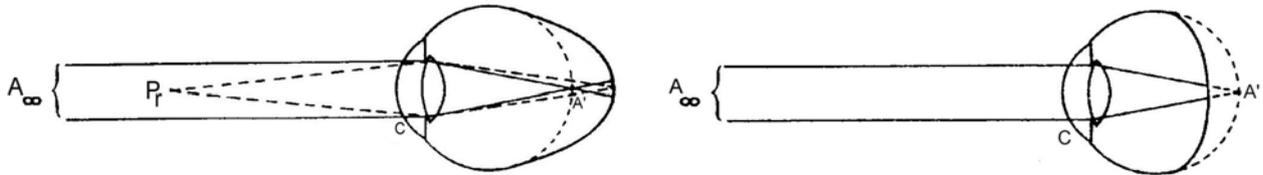


Fig. 198 - Schema di occhio miope.

Schema di occhio ipermetropico.

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

#### ◇◇ Ipermetropia o “convergenza lunga” (fig. 198 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 (il punto  $A'$  si allontana). L'ipermetropico deve indossare lenti convergenti o “positive”, la cui potenza si sommi a quella (insufficiente) dell'occhio.

Naturalmente, un occhio non normale, affetto da ametropia sferica, non può essere contemporaneamente miope ed ipermetropico. Viceversa, specialmente in una persona anziana, la presbiopia o perdita di accomodazione si può verificare in un occhio miope o emmetrope o ipermetropico.

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.

Vediamo ora di simulare questo funzionamento ottico del nostro occhio realizzando un

#### MODELLO di OCCHIO UMANO.

Materiali occorrenti:

-- pallone in vetro da 500 CC, reperibile presso un negozio di vetrerie per laboratorio, oppure bottiglia sferica, come si usa per certi liquori<sup>112</sup>; riempire con sospensione molto diluita di tempera bianca o di inchiostro di china bianco. La sospensione che si forma è torbida e rende visibile il passaggio di un eventuale fascio di luce (cominciare con una goccia ed aggiungere inchiostro finché diviene visibile il fascio di luce, come appare nelle figure seguenti). Se il pallone mostra delle irregolarità nella superficie ed il fascio appare deformato, si provi a ruotare il pallone attorno alla verticale, sperando che la parte difettosa esca dal tragitto utile.

-- supporto per detto (B in fig. 199), da realizzare con pezzi di legno incollati.

-- supporto scorrevole (T) per tre lenti: L3 ( $f =$  circa 90 mm {per simulare un occhio miope}), L2 ( $f =$  110 mm {emmetrope}) ed L1 ( $f =$  130 mm {ipermetropico}); tali lenti possono essere costituite da obiettivi da binocolo, di recupero<sup>113</sup>, oppure da lenti per occhiali con potenza, rispettivamente, + 11 o + 12 D / + 9 D / + 7 o + 8 D. Se la capacità del pallone non è di 500 CC, occorre modificare la potenza delle lenti (che diventerà maggiore se più piccolo è il pallone). La tavoletta T, dello spessore di almeno 1 cm, deve portare tre fori in cui le lenti saranno fissate con blocchetti di plastilina o qualche goccia di adesivo (fig. 199). Il diametro delle lenti sia di circa 3 cm.

<sup>112</sup> L'essenziale è che la curvatura delle pareti sia regolare, colle minime deviazioni possibili dalla forma sferica.

<sup>113</sup> Per conoscere la focale di una lente, purché sia sottile, basta rivolgerla verso il sole od altra sorgente lontana; con un pezzo di carta si cerchi l'immagine più nitida possibile della sorgente e poi si misuri la distanza fra lente ed immagine. La lente deve essere perpendicolare alla retta che congiunge la sorgente con la lente stessa.

-- lenti per occhiali con potenza sferica = + 2 o + 3 D e - 3 D e cilindrica + 2 o + 3 D, da anteporre alle lenti di cui sopra per dimostrare l'effetto degli occhiali.

-- una sorgente molto piccola da porre a circa 40 cm dalle lenti. Si può usare la lampada da auto di fig. 7/8 (vedi O1 - "La Rifrazione"), ma sarebbe meglio una comune lampadina "alogeno" da 12 V, 100 W, reperibile presso un elettricista assieme al relativo porta-lampada e ad un adatto trasformatore. Quest'ultima lampadina produce molto calore ed irradia nell'ambiente troppa luce diffusa; occorre quindi racchiuderla in qualche scatola metallica (L nella fig. 200), munita di fori d'aerazione (2, 3 e 4) e di un foro di circa 20 mm di diametro per l'uscita della luce (1).

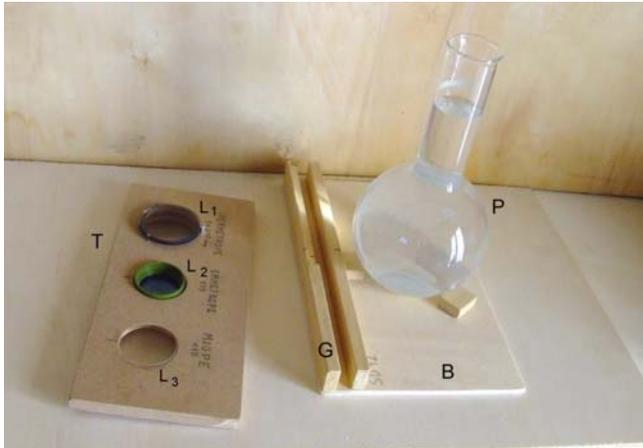


Fig. 199

Un pallone in vetro (P) ed il suo supporto (B). I tre blocchetti di legno sulla piastra di base debbono essere posizionati in modo da impedire al pallone di spostarsi.

I due righelli G, sempre incollati al lato sinistro della base B, creano un canaletto in cui può scorrere la piastra T. Su questa occorre praticare tre fori per fissarvi le tre lenti L1 - L2 - L3. Le tre lenti, come la lampada, debbono stare alla stessa altezza del centro del pallone.

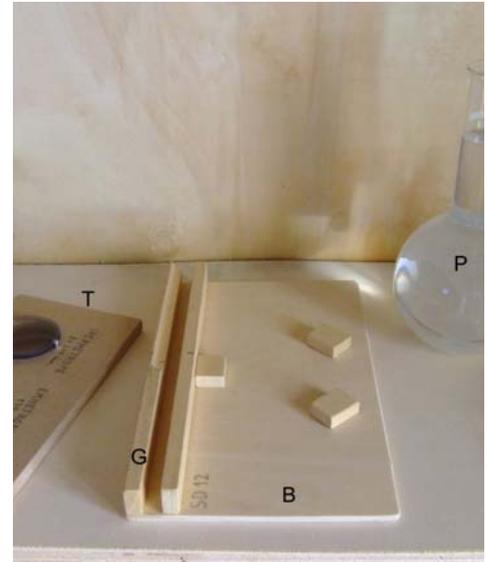


Fig. 200 - Disposizione generale per la simulazione del funzionamento ottico dell'occhio umano. La piastra T porta tre lenti di diversa potenza (L1, L2, L3).

La scatola metallica L contiene la lampadina. Il cartoncino nero C serve ad impedire che il piano del tavolo produca un riflesso che creerebbe nel pallone un fascio spurio. La stessa funzione può essere svolta da un pezzo di stoffa nera poggiato al posto di C. È incredibile quanto sia importante questo dettaglio.

Il pallone è un modello del globo oculare; da un lato di esso si può sistemare una lente convergente (modello della cornea + cristallino: una delle lenti L1 - L2 - L3); il lato opposto rappresenta il fondo oculare con la retina.

Dunque, tre diverse lenti sono montate sulla tavoletta verticale T; questa può scorrere davanti al "globo" in modo che una qualunque delle tre lenti si può trovare centrata sulla retta

che congiunge la sorgente col centro del globo stesso (fig. 200).

Ognuna delle tre lenti della tavoletta T simula l'effetto complessivo delle lenti dell'occhio: cornea + cristallino; non sarebbe stato possibile inserire tali lenti nella posizione più naturale (la lente che simula la cornea dovrebbe trovarsi aderente alla superficie del pallone ed il cristallino all'interno del medesimo).

Il dispositivo consente di riprodurre il funzionamento dell'occhio umano (e dei vertebrati). Ponendo davanti al pallone, una dopo l'altra, le tre lenti della tavoletta verticale T, si realizza il comportamento dell'occhio normale ("emmetrope"), di quello miope e di quello ipermetrope; con le apposite lenti da occhiali sopra citate è possibile "correggere" o peggiorare questi due difetti. Con la lente cilindrica è anche possibile simulare il tipo più comune di astigmatismo: il punto di convergenza del fascio appare allungato, come si vede in fig. 204.

La sospensione di china bianca nel pallone rende visibile la convergenza del fascio operata dalle lenti; un pezzetto di carta poggiato sul lato posteriore del pallone (fig. 201 e 204) visualizza il punto di convergenza e la sua posizione.

La lente con focale = 110 mm, assieme ad un pallone da 500 CC, realizza la condizione di occhio emmetrope; quando si accende la lampadina, la sua immagine si formerà a fuoco sul fondo del pallone. Vedi la fig. 201. Vedi anche l'avvertenza alla fine del testo.

Fig. 201

Modello di occhio emmetrope. Con la lente L2, l'immagine dell'oggetto (la lampadina) si forma sul fondo del globo: è la macchia brillante F sul foglietto che è appoggiato al globo stesso ed è sorretto da una molletta da bucato.

Lo stesso risultato si sarebbe ottenuto colla lente a focale maggiore + una lente da occhiali da +2 o +3 D; è quanto si fa nella cura dell'ipermetropia.

Colla lente a focale minore (che simula la miopia), si otterrebbe ancora un'immagine a fuoco anteposandovi una lente da -2 o -3 D, cioè quella prescritta in molti casi di miopia.

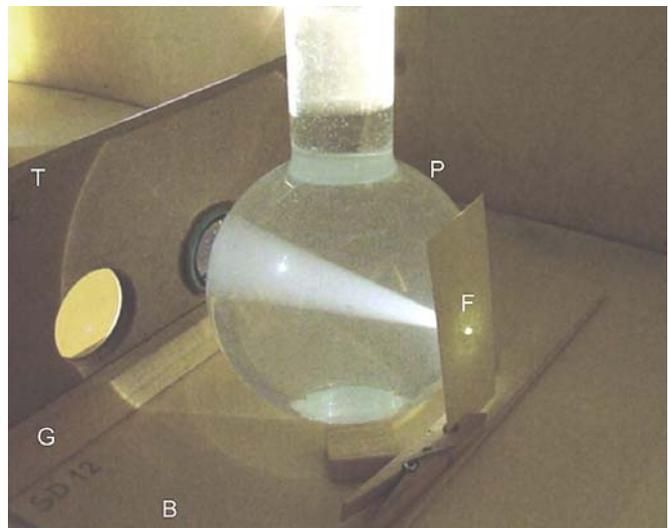
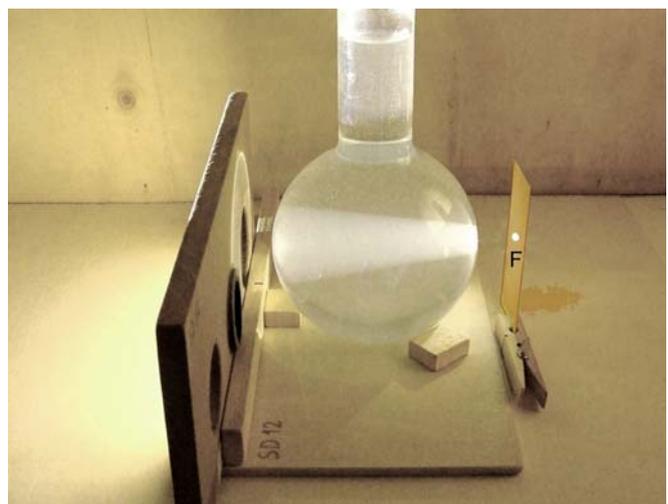


Fig. 202

Modello di occhio ipermetrope. L'immagine della lampadina (F) si forma oltre il fondo del globo; si vede bene che il fascio convergente non si concentra a livello della parete posteriore del globo, ma bensì all'esterno: in un occhio ipermetrope, questo significa che ogni punto dell'oggetto osservato produce una macchiolina più o meno estesa: si vede "tutto confuso".

Per riportare a fuoco l'immagine F basta anteporre alla lente da 130 mm una lente da occhiali da +2 o +3 D, quella che l'oculista prescrive per molti casi di ipermetropia.



La posizione del punto di convergenza è esterna al pallone con la lente di focale 130 oppure con quella di focale 110 + lente da occhiali da -3 D (fig. 202). Dunque, colla lente da 130 mm si simula l'occhio ipermetrope: l'immagine si forma oltre il fondo del globo (fig. 202); si può riportare a fuoco l'immagine del filamento della lampadina ("correggere l'ipermetropia") anteposando alla lente un "occhiale" formato da una lente convergente per occhiali da +2 o +3 D.

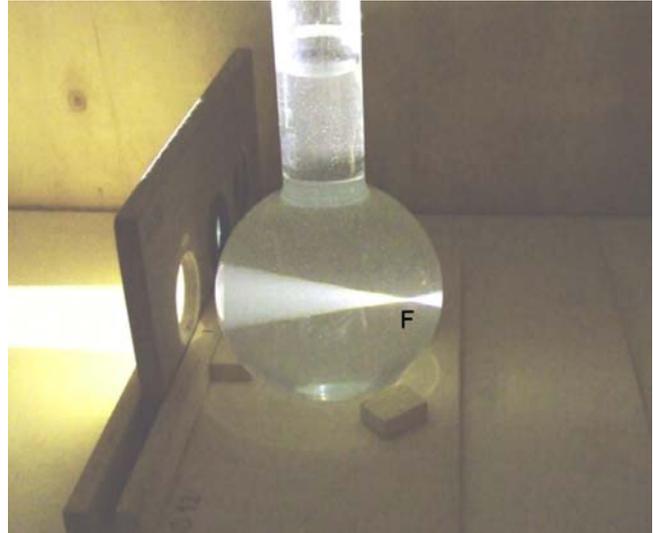
Se il punto di convergenza è interno al pallone (lente da 90 mm oppure lente da 110 mm + lente da occhiali da +3 D; fig. 203), sulla carta apparirebbe una macchia rotonda, data dal fascio che si è allargato oltre il punto di convergenza. Dunque, colla lente da 90 mm si simula l'occhio

miope: l'immagine si forma prima del fondo del globo (fig. 203) ed il difetto si corregge con una lente da occhiale divergente da  $-2$  o  $-3$  D.

Fig. 203

Anche nell'occhio miope, l'immagine di ogni punto dell'oggetto non si forma sul fondo dell'occhio e "si vede confuso", ma questa volta il punto di convergenza (F) è situato al di qua del fondo del globo.

Anche qui, si corregge la miopia del nostro modello antepoendo alla lente da 90 mm una lente da occhiali da  $-2$  o  $-3$  D.



Le lenti correttive da occhiali, appena citate, si possono fissare sulla tavoletta T (fig. 200), davanti ad una delle lenti L1 - L2 - L3, a mezzo di un pezzetto di scotch.

In conclusione, il punto di convergenza del fascio (che è l'immagine della sorgente) viene a formarsi PRIMA del fondo del pallone (che rappresenta il fondo dell'occhio, cioè la "retina") nell'occhio miope (fig. 203). Nell'occhio ipermetrope la convergenza avviene OLTRE il fondo (fig. 202). Deve COINCIDERE col fondo nell'occhio emmetrope (oppure nell'occhio miope + lente correttiva divergente  $-3$  D, oppure nell'occhio ipermetrope + lente convergente  $+2$  o  $+3$  D)(fig. 201).

Se ora si pone, davanti alla lente L2 a focale 110 mm (emmetrope) una lente da occhiali "cilindrica" da  $\pm 3$  D, il punto di convergenza non può più essere circolare, ma diventerà allungato (fig. 204).

Fig. 204

Una lente da occhiali, con potenza cilindrica =  $\pm 2$  o  $3$  D, senza potenza sferica, posta davanti alla lente L2 da 110 mm, trasforma un modello di occhio emmetrope in "astigmatico".



Ruotando la lente cilindrica attorno all'asse del nostro modello di occhio, l'orientamento della "focalina" astigmatica (F) varierà a volontà.

Con questa operazione abbiamo prodotto nel nostro modello un astigmatismo artificiale e potremmo correggerlo con un'altra lente di pari potenza, di segno opposto, orientata allo stesso modo. In una lente cilindrica, si considera come asse una direzione parallela all'asse del cilindro cui appartiene la superficie ricurva della lente.

Un'avvertenza: se il "fuoco", l'immagine del filamento della lampadina, non si forma esattamente sul fondo del pallone, o sul foglietto di carta ivi appoggiato (figg. 201 e 204), la cosa dipenderà probabilmente da un valore non corretto della focale delle lenti impiegate o del diametro del pallone in vetro. Si può in genere rimediare allontanando od avvicinando la lampada al pallone.