

# SOMMARIO

<b>I. ANATOMIA DELL'OCCHIO .....</b>	<b>3</b>
1.1 INTRODUZIONE .....	3
1.2 MEZZI PRE-RETINALI .....	4
1.3 RETINA .....	5
1.4 L'OCCHIO RIDOTTO .....	5
<b>II. VIZI DI REFRAZIONE.....</b>	<b>6</b>
2.1 INTRODUZIONE .....	6
2.2 EMMETROPIA .....	6
2.3 MIOPIA .....	6
2.4 ASTIGMATISMO .....	7
2.5 IPERMETROPIA.....	8
2.6 PRESBIOPIA.....	8
<b>III. CORREZIONI DEI VIZI DI REFRAZIONE .....</b>	<b>9</b>
3.1 OCCHIALI.....	9
3.1.1 <i>Materiali delle lenti per occhiali</i> .....	9
3.1.2 <i>Tipi di lenti per occhiali</i> .....	9
3.2 LENTI A CONTATTO .....	10
3.2.1 <i>Lenti a contatto morbide</i> .....	10
Vantaggi.....	10
Svantaggi .....	10
3.2.2 <i>Tipi di lenti a contatto morbide</i> .....	11
3.2.3 <i>Lenti a contatto rigide</i> .....	11
3.2.4 <i>Materiali per le lenti a contatto rigide</i> .....	11
3.2.5 <i>Lenti a contatto rigide gas-permeabili</i> .....	11
<b>IV. LA RETINA.....</b>	<b>12</b>
4.1 ANATOMIA E FISIOLOGIA.....	12
4.2 PRE-ELABORAZIONE RETINICA.....	16
<b>V. PATOLOGIE DELLA RETINA.....</b>	<b>18</b>
5.1 LA RETINOPATIA DIABETICA .....	18
5.2 DEGENERAZIONE MACULARE .....	18
5.3 OCCLUSIONE ARTERIOSA RETINICA.....	18
5.3.1 <i>L'occlusione dell'arteria centrale della retina</i> .....	18
5.3.2 <i>L'occlusione di branca dell'arteria centrale della retina</i> .....	19
5.4 OCCLUSIONE VENOSA RETINICA.....	19
5.4.1 <i>L'occlusione venosa di branca</i> .....	19
5.4.2 <i>L'occlusione della vena centrale della retina</i> .....	19
5.5 DISTACCO DI RETINA.....	19
5.6 LA RETINITE PIGMENTOSA .....	19
5.7 GLAUCOMA .....	20
<b>VI. NEUROFISIOLOGIA DELLA VISIONE.....</b>	<b>21</b>
<b>VII. PANORAMICA SULLE PROTESI VISIVE IMPIANTABILI.....</b>	<b>24</b>
7.1 DESCRIZIONE .....	24
7.2 POSSIBILI SITI DI IMPIANTO .....	25
7.3 REQUISITI FONDAMENTALI.....	26
7.4 REQUISITI AVANZATI.....	26
<b>VIII. PROTESI EPIRETINALI.....</b>	<b>27</b>
8.1 DESCRIZIONE .....	27

8.2 PATOLOGIE INDICATE .....	28
8.3 ESPERIMENTI SVOLTI.....	28
8.4 PROBLEMI IRRISOLTI .....	29
<b>IX. PROTESI SUBRETINALI.....</b>	<b>30</b>
9.1 DESCRIZIONE .....	30
9.2 PATOLOGIE INDICATE .....	31
9.3 ESPERIMENTI SVOLTI.....	31
9.4 PROBLEMI IRRISOLTI .....	31
<b>X. PROTESI CORTICALI.....</b>	<b>32</b>
10.1 DESCRIZIONE: .....	32
10.2 PATOLOGIE INDICATE .....	33
10.3 ESPERIMENTI SVOLTI.....	33
10.4 PROBLEMI IRRISOLTI .....	34
<b>XI. PROTESI RETINALI IBRIDE.....</b>	<b>35</b>
11.1 DESCRIZIONE .....	35
11.2 PATOLOGIE INDICATE .....	36
11.3 ESPERIMENTI SVOLTI.....	36
11.4 PROBLEMI IRRISOLTI .....	36
<b>Appendice A: ACUITA' VISIVA .....</b>	<b>37</b>
<b>Appendice B: OTTICA GEOMETRICA .....</b>	<b>38</b>
B.1 RIFLESSIONE E RIFRAZIONE .....	38
B.2 RIFRAZIONE SU SUPERFICI SFERICHE.....	39
B.3 LE LENTI SOTTILI.....	39
B.4 LENTI CONVERGENTI E LENTI DIVERGENTI.....	40
B.5 COSTRUZIONE GRAFICA DEI RAGGI LUMINOSI PER LENTI SOTTILI.....	42
B.6 COMBINAZIONE DI LENTI SOTTILI .....	42
<b>Appendice C: ESERCIZI.....</b>	<b>43</b>
ESERCIZIO 1 .....	43
ESERCIZIO 2 .....	43
ESERCIZIO 3 .....	44
ESERCIZIO 4 .....	44
ESERCIZIO 5.....	45

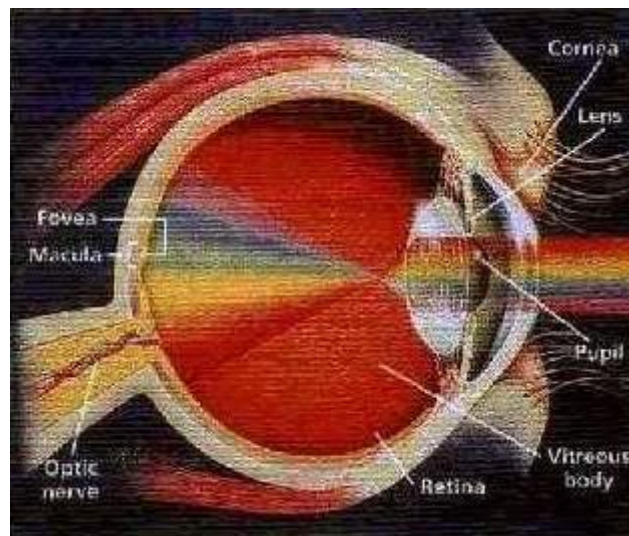
# I. ANATOMIA DELL'OCCHIO

## 1.1 INTRODUZIONE

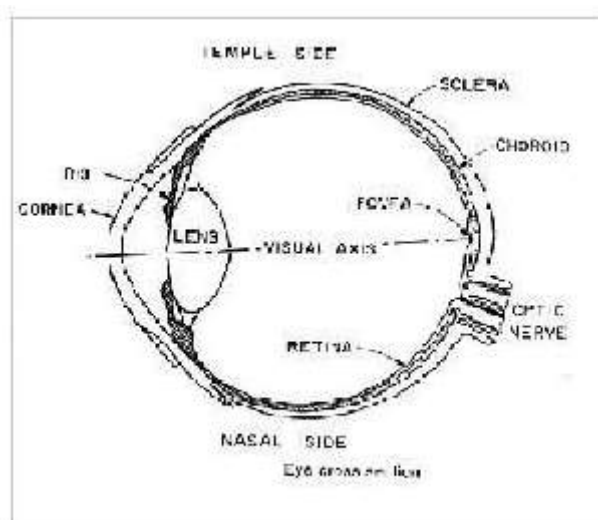
Il sistema visivo rileva e analizza gli stimoli luminosi costituiti da radiazioni elettromagnetiche con lunghezza d'onda compresa tra i 400 ed i 760 nm.

Le differenti lunghezze d'onda dello spettro visibile danno luogo a diverse sensazioni colorate, mentre le radiazioni con lunghezza d'onda inferiore a 400nm (raggi ultravioletti) o superiori a 760nm (raggi infrarossi) non vengono percepite dall'occhio.

La luce entra nell'occhio e, dopo essere stata focalizzata da un sistema di lenti naturali, stimola i fotorecettori (coni e bastoncelli) presenti in un tessuto altamente specializzato: la retina; qui le immagini subiscono una pre-elaborazione da parte degli interneuroni retinici e successivamente i segnali vengono trasportati al cervello attraverso un percorso nervoso detto "cammino ottico".



L'occhio umano, posto nella cavità orbitale, ha approssimativamente la forma di una sfera con diametro trasversale di circa 22 mm e antero-posteriore di circa 26 mm. E' costituito da una membrana esterna detta sclera, spessa e resistente, bianca opaca, che si trasforma nella sua parte anteriore in una membrana trasparente detta cornea. In riferimento alla figura si definisce asse ottico quell'asse che collega il polo anteriore dell'occhio alla fovea; esso forma un angolo di circa  $5^\circ$  con l'asse di simmetria dell'occhio (che collega il polo anteriore a quello posteriore).



Seguendo il percorso del raggio luminoso dall'esterno all'interno, nel sistema visivo, si incontrano (vedi figure precedenti):

- **mezzi pre-retinali:** cornea, umor acqueo, cristallino, iride-pupilla, umor vitreo, macula lutea;
- **retina:** cellule neuronali (cellule gangliari, bipolari, amacrine e orizzontali); fotorecettori; epitelio pigmentato e coroide;
- **vie sensoriali:** nervo ottico, nucleo genicolato laterale e corteccia visiva.

Bisogna, a questo punto, sottolineare l'insolita configurazione dell'intera struttura: i fotorecettori sono posizionati nello strato più interno della struttura mentre le cellule neuronali, deputate alla pre-elaborazione dello stimolo luminoso, sono poste nella zona più esterna, quella che per prima viene a contatto con la luce. Questo implica che gli strati superiori siano trasparenti e che il segnale viaggi attraverso la retina più di una volta prima di essere inviato al nervo ottico. Le spiegazioni circa la necessità di una struttura così complicata saranno fornite nel seguito di questa trattazione.

## 1.2 MEZZI PRE-RETINALI

- **Cornea:** La cornea, più convessa della sclera, completa l'involucro dell'occhio; attraverso essa entrano i raggi luminosi.

Ha uno strato centrale spesso, lo Stroma, largo circa  $650\mu\text{m}$ , racchiuso tra membrane semipermeabili a loro volta ricoperte da epitelio nel lato a contatto con l'aria e da endotelio sull'altro lato.

Lo Stroma è costituito di fibre di collagene ricoperte da mucopolisaccaridi. Il contenuto di acqua (75-80%) al suo interno è mantenuto costante da pompe attive e questo permette alla struttura di restare trasparente.

La cornea non è vascolarizzata e riceve nutrimento dall'umor acqueo.

La cornea rappresenta la principale superficie refrattiva dell'occhio ( $n=1.36$ ), combina proprietà di stabilità strutturale e trasparenza e mantiene costante la pressione intraoculare avendo una permeabilità selettiva. A questa struttura sono imputabili circa 40 delle 60 diottrie di potere convergente dell'occhio.

La radiazione incidente sulla cornea viene trasmessa per circa l'80% (in particolare la struttura proteica taglia la trasmissione degli UV e l'acqua taglia nella zona dell'infrarosso).

- **Umor Acqueo:** liquido acquoso che riempie lo spazio tra cornea e cristallino. Viene secreto dal corpo ciliato e circola dalla zona compresa fra iride e cristallino all'esterno attraverso il canale di Schlemm, posizionato nell'angolo tra iride e cornea. Questo ricircolo è abbastanza rapido: l'intero volume di liquido viene sostituito in due-tre ore.

Le funzioni dell'umor acqueo sono quelle di nutrire la cornea ed il cristallino e di fornire la pressione necessaria per preservare la forma dell'occhio e della cornea; avendo inoltre un indice di rifrazione più basso rispetto alla cornea ( $n=1.333$ ) assicura il potere refrattivo di quest'ultima.

- **Irìde-pupilla:** sistema a diaframma che controlla la quantità di luce che può raggiungere la retina. L'iride ha un'apertura centrale, la pupilla, che appare scura a causa del fondo dell'occhio.

- **Cristallino:** posto tra l'umor vitreo e l'umor acqueo, è sorretto dai muscoli ciliati che, contraendosi, gli permettono di variare con continuità il raggio di curvatura (accomodazione) e quindi potere di convergenza. Ne deriva un potere di accomodazione compreso entro un vastissimo campo, che per un organo normale si estende dal **punto remoto**, teoricamente all'infinito, al **punto prossimo**, situato a circa 8 cm dall'occhio. Costituito da cellule a nastro. Nel tempo nuove cellule vengono aggiunte nelle porzioni più esterne della struttura così che le cellule più anziane formano il nucleo centrale più denso e con maggiore indice refrattivo. Le cellule del cristallino sono racchiuse in una capsula non permeabile che gli impedisce di venire a contatto con gli anticorpi dell'organismo. Se, per qualche ragione, questa capsula viene danneggiata e le proteine fuoriescono, si scatena una vera e propria risposta immunitaria che porta gli anticorpi ad attaccare il cristallino non riconosciuto come "proprio".

Il cristallino, grazie all'azione dei muscoli ciliari, consente la messa a fuoco. Assorbe molto intorno agli UV riducendo così le aberrazioni cromatiche e questo conferisce alla struttura il tipico colore giallino che aumenta con l'età. Il suo indice di rifrazione vale  $n=1.41$ .

- **Umore vitreo:** occupa la porzione maggiore dello spazio intraoculare, tra cristallino e retina. Si tratta di un gel semisolido con alta percentuale di acqua.

Ha un basso indice refrattivo ( $n=1.336$ ) che serve a massimizzare il potere rifrattivo del cristallino. Ha attività fagocitaria per il mantenimento della limpidezza in caso di ingresso di corpi estranei provenienti dai tessuti vicini.

### ***1.3 RETINA***

E' una membrana formata da cinque diversi strati di neuroni specializzati tra cui i fotorecettori responsabili della trasduzione del segnale.

Il ruolo della retina è quello di codificare gli stimoli luminosi che cadono sulla sua superficie in un pattern di impulsi nervosi per il cervello.

### ***1.4 L'OCCHIO RIDOTTO***

Quando l'occhio mette a fuoco oggetti distanti il muscolo ciliare è completamente rilassato; in queste condizioni la distanza focale dell'occhio vale 16.7 mm: l'occhio può cioè essere rappresentato da una lente con  $f=16.7$  mm (pari a circa 60 diottrie) posta a 16.7 mm dalla retina. L'occhio mette a fuoco oggetti vicini tendendo il muscolo ciliare; questa azione diminuisce la distanza focale, diminuendo il raggio di curvatura del cristallino, il che permette all'immagine di essere focalizzata sulla retina.

Si definisce punto nodale il punto dell'asse ottico posto a 16.7 mm dalla retina.

Le risoluzioni laterale e angolare si possono calcolare con il modello dell'occhio ridotto tenendo conto della distanza dell'oggetto e della distanza media tra due fotorecettori nella retina (vedi esercizio 5).

## II. VIZI DI REFRAZIONE

### 2.1 INTRODUZIONE

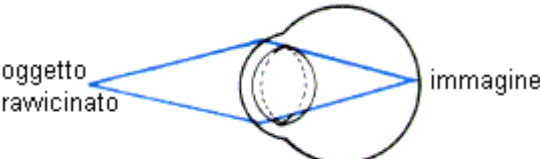
Con il termine "vizi di refrazione" si intendono tutti quegli errori di "messa a fuoco" delle immagini. La miopia, l'ipermetropia, l'astigmatismo e la presbiopia sono i più comuni. Per poter mettere a fuoco immagini su vari piani, l'occhio normale varia la curvatura del cristallino in modo tale che questo diventi più spesso quando l'occhio deve guardare un punto vicino, più sottile quando deve guardarne uno lontano. Mentre in un occhio normale (emmetrope) un punto posto all'infinito è a fuoco sulla retina quando il cristallino ha il minimo di curvatura, in un occhio ad esempio ipermetrope il cristallino deve aumentare la sua curvatura per poter mettere a fuoco lo stesso punto; e tanto più si avvicina il punto, tanto più il cristallino deve aumentare la sua curvatura.

Nell'occhio normale l'immagine si forma sulla retina dopo aver percorso i mezzi trasparenti refrattivi (cornea e cristallino), invece, nell'occhio con difetto refrattivo l'immagine non è a fuoco poiché la refrazione anomala forma l'immagine fuori sede:

- ◆ Anteriormente alla retina nel miope
- ◆ Posteriormente alla retina nell'ipermetrope
- ◆ Nell'astigmatismo (miopico, ipermetropico, misto) anteriormente o posteriormente alla retina sulla sezione di refrazione anomala (immagine asimmetrica fuori sede soltanto su una sezione o meridiano).

### 2.2 EMMETROPIA

Emmetropia è semplicemente un altro modo di definire un occhio che non presenta difetti ottici e sulla cui retina si forma un'immagine nitida. Per la visione da vicino, l'occhio sfrutta un sistema di messa a fuoco variabile: tale compito è assolto dal cristallino, il quale viene paragonato ad una lente dal potere variabile e conseguentemente adatto alla visione nitida a varie distanze. Questa funzione prende il nome di accomodazione.

Occhio emmetrope a riposo visione da lontano	Occhio emmetrope accomodato visione da vicino
 <p>oggetti lontano</p> <p>immagine</p>	 <p>oggetto ravvicinato</p> <p>immagine</p>
L'immagine di un oggetto lontano si forma sulla retina.	Il cristallino modifica la sua forma (accomoda). Un'immagine netta di un oggetto ravvicinato si forma sulla retina.

### 2.3 MIOPIA

Si verifica quando, in condizione di refrazione statica, i raggi luminosi che provengono da distanza infinita vengono messi a fuoco davanti alla retina in quanto il potere refrattivo del diotro oculare è eccessivo rispetto alle dimensioni del bulbo oculare.

Nella miopia il punto remoto non si trova all'infinito, ma a distanza finita, e il punto prossimo si trova più vicino all'occhio del normale.

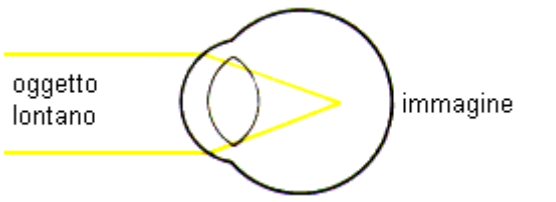
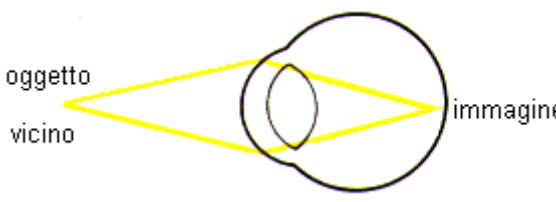
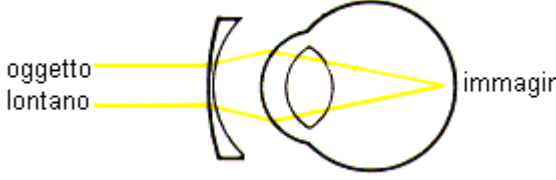
La miopia può essere dovuta sia a una lunghezza oculare eccessiva rispetto al potere ottico (miopia assiale), sia al potere ottico troppo elevato rispetto alla lunghezza dell'occhio normale (miopia refrattiva).

La miopia è generalmente causata da:

- Allungamento del globo oculare: è allungato in senso antero-posteriore (cioè lungo l'asse della pupilla)
- Una curvatura della cornea maggiore rispetto alla media
- Un aumento del potere refrattivo del cristallino, ossia una cataratta iniziale

- Una curvatura del cristallino maggiore rispetto alla media. Il cristallino, posto dietro la pupilla, non può diminuire la sua curvatura oltre un certo limite per cui i raggi luminosi anziché andare a riunirsi esattamente sulla retina, vanno a riunirsi in un punto situato anteriormente alla retina.
- Una tendenza esagerata all'accomodazione (messa a fuoco per vicino) da parte del cristallino che avviene, soprattutto in individui giovani, dopo un intenso sforzo visivo a distanza ravvicinata.

La miopia viene adeguatamente corretta con lenti divergenti ossia negative o concave che mettono a fuoco l'immagine dell'oggetto sulla retina.

<p><b>Occhio miope in visione da lontano</b></p>  <p>L'immagine di un oggetto lontano si forma davanti alla retina. L'occhio è troppo lungo o troppo potente. L'oggetto è visto sfuocato.</p>	<p><b>Occhio miope in visione da vicino</b></p>  <p>L'immagine di un oggetto a distanza avvicinata si forma sulla retina. L'oggetto è visto nitido.</p>
	<p>La miopia si corregge con lenti negative</p>

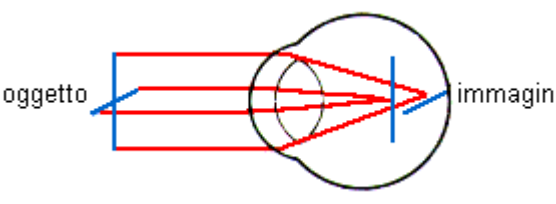
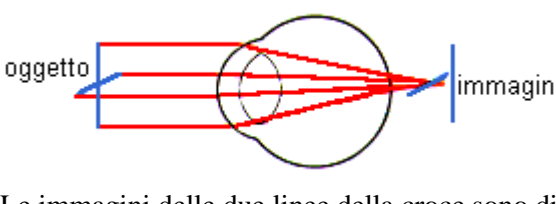
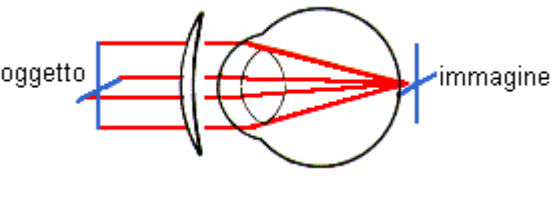
## 2.4 ASTIGMATISMO

L'astigmatismo è un difetto di vista dovuto alla irregolare curvatura della cornea.

L'occhio astigmatico in generale presenta due diversi meridiani, posti a 90 gradi l'uno rispetto all'altro, che producono una messa a fuoco differente delle immagini. I meridiani possono essere miopi, ipermetropi oppure emmetropi: di un oggetto potrà essere distinto nitidamente il bordo orizzontale ma non quello verticale o viceversa, oppure un cerchio potrà essere visto con forma ovale

La correzione viene effettuata con lenti cilindriche positive o negative, con lenti a contatto semi rigide o con lenti a contatto toriche morbide.

Due esempi fra i tanti che si possono verificare:

<p><b>Occhio miope astigmatico</b></p>  <p>Le immagini delle due linee della croce sono davanti alla retina.</p>	<p><b>Occhio ipermetrope astigmatico</b></p>  <p>Le immagini delle due linee della croce sono dietro la retina.</p>
	<p>La correzione per l'astigmatismo è rappresentata da una lente con un potere diottrico orientato in una particolare direzione.</p>

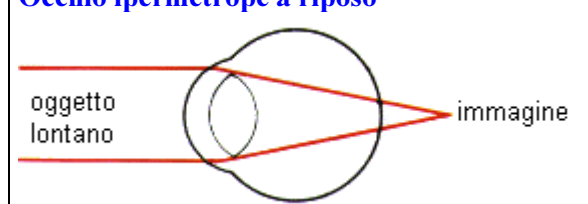
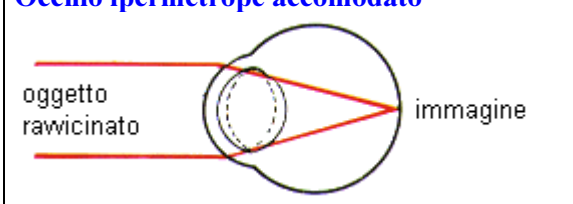

## 2.5 IPERMETROPIA

L'ipermetropia è un difetto dovuto a una minor lunghezza del diametro antero-posteriore del globo oculare per cui i raggi luminosi, rifrangendosi sulla lente del cristallino, si riuniscono in un punto situato oltre la retina. Affinché cadano su di essa occorre che il cristallino aumenti la sua curvatura. Da ciò derivano due conseguenze: innanzi tutto il cristallino non può aumentare la sua curvatura più di un certo limite, perciò l'occhio ipermetrope non può mettere a fuoco gli oggetti troppo vicini. Un'altra conseguenza è determinata dal fatto che il cristallino deve aumentare la sua curvatura anche per mettere a fuoco gli oggetti lontani, essendo il globo oculare troppo corto: per questa ragione il muscolo ciliare non è mai in uno stato di completo rilassamento.

L'ipermetropia è generalmente causata da due condizioni:

- Il globo oculare è più corto che di norma.
- La cornea è meno curva che di norma.

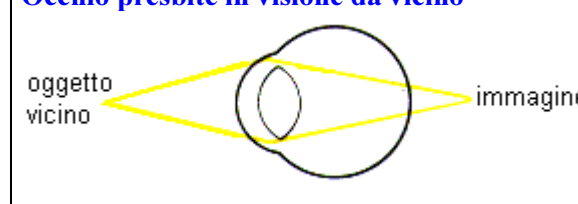
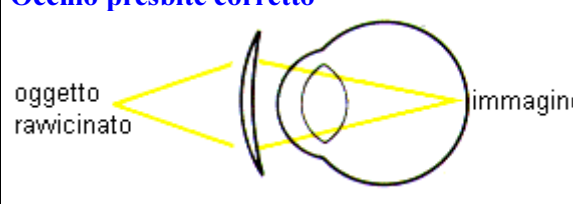
La correzione avviene con lenti positive e convergenti

<p><b>Occhio ipermetrope a riposo</b></p>  <p>L'immagine di un oggetto lontano si forma dietro la retina.</p>	<p><b>Occhio ipermetrope accomodato</b></p>  <p>Se l'ipermetropia è debole il cristallino accomoda per compensarla, ma provoca fatica.</p>
	<p>L'ipermetropia viene corretta con lenti positive</p>

## 2.6 PRESBIOPIA

L'accomodazione è il meccanismo che permette di mettere a fuoco, in rapida successione, immagini distanti ed immagini vicine; rappresenta quindi la normale capacità del cristallino di cambiare la messa a fuoco a seconda della distanza degli oggetti.

L'elasticità del cristallino è molto accentuata nel bambino, diminuisce col passare degli anni, fino a diventare nulla verso i 70. Divenuto il cristallino rigido, l'occhio non può più mettere a fuoco su varie distanze e, dato che il cristallino tende ad irrigidirsi nella posizione di minima curvatura, gli oggetti che l'occhio può mettere a fuoco sono sempre più lontani. Perciò mentre in un soggetto con occhio emmetrope il punto prossimo (cioè il punto più vicino che può vedere distinto) è, sui 20 anni, a circa 17 cm, sui 45 anni è a circa 40 cm. La presbiopia come l'ipermetropia, si corregge con l'ausilio di lenti convergenti (positive).

<p><b>Occhio presbite in visione da vicino</b></p>  <p>L'immagine di un oggetto ravvicinato si forma dietro la retina.</p>	<p><b>Occhio presbite corretto</b></p>  <p>La presbiopia si compensa con lenti monofocali, bifocali o progressive.</p>
---	--



## III. CORREZIONI DEI VIZI DI REFRAZIONE

### 3.1 OCCHIALI

Tutti i vizi di refrazione descritti possono essere corretti con l'ausilio di occhiali o lenti a contatto.

Gli occhiali sono strumenti versatili, pratici ed economici e fanno un ottimo lavoro nei difetti lievi; nei difetti medi ed elevati la loro validità è però ridotta per varie ragioni:

- Estetiche: le lenti sono molto spesse e danno brutti riflessi all'occhio (sono delle vere e proprie protesi);
- Pratiche: sono pesanti, scivolano spesso, lasciano i solchi sul naso e si appannano;
- Funzionali: le immagini sono modificate e la visione periferica è distorta;

Nemmeno l'introduzione in commercio di lenti con particolari geometrie costruttive e di materiali ad alto indice di refrazione è riuscita ad ovviare completamente a tali inconvenienti.

#### 3.1.1 Materiali delle lenti per occhiali

Le lenti per occhiali sono realizzate principalmente in due materiali: plastica o vetro. Le lenti di plastica spesso sono realizzate in CR39 o in policarbonato. Le lenti di vetro esistono con una varietà di indici refrattivi, allo scopo di ridurre al minimo il loro spessore.

#### 3.1.2 Tipi di lenti per occhiali

Lenti per la singola visione:

- Sferiche o con correzione astigmatica;
- In plastica o in vetro.

Lenti bifocali:

- Costituite da una lente principale e da un segmento di addizione per la visione da vicino;
- Varietà di forme dell'addizione da vicino.

Le lenti bifocali sono montate su occhiali per la correzione sia di una miopia o ipermetropia, sia della presbiopia. Esse presentano due zone di diversa distanza focale, una per la visione da lontano e una per quella da vicino.

Lenti trifocali:

Formate da una lente principale e da due segmenti.

Lenti multifocali:

Formate da una lente principale e da un'addizione costantemente variabile per le varie posizioni di lettura da vicino.

Lenti afachiche:

- Lenti ad elevato potere positivo utilizzate per i pazienti affetti da cataratta;
- Realizzate con superfici asferiche per ridurre al minimo le aberrazioni dovute alla forma della lente.

Lenti fotocromatiche:

- Si scuriscono se esposte a radiazioni di lunghezza d'onda breve (300nm - 400 nm) oppure a raggi ultravioletti;
- Il livello di scurimento e la trasmissione finale (trasmissione di saturazione) dipendono dalla temperatura ambientale;
- Le lenti non diventeranno particolarmente scure durante la guida, in quanto i vetri del veicolo assorbono i raggi UV.

Lenti trattate:

- Le lenti per occhiali spesso possono subire dei trattamenti superficiali (trattamenti sottovuoto) per ridurre i riflessi indesiderati;
- I riflessi vengono suddivisi in 4 principali categorie:
  - (a) riflessi visibili da un osservatore posto frontalmente;
  - (b) riflessi interni alla lente stessa;
  - (c) riflessi visibili posteriormente alla lente, ad esempio in presenza di illuminazione dall'alto;
  - (d) riflessi provenienti dalla superficie della cornea.

#### Lenti ad elevato indice refrattivo:

Fabbricate con un materiale dotato di un indice refrattivo più elevato che rende possibile la riduzione dello spessore della lente pur mantenendone le proprietà ottiche, ovvero il potere ottico della lente è determinato dalla combinazione delle due superfici anteriore e posteriore, con lo spessore della lente.

#### Lenti indurite:

- Sottoposte a trattamenti a caldo o chimici per aumentarne la resistenza all'impatto;
- Utilizzate in ambito industriale, allo scopo di garantire maggiore sicurezza e protezione.

#### Lenti per occhiali da sole.

Le lenti per occhiali, a seconda del tipo di materiale, potranno assorbire quantità variabili di raggi ultravioletti. Nell'ordine i materiali per lenti che meglio assorbono i raggi UV sono: il policarbonato, la plastica e infine il vetro. Esistono standard diversi per definire il livello di assorbimento necessario e/o la definizione delle categorie di lenti per occhiali.

### **3.2 LENTI A CONTATTO**

Le lenti a contatto hanno avuto un notevole incremento negli ultimi anni in quanto risolvono molti dei problemi posti dagli occhiali soprattutto nelle miopie elevate. Esse, infatti, non modificano l'aspetto estetico, ampliano il campo visivo e il campo di sguardo; inoltre si muovono con l'occhio, per cui la visione è più naturale che con gli occhiali; lasciano inoltre una maggior libertà di azione ad esempio per attività sportive.

Non tutti riescono però a tollerarle per un numero di ore sufficiente nell'arco della giornata; esse, inoltre, richiedono una manutenzione scrupolosa e controlli periodici per scongiurare il pericolo di infezioni e di altre complicazioni anche serie, che possono diminuire la capacità visiva in modo permanente.

Le lenti a contatto si dividono in due grosse categorie: morbide e rigide.

#### **3.2.1 Lenti a contatto morbide**

Sono dette lenti idrofile in quanto sono costituite da polimeri di varia natura con inglobata una parte di acqua in percentuale variabile tra il 36% e il 70%.

E' proprio questo il segreto della loro morbidezza e permeabilità all'ossigeno così importante per la salute della cornea.

La cornea, infatti, per rimanere trasparente e perfettamente efficiente, necessita di assumere costantemente ossigeno dall'esterno.

Quindi questo tipo di lente è teoricamente il miglior compromesso per la salute dell'occhio; per contro, dato l'elevato contenuto di acqua, si sporcano facilmente.

I componenti del liquido lacrimale possono incrostare la superficie delle lenti diminuendo la loro permeabilità all'ossigeno, quindi la loro tollerabilità. Si deve quindi provvedere ad un'accurata pulizia delle lenti in modo da evitare fenomeni allergici ed intolleranza alle lenti stesse; per questo motivo vengono sostituite normalmente in tempi molto brevi.

Le lenti a contatto morbide sono realizzate con un polimero idrogel della plastica, l'idrossietilmetacrilato (HEMA), che ha un contenuto variabile di acqua (dal 38 al 70% ca.). Le dimensioni della lente sono comprese tra 13 mm e 14,5 mm. Lo spessore al centro parte da circa 30 µm.

#### Vantaggi

- Sono facilmente tollerabili;
- Richiedono un breve adattamento;
- Sono molto stabili;
- Possono essere utilizzate per effettuare attività sportive;

#### Svantaggi

- Necessitano di una buona lacrimazione per rimanere idratate;
- La loro morbidezza non sempre permette di correggere alcuni difetti, ad esempio l'astigmatismo (anche se si possono utilizzare toriche che consentono di ottenere un ottimo compromesso);
- Sono soggette a sporcarsi e contaminarsi abbastanza facilmente;
- Richiedono un'accurata manutenzione e un cambio frequente;
- Le lenti a contatto morbide variano a seconda della correzione della refrazione in base alla quale sono state prescritte, oppure in base alla geometria e al tipo di materiale.

### **3.2.2 Tipi di lenti a contatto morbide**

#### Sferiche

Potere da singola prescrizione a 360 gradi sulla circonferenza della lente.

#### Toriche

Contengono tanto un componente sferico quanto un componente cilindrico per la correzione dell'astigmatismo. Le lenti possono essere più spesse su un meridiano oppure avere profili di spessore modificati per consentire alla lente di mantenere il corretto orientamento sulla superficie oculare.

#### Disposable (Usa e getta)

Lenti a contatto sferiche o toriche che vengono realizzate per essere utilizzate per un certo periodo di tempo, ad esempio per una o due settimane o per un mese. Le lenti vengono generalmente vendute in confezioni blister combinate, ovvero in grado di coprire un periodo di 3 mesi, intendendo così incoraggiare l'utilizzatore a gettare le lenti alla fine del periodo indicato.

#### Ad utilizzo prolungato

Lenti realizzate in materiale ad elevato contenuto di acqua e/o con uno spessore centrale molto ridotto per consentire il massimo livello di passaggio dell'ossigeno. Le lenti possono essere tenute anche la notte o anche per un certo numero di giorni senza doverle rimuovere.

#### Lenti bifocali

Realizzate con un'area di transizione per la visione da vicino.

### **3.2.3 Lenti a contatto rigide**

Le lenti a contatto rigide variano anch'esse in base al materiale e alla geometria della lente. Le lenti a contatto rigide forniscono una nuova superficie frontale all'occhio e contribuiscono ad eliminare l'astigmatismo, perché la pellicola formata dalla secrezione lacrimale riempie il vuoto tra la lente e la cornea astigmatica. Le dimensioni delle lenti variano dagli 8 ai 10 mm. Lo spessore al centro è di circa di 100  $\mu\text{m}$ .

### **3.2.4 Materiali per le lenti a contatto rigide**

Le lenti a contatto rigide sono realizzate prevalentemente con polimetilmetacrilato (PMMA). Questo materiale può essere combinato con altri tipi di materiali plastici, per aumentarne la permeabilità all'ossigeno. Al fine di aumentare la permeabilità all'ossigeno e di consentire un tempo di utilizzo più prolungato viene utilizzata una combinazione di PMMA e di altri polimeri; questo tipo di lenti sono spesso di diametro maggiore rispetto a quelle realizzate in HEMA per aumentarne la comodità di utilizzo.

### **3.2.5 Lenti a contatto rigide gas-permeabili**

Questo tipo di lenti (indicate con la sigla RGP) rappresenta lo sviluppo più recente nel campo delle lenti a contatto; sono realizzate in acetato di cellulosa o in polimeri contenenti fluoro. Le RGP combinano i vantaggi delle lenti rigide (possibilità di ottenere diversi raggi di curvatura in diversi punti) con quelli delle lenti morbide (permeabilità all'ossigeno).

## IV. LA RETINA

### 4.1 ANATOMIA E FISIOLOGIA

La retina riveste due terzi della superficie della coroide (tessuto molto vascolarizzato situato nella parte più interna dell'occhio).

È una struttura a strati cellulari presente su tutta la porzione posteriore dell'occhio a eccezione della **macchia cieca** che è la zona di innesto del nervo ottico.

La regione centrale della retina, dove l'acuità visiva è massima, è detta **macula lutea**. Quest'ultima, pur facendo parte della retina, è considerata un mezzo pre-retinale perché taglia le radiazioni a bassa lunghezza d'onda e riduce le aberrazioni cromatiche. Al centro della macula si trova un piccolo affossamento, detto **fovea o punto di fissazione** perché è la zona su cui vengono focalizzati gli stimoli luminosi. In corrispondenza della fovea, gli strati esterni della retina sono spostati in modo che la luce colpisca direttamente i coni, maggiormente presenti in questa zona e in particolare nella **foveola** posta al centro della fovea. Nella foveola si ha il maggiore potere di discriminazione (Vedi figura 1).

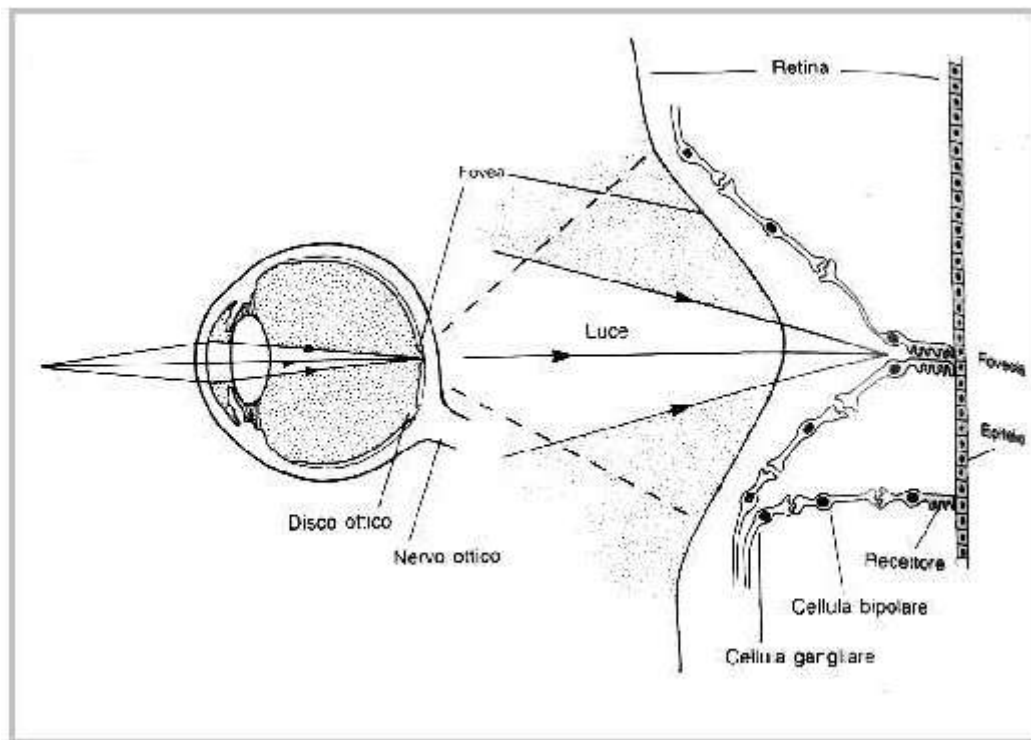
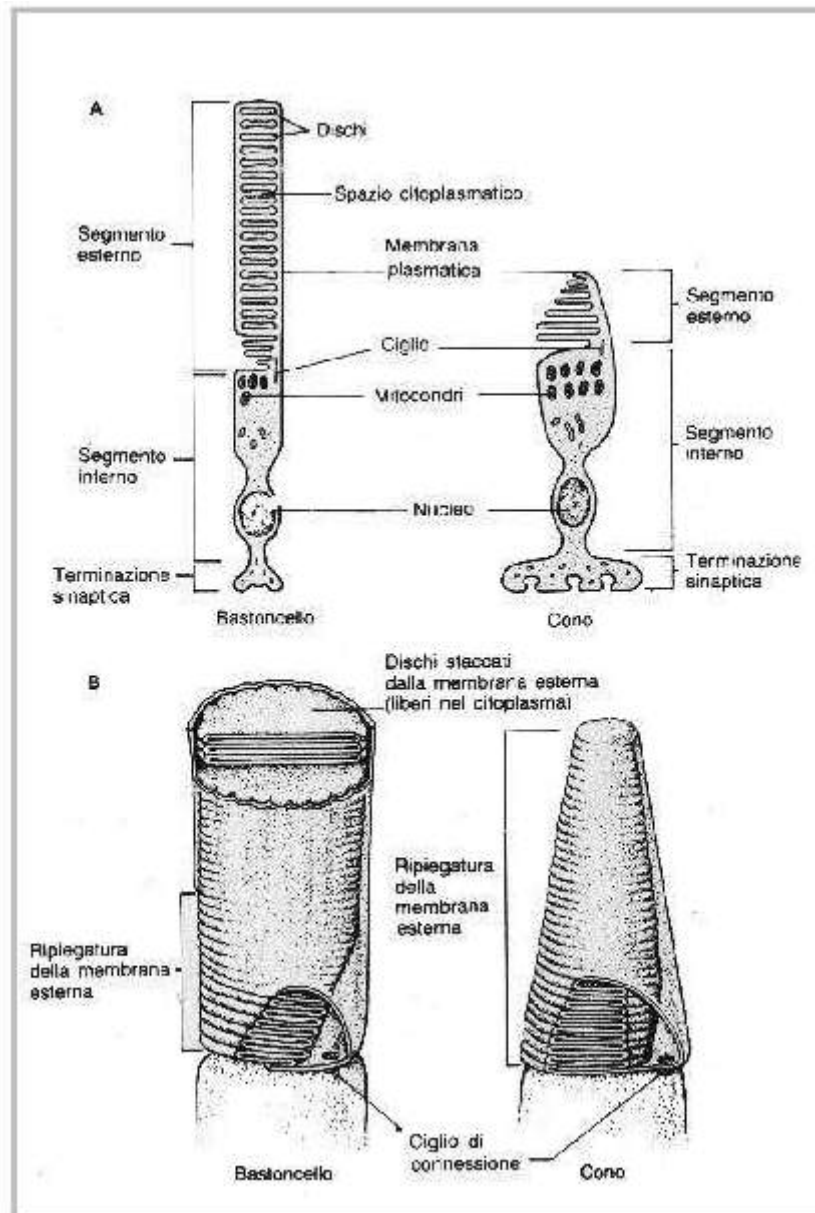


Figura 1

Procedendo, nell'analisi, dallo strato più profondo verso l'esterno, incontriamo per primo **l'epitelio pigmentato**. È uno strato di tessuto, adagiato sulla coroide, che contiene granuli scuri di melanina (da cui l'aggettivo "pigmentato"). Essi eliminano la luce diffusa che, altrimenti, offuscherebbe l'immagine.

L'epitelio è anche una zona di transito per i nutrienti, provenienti dai vasi sanguigni sottostanti e per le sostanze di rifiuto dei fotorecettori.

**I fotorecettori** (Coni e Bastoncelli) sono neuroni specializzati e fanno sinapsi con le cellule bipolari. Entrambi hanno due parti ben distinte: un segmento interno ed uno esterno, connessi tra loro da un ciglio. Il segmento interno, simile nei due fotorecettori, contiene il corpo cellulare con il nucleo e le strutture essenziali per la vita cellulare. Il segmento esterno, costituito da dischi formati dai ripiegamenti della membrana plasmatica, è una struttura specializzata per l'assorbimento della radiazione luminosa.



**Figura 2**

In entrambi i fotorecettori, la membrana cellulare dei segmenti esterni contiene molti complessi proteici capaci di assorbire la radiazione luminosa. Queste molecole, intrappolate nel doppio strato lipidico della membrana, sono orientate in modo da massimizzare la capacità di assorbimento della radiazione luminosa e contengono il pigmento visivo (la parte di proteina capace di reagire con i fotoni).

I **bastoncelli** sono i più numerosi (più di 100 milioni) e i più sensibili (possono registrare l'arrivo anche di un solo fotone ma saturano intorno ai 10000 fotoni per secondo).

Distribuiti ampiamente sulla retina, sono assenti nella foveola.

Il loro pigmento fotosensibile, la rodopsina, ha un picco di assorbimento intorno ad una lunghezza d'onda  $\lambda=500\text{nm}$  (luce blu-verde).

Sono collegati tra loro in grandi gruppi con una sorta di rete neuronale locale e questo permette di percepire intensità minime di luce (visione crepuscolare, notturna, o scotopica). L'adattamento retinico alla visione notturna è, infatti, maggiore verso la periferia della retina, ove ci sono soltanto bastoncelli.

I bastoncelli ricevono semplicemente sensazioni di chiaro-scuro e non di colore ed hanno capacità di risoluzione spaziale e temporale inferiore rispetto ai coni.

I **coni** sono meno numerosi dei bastoncelli (circa 6 milioni per occhio, negli esseri umani), ma molto più importanti nella visione con luce normale o artificiale, la visione fotopica.

Sono densamente impacchettati nella zona centrale della fovea (sono circa 150000 per mm<sup>2</sup>) ed hanno una grande risoluzione spaziale con tempi di risposta brevi.

Contengono tre tipi di pigmenti capaci di assorbire, in maniera ottimale, la luce in tre zone diverse dello spettro visivo; esistono, infatti, tre diversi tipi di coni: coni sensibili al rosso ( $\lambda=560\text{nm}$ ), sensibili al verde ( $\lambda=530\text{nm}$ ) e sensibili al blu ( $\lambda=420\text{nm}$ ) che cooperano per compiere l'analisi dei colori.

La ragione di questa dualità del sistema visivo non è del tutto chiara, ma sembra che i pigmenti visivi dei coni siano meno stabili della rodopsina e per questo introducano una quantità di rumore inevitabile nella percezione degli stimoli luminosi, se non ci fosse questa dualità, a bassi livelli di illuminazione il rumore coprirebbe il segnale.

#### PROPRIETÀ DEI CONI E DEI BASTONCELLI

BASTONCELLI	CONI
Risposta lenta: tempi di integrazione lunghi	Risposta rapida: tempo di integrazione breve
Amplificazione elevata	Amplificazione minore
Risposta che satura	Risposta che non satura
Sensibilità elevata	Sensibilità bassa
Bassa acuità visiva	Elevata acuità visiva
Un solo pigmento: visione senza colori	Tre tipi di pigmenti: visione a colori

I bastoncelli e i coni rappresentano un'eccezione al comportamento generale dei neuroni, non rispondono alle variazioni degli stimoli luminosi generando potenziali d'azione ma con un'iperpolarizzazione graduata (trasmissione del segnale di tipo analogico) e con la liberazione di un neurotrasmettitore. I fotorecettori presentano, in assenza di illuminazione, un potenziale di membrana, di circa  $-40\text{mV}$ , dovuto a quella che viene detta "corrente al buio" (un flusso passivo continuo di  $\text{Na}^+$  dall'interno all'esterno attraverso canali presenti nel segmento esterno). La luce modula l'apertura dei canali per l' $\text{Na}^+$  provocando l'iperpolarizzazione del fotorecettore e inibendo la liberazione del neurotrasmettitore.

Bisogna osservare che, mentre gli strati più interni della retina trasmettono informazioni senza generare potenziali d'azione (le distanze tra le cellule sono limitate e l'informazione può essere trasmessa passivamente senza che si degradi), gli strati più esterni (le cellule gangliari) usano i potenziali d'azione dovendo trasportare il segnale per lunghi tratti nel sistema nervoso centrale.

I coni fanno sinapsi con due tipi diversi di **cellule bipolari** quelle dette "centro on" e quelle "centro off" che rispondono in maniera diversa allo stesso neurotrasmettitore liberato da uno stesso cono. L'illuminazione diretta del cono eccita una cellula centro-on mentre inibisce la cellula centro-off.

Le cellule bipolari vengono attivate sia dai recettori con cui fanno sinapsi sia da quelli più lontani a cui sono connessi attraverso le cellule orizzontali. Queste ultime sono interconnesse attraverso sinapsi elettriche ed hanno zone di influenza molto vaste, come si può osservare dalla figura 3.

Ogni tipo di cellula bipolare, a sua volta, è connessa con un gruppo di **cellule gangliari** dette, analogamente, cellule "centro on" e "centro off" che hanno proprietà di risposta corrispondenti.

Ogni zona della retina possiede, poi, diversi tipi di cellule gangliari con proprietà morfologiche e funzionali distinte collegate in parallelo con gli stessi fotorecettori.

La retina del gatto è stata particolarmente studiata e in essa sono state osservate tre sottoclassi di cellule gangliari dette rispettivamente X, Y, W.

Le cellule X hanno corpi cellulari di dimensioni intermedie, arborizzazioni dendritiche di piccole dimensioni e sono responsabili dei processi che permettono una elevata acuità visiva.

Le cellule Y hanno corpi cellulari di grandi dimensioni, arborizzazioni dendritiche estese e assoni dotati di elevata velocità di conduzione. Rispondono soltanto alla presentazione di oggetti di grandi dimensioni e hanno importanza nella analisi iniziale di forme grezze.

Le cellule W hanno corpi cellulari piccoli e arborizzazioni dendritiche estese. Proiettano al collicolo superiore e la loro funzione è legata ai movimenti del capo e degli occhi. (Nella retina dei primati sono presenti categorie analoghe di cellule gangliari.)

Ci sono, poi, due classi di interneuroni retinici che modulano il flusso di informazioni dai recettori alle cellule bipolari e alle gangliari: sono le cellule orizzontali e amacrine. Le orizzontali mediano l'attività tra fotorecettori e cellule bipolari, mentre le amacrine quella tra cellule bipolari e gangliari.

Le **cellule orizzontali** svolgono funzioni di modulazione, cioè fanno quella che viene detta "inibizione laterale": un'area retinica, stimolata in un certo modo, inibisce le zone immediatamente adiacenti (laterali), provocando l'impressione contraria. Se la retina è colpita, in una certa area, da una tonalità di colore, nelle zone circostanti verrà vista la tonalità complementare; se viene stimolata da una luce chiara, le zone adiacenti risulteranno più scure. Questo processo accentua le differenze fra impulsi luminosi, nel senso che vengono esaltati i margini fra stimolazioni diverse indipendentemente dal livello di illuminazione. Nei colori il maggior contrasto si ha quando sono adiacenti due colori complementari, ognuno dei quali accentua le caratteristiche dell'altro.

Come avviene il fenomeno dell'inibizione laterale?

Le cellule orizzontali costituiscono un collegamento tra coni vicini: fanno sinapsi con i coni iperpolarizzati dalla luce e, in risposta agli stimoli luminosi, provocano la depolarizzazione dei coni limitrofi. In questo modo l'attivazione di alcuni coni, da parte della luce, determina l'inibizione dei coni vicini.

L'attività delle cellule orizzontali rappresenta il primo di una serie di avvenimenti, che si ripetono a livelli sempre più alti nel sistema visivo, tesi ad esaltare il contrasto tra luminosità e buio e a rendere più chiara la distinzione dei contorni.

Le **cellule amacrine** sono interneuroni brevi, dello strato plessiforme interno, che mediano interazioni di tipo antagonistico tra linee di informazione centro-on e quelle centro-off. Alcune cellule amacrine hanno campi dendritici piccoli e mediano interazioni tra cellule gangliari X. Altre, che hanno una rete dendritica molto più estesa, con ogni probabilità, mediano sia le interazioni antagonistiche sia i comportamenti non lineari delle grandi cellule Y. Altre, ancora, danno selettività direzionale.

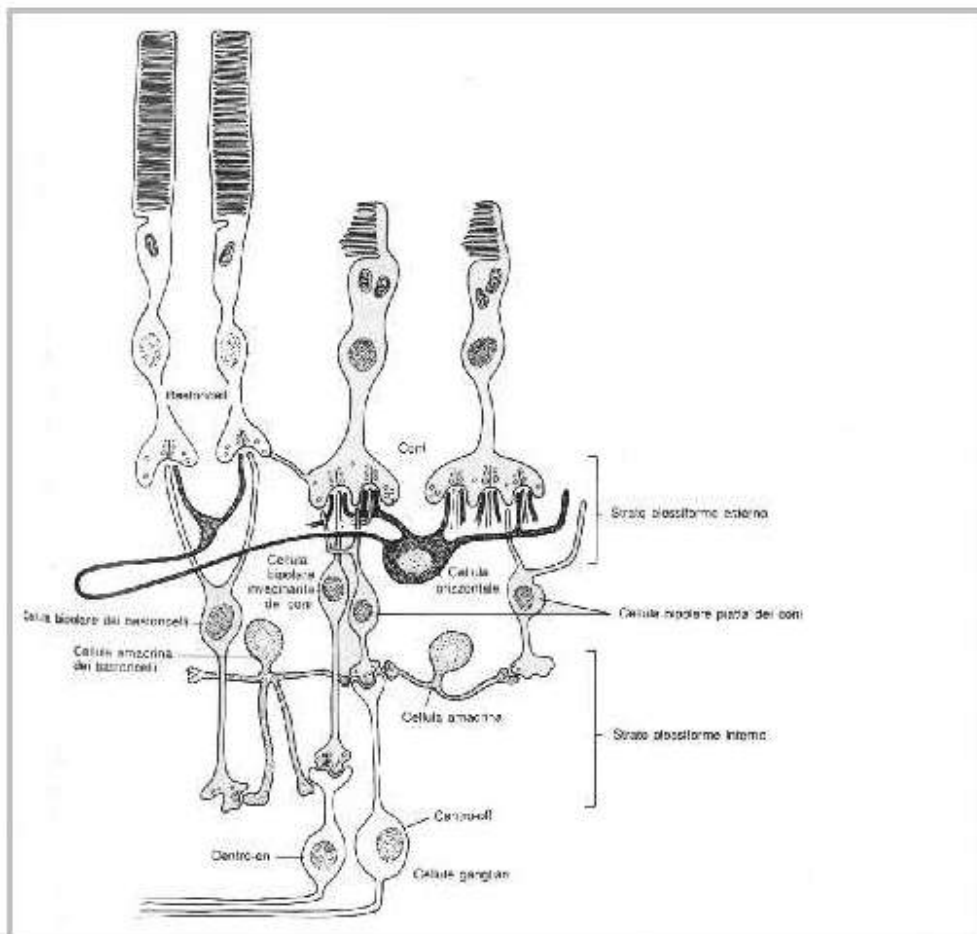


Figura 3

## 4.2 PRE-ELABORAZIONE RETINICA

Alcuni studiosi dell'Università di Berkley (California) hanno recentemente messo a punto un potente "tool" per lo studio e la simulazione dei processi che avvengono nella retina. Hanno utilizzato una rete neurale non lineare (CNN: cellular nonlinear network) coadiuvata da un computer per la elaborazione dei segnali. Questo sistema di simulazione, analogamente a quanto fa la retina, elabora segnali analogici provenienti da array planari di elementi tutti uguali.

Molti studiosi di neuroscienze concordano nel ritenere che, per il cervello, siano più significativi i pattern delle attività di un gruppo di cellule piuttosto che l'informazione di un singolo neurone retinale. Con il CNN si cerca di ricostruire l'attività dinamica associata a ciascuna popolazione presente nei diversi strati neuronali.

Il computer simula la reazione di ciascuno strato retinale di fronte ad una immagine in movimento (il viso di un uomo) e produce quelle che vengono dette "immagini neuronali" (schematicamente rappresentate in figura da pellicole). I diversi frame, elaborati a circa 100msec di distanza l'uno dall'altro, sono il risultato di modelli elaborati dal computer sulla base di dati fisiologici.

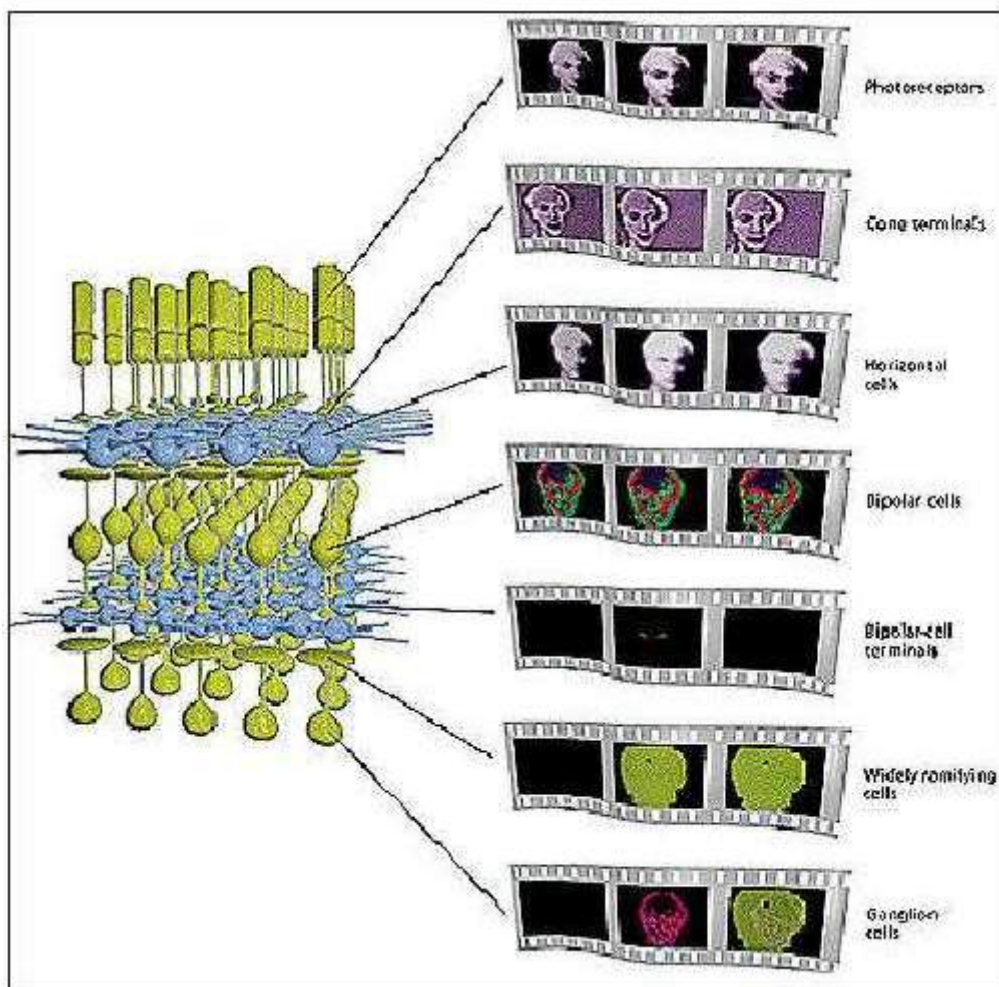


Figura 4

Il primo strato è formato da fotorecettori che si comportano come fotocellule. I fotorecettori fanno sinapsi con lo strato sottostante di cellule (cellule H). La rete formata dalle cellule H è simile ad una griglia resistiva: se un punto della griglia è attivato, l'attività si trasmette, orizzontalmente, alle zone vicine anche se un po' attenuata.

A questo livello accadono due cose. Primo: l'immagine, relativamente chiara che ha attraversato i fotorecettori, è filtrata nel tempo (filtro passa-basso) così che i contorni risultano sfuocati e i movimenti veloci siano trasmessi in maniera imperfetta. Secondo: si ha un'operazione di filtraggio nello spazio. L'immagine neuronale diviene, così, a livello delle cellule H una versione sfuocata nel tempo e nello spazio.



di quella originale. Nonostante possa sembrare controproducente, questa operazione è essenziale perché regola l'uscita dei coni in funzione del valore medio dell'illuminazione nel tempo e nello spazio.

Questo permette ai coni di modulare la quantità di luce trasmessa in modo che sia compatibile con l'ingresso per lo strato successivo: le cellule bipolari o cellule B.

Le cellule B segnalano variazioni di intensità luminosa (negli esseri umani una variazione nel massimo di intensità luminosa corrisponde ad una variazione di 1.5mv in 25-50msec). Sono organizzate in coppie e segnalano così l'esistenza di un contorno tra luce e ombra. Funzioni più elaborate hanno, poi, luogo: la messa a fuoco di contorni, la rilevazione dei movimenti (che comporta un'analisi nel tempo di una successione di segnali) e la rilevazione di caratteristiche precise di una immagine.

Le cellule W (widely ramifying), ancora più in profondità, ricevono stimoli localmente dalle cellule bipolari producendo in risposta un'onda inibitoria transitoria. Sembra che l'onda inibitoria serva a terminare l'attività di elaborazione delle immagini per lasciare il percorso nervoso libero e permettergli di processare altre informazioni: questo permette di percepire in modo continuo le immagini in movimento.

Tutte le trasformazioni confluiscono in uscita sulle cellule gangliari (cellule G). L'output retinale definitivo consiste nella sovrapposizione di diversi pattern ciascuno dei quali rappresenta un aspetto diverso del mondo esterno.

Il più semplice pattern riflette l'attività delle cellule B (ON, OFF) che inviano informazioni circa cambiamenti di intensità luminosa lungo un percorso. La loro attività inizia in seguito alla rilevazione di un oggetto e continua finché esso è presente nel campo visivo.

Un'altra popolazione di cellule gangliari dette cellule N (narrow field cell) si attiva solo se l'input visivo cambia: esse segnalano i cambiamenti nello scenario visivo.

Un altro tipo di cellule ancora ha una qualche attività solo all'inizio del movimento del target ed è inattivo altrimenti; sembra che segnali l'inizio del movimento ma non il suo perseverare.

Questi ed altri pattern lasciano la retina contemporaneamente e sembra informino diverse zone del cervello.

In generale le porzioni più esterne della retina servono a trasdurre l'intensità della radiazione luminosa in segnali neuronali. Le connessioni all'interno della retina sono invece specializzate nella raccolta delle caratteristiche delle immagini, nella rilevazione dei movimenti e nell'estrazione delle caratteristiche delle immagini e dei dettagli.

## **V. PATOLOGIE DELLA RETINA**

La retina può essere affetta da diversi tipi di problemi che si ripercuotono sulla vista.

Questi possono interessare:

- La retina centrale, cioè la parte responsabile della visione centrale e della percezione dei colori (degenerazione maculare senile)
- La retina in generale: è per lo più colpita da malattie vascolari o degenerative come quadro localizzato di un problema più generale (diabete, ipertensione arteriosa, sclerosi vascolare etc.)
- La retina periferica: questa struttura delicata è vulnerabile; può essere soggetta a rotture e fori; essi a loro volta possono essere causa di distacco di retina che richiede il pronto intervento del chirurgo oculista.

### **5.1 LA RETINOPATIA DIABETICA**

Il diabete mellito è una malattia che colpisce soprattutto il sistema circolatorio sanguigno con prevalenza per i piccoli vasi.

Un organo ricco di questi piccoli vasi è proprio l'occhio e precisamente la retina, infatti il diabete comporta con frequenza danni all'organo della vista.

Il danno è dovuto ad un rallentamento della circolazione cui consegue una degenerazione delle cellule per via del minore apporto di ossigeno. Se la situazione perdura il corpo cercherà di creare dei nuovi vasi sanguigni allo scopo di aumentare l'ossigenazione. Questi neo vasi sono però estremamente fragili e quindi soggetti a numerose rotture con conseguenti emorragie retiniche. Il sangue fuoriuscito dai vasi porterà alla formazione di membrane che, a loro volta, porteranno al distacco retinico.

### **5.2 DEGENERAZIONE MACULARE**

E' una malattia che colpisce la macula; questa regione può andare incontro a vari processi: traumatici, infiammatori e degenerativi anche in giovane età ma più frequentemente la regione maculare viene colpita dai processi di invecchiamento della retina e dei tessuti vicini.

Con i processi di invecchiamento si riduce l'apporto di sangue e di elementi nutritivi: si alterano cioè i delicati meccanismi che sovrintendono alla nutrizione delle cellule retiniche usurate con un conseguente accumulo di scorie al di sotto della macula di entrambi gli occhi; esse alterano la funzionalità delle cellule deputate alla visione. I disturbi ed il calo dell'acuità visiva derivano dalla scomparsa (atrofia) di queste cellule.

Può anche capitare però che si formino al di sotto della macula indebolita, vasi sanguigni anomali, i quali moltiplicandosi, alterano la struttura della retina dando origine ad emorragie. Quando i vasi anomali, chiamati neovasi, interessano la macula il calo visivo è grave.

La lesione a livello della macula determina la riduzione grave della funzione visiva centrale cioè della visione nitida degli oggetti e dei colori creando disturbi soprattutto alla lettura. La visione periferica viene invece conservata per cui il paziente non corre il rischio di divenire completamente cieco.

### **5.3 OCCLUSIONE ARTERIOSA RETINICA**

L'occlusione arteriosa può interessare sia il tronco arterioso principale (occlusione dell'arteria centrale della retina) sia un ramo di essa (occlusione arteriosa di branca).

#### **5.3.1 L'occlusione dell'arteria centrale della retina**

E' la forma di occlusione arteriosa retinica più frequente. Gli uomini ne sono più colpiti con un'età media d'insorgenza intorno ai 60 anni. Le cause più comuni sono rappresentate da emboli che si localizzano nell'arteria centrale della retina conseguenti a placche occlusive, spasmi vascolari, aneurismi dissecanti e necrosi arteriolare ipertensiva. L'occlusione dell'arteria centrale della retina (OACR) è più frequente in associazione ad altre patologie vascolari sistemiche quali l'ipertensione arteriosa, il diabete mellito, la stenosi carotidea e le valvulopatie cardiache.

All'esame del fondo oculare si evidenzia una retina edematosa e di colorito biancastro sulla quale spicca una macchia rosso-ciliegia in corrispondenza della fovea. L'entità dell'edema retinico è maggiore nei casi di occlusione totale dell'arteria centrale della retina.

### **5.3.2 L'occlusione di branca dell'arteria centrale della retina**

Le cause di un'occlusione arteriosa di branca sono le stesse dell'OACR. L'acuità visiva è variabile: risulta fortemente compromessa quando la branca arteriosa occlusa nutre la regione maculare. L'esame del fondo oculare evidenzia un edema retinico a settore, localizzato nel territorio della branca occlusa. Se vi è interessamento dell'area maculare è possibile riscontrare il tipico aspetto "rosso ciliegia" della fovea.

## **5.4 OCCLUSIONE VENOSA RETINICA**

Tale patologia può colpire la vena centrale retinica globalmente o solo un ramo di essa (la cosiddetta occlusione di branca). Vi sono notevoli affinità tra l'una e l'altra condizione dal punto di vista clinico, ma il decorso e la prognosi hanno caratteristiche differenti.

### **5.4.1 L'occlusione venosa di branca**

L'occlusione venosa di branca (OBVR) colpisce in eguale misura i due sessi ed ha maggiore incidenza tra i 60 e i 70 anni di età. Tra i fattori non-predisponenti vanno ricordati altresì il fumo, alcune anomalie della coagulazione, la deficienza di proteine C e S e la presenza di anticorpi anti-fosfolipidi. Tra i fattori predisponenti oculari sono invece importanti l'aumento di pressione intraoculare (glaucoma), l'ipermetropia, alcune malattie infiammatorie che sono causa di vasculiti retiniche e rare anomalie congenite a carico della vena centrale della retina. L'esordio è quasi sempre improvviso e il paziente lamenta un annebbiamento della vista più o meno marcato che spesso si accompagna a perdita di parte del campo visivo.

Tre sono le complicanze di un'occlusione di branca capaci di determinare un deficit visivo:

- L'edema della parte retinica centrale, deputata alla visione distinta (edema maculare)
- L'assenza di irrorazione della regione maculare
- Le emorragie dovute alla proliferazione di vasi sanguigni anomali, che si formano come esito dell'assenza di circolazione del distretto retinico coinvolto.

### **5.4.2 L'occlusione della vena centrale della retina**

Con tale termine si definisce l'occlusione della vena retinica nella sua porzione terminale, a livello del nervo ottico, ove raccoglie tutto il sangue proveniente dai capillari retinici.

Il paziente lamenta tipicamente una perdita più o meno grave dell'acuità visiva e l'esame del fondo oculare mostra la presenza di dilatazione e tortuosità di tutte le branche venose retiniche, di emorragie, di edema della testa del nervo ottico, associata o meno ad edema maculare.

## **5.5 DISTACCO DI RETINA**

Quando la retina si distacca dalla parete interna dell'occhio vi è una perdita delle capacità visive, rendendo l'occhio cieco in quel determinato settore. Esistono 3 tipi di distacco di retina (DR):

- Il **distacco regmatogeno**, che è il più frequente, è dovuto ad una rottura della retina che permette al vitreo (la sostanza gelatinosa che occupa l'interno dell'occhio) di passare attraverso l'apertura portandosi al di dietro della retina, permettendo così lo scollamento della sua porzione aderente.
- Il **distacco trazionale** è generato da briglie di tessuto fibro-vascolare, formate all'interno della cavità vitreale, che esercitano una trazione centrifuga sulla retina capace di scollarla: il caso più frequente è in corso di retinopatia diabetica.
- Il **distacco essudativo** è di solito dovuto ad essudazione di liquido che si posiziona sotto la retina scollandola; le cause possono essere individuate in tumori (es. melanoma della coroide), malattie infiammatorie (uveite), anomalie congenite o malattie degenerative maculari.

## **5.6 LA RETINITE PIGMENTOSA**

La retinite pigmentosa è una malattia degenerativa che colpisce le cellule fotorecetttrici della retina (i coni ed i bastoncelli) uccidendole lentamente. In questo modo la capacità visiva del soggetto colpito viene progressivamente ridotta, fino a giungere in molti casi alla completa cecità. Le cause che determinano questa infermità sono ancora sconosciute. L'unica informazione certa di cui gli scienziati dispongono è l'origine genetica della retinite pigmentosa. I principali sintomi sono una cecità crepuscolare e notturna (la malattia

nelle prime fasi dello sviluppo aggredisce prevalentemente i bastoncelli) ed un restringimento del campo visivo.

### **5.7 GLAUCOMA**

Il glaucoma e' una patologia dovuta ad un aumento della pressione all'interno dell'occhio; si verifica in seguito ad un restringimento progressivo delle vie di deflusso dell'umor acqueo, a causa di materiale che si deposita a questo livello. Si evidenzia un danno iniziale al nervo ottico e l'acuità visiva viene ridotta fino alla cecità completa.

## VI. NEUROFISIOLOGIA DELLA VISIONE

Per capire meglio come i segnali vengano inviati al cervello è necessario introdurre alcuni concetti.

Si distinguono, all'interno della retina, due metà scegliendo come riferimento la linea mediana che origina dal centro della fovea: l'emiretina temporale e quella nasale (vedi figura 1).

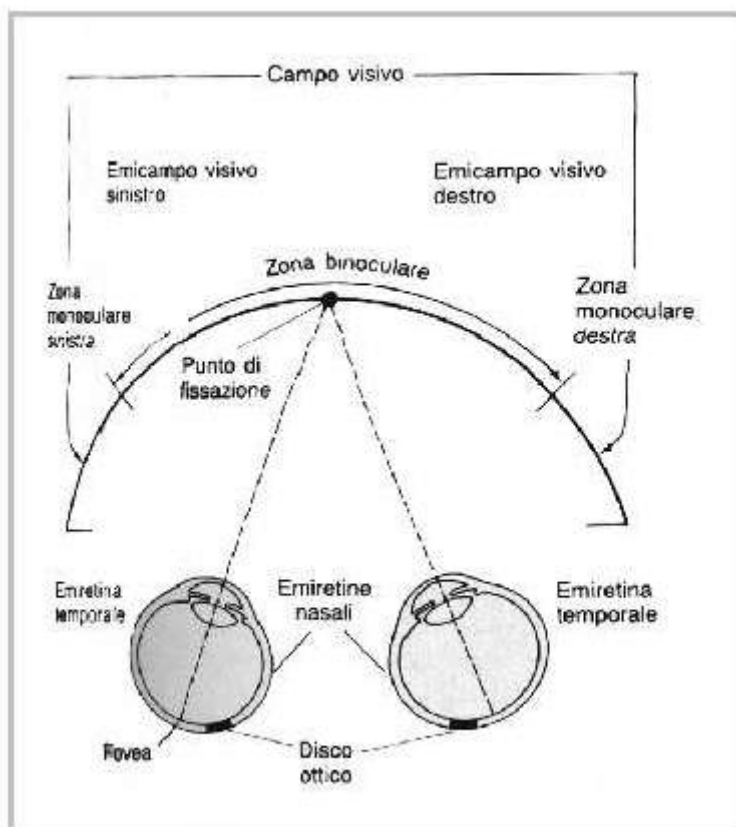


Figura 1

Si definisce **campo visivo**, la porzione del mondo esterno vista dai due occhi in assenza di movimenti del capo. E' possibile distinguere una porzione sinistra ed una destra del campo visivo.

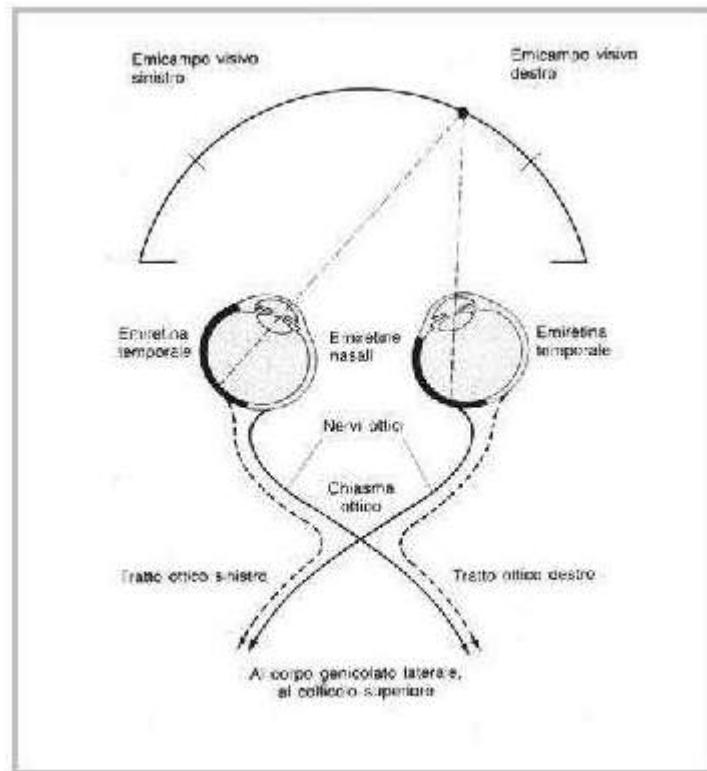
La metà sinistra del campo visivo proietta gli stimoli luminosi sulla emiretina nasale dell'occhio sinistro e su quella temporale dell'occhio destro. Il contrario, ovviamente, accadrà per la zona complementare.

In entrambe le metà del campo visivo si possono distinguere una zona monocolare da cui la luce colpirà un solo occhio ed una binoculare per cui la luce li colpisce entrambi.

Il disco ottico è localizzato nella retina mediale ed è privo di fotorecettori (per questo è detto "macchia cieca"), ma la presenza della macchia cieca non è avvertita nella normale visione binoculare perché la zona non vista da un occhio viene percepita dall'altro.

Bisogna ricordare, a questo punto, che ciascuna porzione del campo visivo proietta gli stimoli, non sulla porzione corrispondente della retina, ma su quella opposta sia in senso longitudinale che trasversale. Ad esempio la metà inferiore del campo visivo viene proiettata sulla metà superiore della retina e la metà nasale su quella temporale. Successivamente, a livello del sistema nervoso centrale l'immagine viene invertita ed elaborata.

Uno stimolo luminoso che cade nella **zona binoculare** dell'emicampo visivo destro (figura 2) giunge sull'emiretina temporale dell'occhio sinistro e su quella nasale del destro. L'informazione raggiunge il nervo ottico di ciascun occhio e successivamente i due nervi si incrociano nel chiasma ottico per dirigersi verso il lato opposto a quello da cui provenivano. Ciascun tratto ottico è composto sia da fibre che provengono dal lato ipsilaterale sia da quelle del lato opposto e contiene, quindi, una rappresentazione completa dell'emicampo visivo. Le fibre nervose del tratto ottico formano sinapsi nel **nucleo genicolato laterale** del talamo (NGL) e i neuroni di quest'ultimo inviano i loro assoni alla corteccia visiva.



**Figura 2**

La luce proveniente dalla **zona monocolare** del campo visivo proietta, invece, solo sulla emiretina nasale dell'occhio ipsilaterale perché il naso le impedisce di raggiungere l'altro occhio.

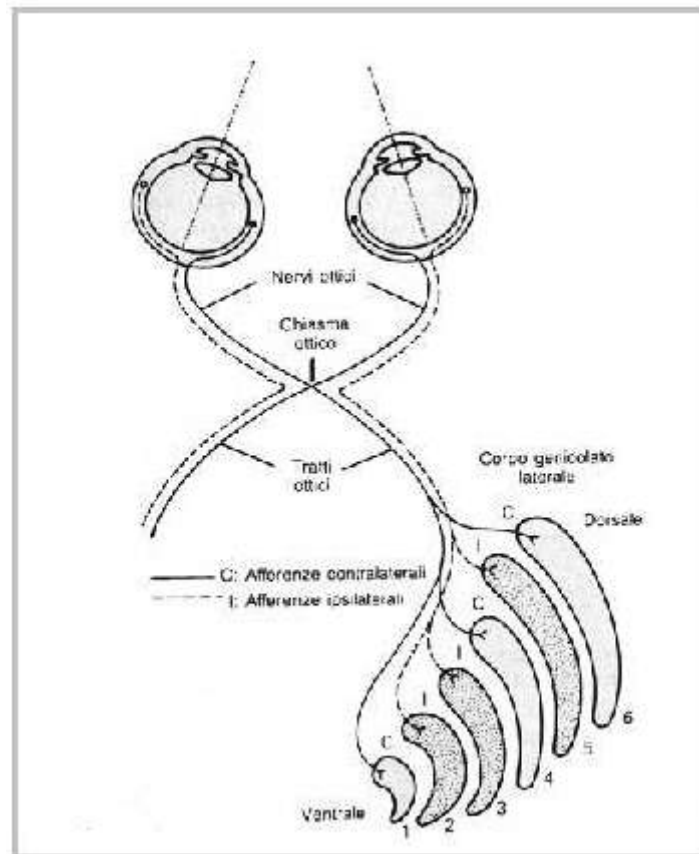
La parte monocolare del campo visivo è detta **semiluna temporale** perché è la zona estrema di ciascuna metà del campo visivo ed ha la forma di una semiluna. In questa zona non c'è sovrapposizione tra le funzioni dei due occhi e lesioni gravi determinano, per questo, la perdita totale della visione laterale.

Nel NGL si ritrova una rappresentazione ordinata dell'emicampo visivo controlaterale perché le cellule gangliari proiettano i loro assoni secondo una struttura ordinata che ha precise corrispondenze con la topografia della stimolazione retinica. Le zone centrali della retina, però, sono maggiormente rappresentate rispetto a quelle periferiche. Questa non uniformità nella distribuzione delle afferenze si ritroverà, poi, anche a livello della corteccia striata dove la regione associata alla macula lutea (nel lobo occipitale) è maggiore di quella associata al resto della retina e questo probabilmente perché la macula lutea è molto più importante nella acuità visiva.

Il NGL dei primati è una struttura composta da sei strati. Le rappresentazioni delle diverse porzioni di retina sono allineate verticalmente l'una sull'altra formando sei diverse mappe dell'emicampo.

Gli strati del nucleo che ricevono afferenze dall'occhio controlaterale danno una rappresentazione di tutto l'emicampo visivo corrispondente, mentre gli strati che ricevono le afferenze dall'occhio ipsilaterale contengono la rappresentazione solo di una parte dell'emicampo visivo controlaterale, perché non ricevono le afferenze provenienti dalla semiluna temporale (vedi figura 3).

I neuroni del NGL generano risposte simili a quelle delle cellule gangliari: possono essere classificati come cellule on o off e filtrano i segnali luminosi.



**Figura 3**

Oltre che al NGL la retina proietta al **collicolo superiore del mesencefalo** che riceve afferenze anche dalla corteccia visiva. Il collicolo è importante per i movimenti oculari e per la rilevazione della luminosità.

L'informazione sensoriale dei nervi ottici, superato il talamo, termina prevalentemente nel IV strato dell'area visiva primaria (nella corteccia) dove inizia l'elaborazione, da parte del cervello, delle informazioni visive.

La **corteccia visiva primaria** è detta anche corteccia striata ed è localizzata nel lobo occipitale. Ha uno spessore di circa 3mm ed è formata da più strati con funzioni diverse.

Gli assoni che portano le informazioni dei due occhi terminano in zone contigue dette "colonne di dominanza oculare" che si alternano lungo il piano tangenziale della corteccia, inoltre ogni cellula della corteccia riceve afferenze da entrambi gli occhi anche se ce n'è una dominante.

Bisogna, a questo punto, mettere in evidenza alcune caratteristiche della corteccia striata.

- Contiene una rappresentazione topografica della retina: è una mappa retinotopica. La corrispondenza tra la posizione dei neuroni nella retina e quella nella corteccia non è però perfettamente lineare visto che le zone più importanti per l'acuità visiva sono maggiormente rappresentate.
- I neuroni della corteccia rispondono meglio a stimoli prolungati e con orientazione precisa.
- E' connessa ad altre zone della corteccia (corteccia extra-striata) in cui avviene una successiva elaborazione e le aree visive extra-striate sono connesse reciprocamente con un altro nucleo talamico: il pulvinar.

Le zone del cervello associate al sistema visivo sono molto estese: sono situate alla base del cervello, sopra l'ipofisi, nei lobi temporali, parietali e nel lobo occipitale. E' per questa ragione che lesioni in numerose e diverse zone del cervello possono provocare danni alla vista con cecità mono o binoculare.

## VII. PANORAMICA SULLE PROTESI VISIVE IMPIANTABILI

### 7.1 DESCRIZIONE

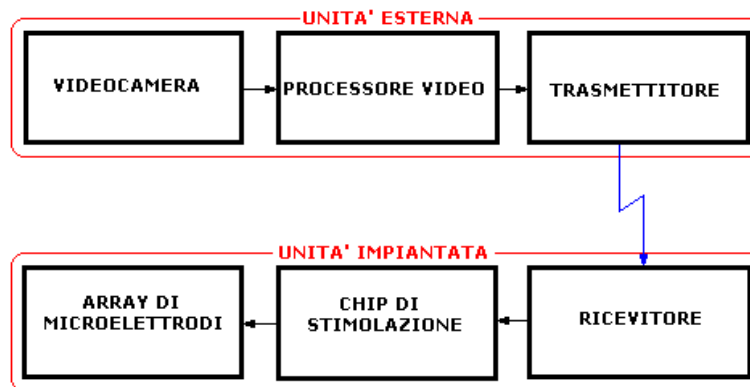
Una protesi visiva impiantabile è un dispositivo in grado di recuperare parzialmente il senso della vista per mezzo di stimoli elettrici al sistema nervoso.

Studi condotti su esseri umani ed animali hanno dimostrato che stimolando elettricamente alcune parti del sistema nervoso dedicate alla vista si ha da parte del paziente la percezione di spot luminosi detti **fosfeni**.

Tali studi hanno dimostrato inoltre che l'intensità luminosa del fosfene è direttamente legata all'intensità di corrente usata per lo stimolo.

In relazione al sito di impianto le protesi visive possono essere classificate in oculari (retina, nervo ottico...) e corticali.

Al fine di ridurre l'ingombro del dispositivo impiantato spesso si preferisce realizzare la protesi in due unità distinte; la figura sottostante mostra i componenti tipici di una protesi visiva:

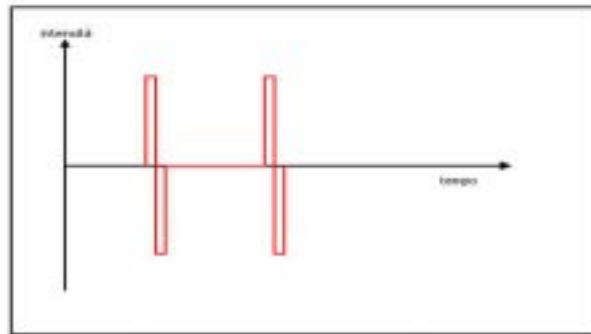


- **Videocamera:** deve consumare poca energia e dev'essere poco ingombrante (per essere eventualmente fissata su un paio di occhiali); non essendo richiesta un'elevata definizione una telecamera CMOS o CCD con risoluzione di 320x240 soddisfa ampiamente tutti i requisiti.
- **Processore video:** ha la funzione di elaborare l'immagine eliminando dall'immagine di partenza le informazioni superflue ed amplificando quelle necessarie. Poiché tali operazioni vengono effettuate con tecniche digitali (ad esempio con un DSP), il segnale proveniente dalla telecamera deve essere prefiltrato (per ridurre il problema dell'aliasing) e digitalizzato. Le tipiche operazioni svolte dal processore video sono:
  1. **CONVOLUZIONE:** attraverso questo tipo di operazione si cerca di simulare l'operazione di integrazione spaziale e temporale delle informazioni visive che avviene nei vari strati cellulari della retina.
  2. **EDGE DETECTION:** con questa operazione si aumenta il contrasto dell'immagine e vengono evidenziati i contorni degli oggetti: si ottiene in questo modo un'immagine più semplice e più facilmente rappresentabile con una visione a fosfeni.
  3. **RIDUZIONE DEI DATI E DEL RUMORE:** tale operazione viene realizzata effettuando la trasformata di Fourier del segnale ed eliminando le frequenze che contengono minor informazione (solitamente le frequenze più alte). Poiché il rumore si trova concentrato soprattutto nelle frequenze più elevate in questa fase si ottiene anche un aumento del rapporto segnale/rumore.
- **Trasmettitore/Ricevitore:** oltre a trasmettere il segnale deve essere in grado di trasmettere potenza per alimentare il dispositivo impiantato. Per impianti oculari si è pensato di utilizzare un sistema di



trasmissione a radio frequenza o un sistema di trasmissione ottica per mezzo di un raggio laser. Per gli impianti corticali può essere usato un sistema a radio frequenza o un cavo conduttore.

- **Chip di stimolazione:** deve generare gli impulsi elettrici da inviare agli elettrodi: gli impulsi devono avere ampiezza, frequenza e durata tali da suscitare una sensazione visiva nel paziente ma tali da non danneggiare i tessuti circostanti (a causa del riscaldamento per effetto Joule); al fine di evitare la dissoluzione dell'elettrodo a causa di correnti ioniche si preferisce usare impulsi bifasici (vedi figura sottostante).



- **Array di microelettrodi:** devono essere realizzati con materiali biocompatibili e devono avere forma tale da non provocare eccessivi stress meccanici al sito d'impianto. Si pensa che un livello di visione accettabile possa essere raggiunto utilizzando array 15x15 e 32x32 rispettivamente per impianti retinali e corticali.

## 7.2 POSSIBILI SITI DI IMPIANTO

In teoria è possibile suscitare una sensazione visiva in un paziente cieco stimolando elettricamente un punto qualsiasi del "percorso visivo".

Premesso che il sito di impianto dipenderà dal tipo di patologia su cui si vuole intervenire (la protesi deve essere impiantata a monte della zona danneggiata), i siti più idonei risultano essere la retina, il nervo ottico, il corpo genicolato laterale e la corteccia visiva.

Si è visto nel capitolo 4 che l'informazione visiva subisce la prima rielaborazione già a livello della retina; quindi più profondamente nel cammino visivo sarà inserita la protesi, maggiore sarà l'elaborazione che dovrà subire il segnale in uscita dalla telecamera prima di essere inviato agli elettrodi.

La **retina** è forse il luogo chirurgicamente più accessibile, ma essendo molto fragile e spesso solo 25  $\mu\text{m}$  il problema principale è la realizzazione di un array di microelettrodi per la stimolazione (sia dal punto di vista della forma che da quello dei materiali) che non provochi danni al sito d'impianto.

Attualmente sono in fase di studio protesi epiretinali (la protesi è posta tra lo strato di cellule gangliari e l'umor vitreo) e protesi subretinali (la protesi è posta nella parte posteriore della retina in sostituzione dei fotorecettori).

La caratteristica che rende interessanti questo tipo di protesi è la retinotopia, cioè quella proprietà per cui l'immagine viene trasmessa tra i vari strati della retina senza subire eccessive distorsioni di forma.

Il **nervo ottico** è un cavo spesso circa 3 mm e lungo 50 mm formato da circa 1 milione di fibre avvolto da membrane di tessuto connettivo le quali difficilmente possono essere rimosse chirurgicamente senza arrecare danni.

I test realizzati usando elettrodi circolari posizionati attorno al nervo ottico hanno evidenziato la difficoltà di focalizzare lo stimolo solo su una porzione di tessuto senza coinvolgere le fibre circostanti.

Un altro problema per questo tipo di protesi deriva dal fatto che le fibre del nervo ottico non sono rigidamente organizzate in accordo con la loro posizione nel campo visivo (fibre adiacenti nel nervo ottico non provengono necessariamente da cellule adiacenti nella retina).

Stimolazioni elettriche della **corteccia visiva** primaria su esseri umani sono state condotte a partire dagli anni '60: i pazienti sottoposti a questo esperimento affermavano di vedere spot luminosi; gli esperimenti degli anni successivi hanno permesso ai pazienti ciechi di riconoscere semplici "patterns" usando impianti

corticali. Questo tipo di approccio, sebbene sia quello che finora ha fornito i migliori risultati, presenta ancora molte difficoltà tra cui la necessità di sottoporre il paziente ad un delicato intervento di neurochirurgia; altri problemi sono dati dal corretto posizionamento e fissaggio degli elettrodi e dallo sviluppo di un efficace sistema per il trattamento del segnale.

Un impianto sul **corpo genicolato laterale** è attualmente irrealizzabile in quanto presenta oltre ai problemi visti per l'impianto corticale una maggiore difficoltà chirurgica.

Un approccio diverso al problema è dato dalle **protesi retinali ibride**: per esse vale lo stesso principio di funzionamento delle protesi retinali ma a differenza di queste ultime il contatto tra il dispositivo ed il sito che si vuole andare a stimolare è mediato da uno strato di neuroni attaccati agli elettrodi prima dell'impianto: studi attualmente in corso stanno cercando di guidare gli assoni dei neuroni trapiantati a formare connessioni funzionali con i neuroni del sistema nervoso centrale.

Il buon esito di questi esperimenti permetterebbe di ottenere un dispositivo facilmente impiantabile (l'intervento chirurgico è simile a quello necessario per le protesi retinali) ma in grado di essere usato per patologie che comportano danni alle cellule gangliari ed al nervo ottico.

### **7.3 REQUISITI FONDAMENTALI**

Il dispositivo deve restituire al paziente un livello di funzione visiva che gli permetta di recuperare una certa autosufficienza (ad esempio deve rendere il paziente in grado di muoversi in ambienti non familiari e di leggere testi stampati).

Quando si parla di protesi impiantabili uno dei primi aspetti da tenere in considerazione è quello della biocompatibilità: ciò significa che tutti i materiali utilizzati nella parte impiantabile non devono danneggiare né essere danneggiati dalla reazione dell'ambiente circostante.

Un altro aspetto importante è dato dalla forma del dispositivo: esso dovrà seguire la forma anatomica del luogo in cui viene inserito e dovrà essere ben fissato in modo da non essere influenzato dai movimenti del paziente.

Vista la delicatezza dei siti in cui avverrà l'impianto, il dispositivo deve necessariamente essere leggero e di piccole dimensioni e deve consumare poca energia per evitare un eccessivo riscaldamento.

Si è visto (vedi capitolo 4) che i recettori visivi dell'occhio umano sono in grado di adattarsi a diversi gradi di luminosità: lo stesso deve avvenire per una protesi visiva ad esempio utilizzando un sistema di acquisizione dell'immagine con controllo automatico del guadagno.

Un problema per questo genere di dispositivi è dato dalla crescita di tessuto fibroso attorno all'impianto: questo potrebbe comportare a lungo termine un aumento della resistenza d'interfaccia elettrodo-tessuto; il valore di tale resistenza potrebbe essere influenzato da cambiamenti di variabili fisiologiche anche a breve termine. È quindi necessario che il dispositivo abbia un sistema di controllo reazionato che gli permetta di variare l'intensità dello stimolo in funzione delle variazioni dell'ambiente circostante.

### **7.4 REQUISITI AVANZATI**

Alcune funzioni avanzate che si potranno richiedere ad una protesi visiva quando sarà raggiunto un grado di sviluppo maggiore di quello attuale sono:

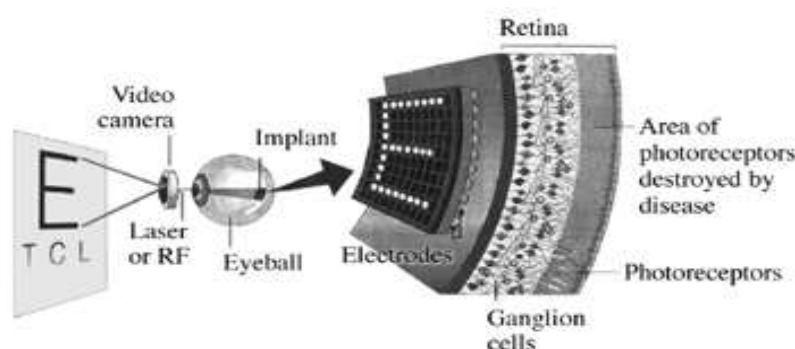
1. Monitoraggio della posizione dell'occhio affinché l'immagine percepita provenga dalla zona verso cui sta "guardando" l'occhio del paziente.
2. Ricostruire la visione tridimensionale tramite il recupero del senso di profondità
3. Recupero della percezione dei colori.

## VIII. PROTESI EPIRETINALI

*Una protesi epiretinale è un dispositivo con cui si cerca di ripristinare la funzione visiva attraverso la stimolazione elettrica della retina in corrispondenza dello strato di cellule gangliari. Il limite di questo tipo di impianto è la perdita di pre-elaborazione del segnale che avviene nel passaggio tra i vari strati della retina. Per questo è necessario aggiungere un dispositivo esterno di pre-elaborazione.*

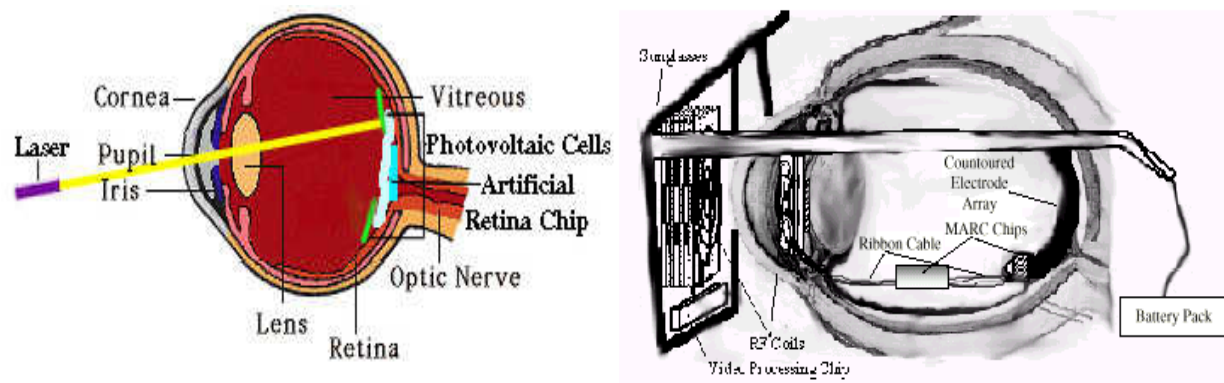
### 8.1 DESCRIZIONE

Una protesi epiretinale è costituita da un'unità esterna (di acquisizione ed elaborazione dell'immagine), da una unità impiantata (di stimolazione) e da un sistema di trasmissione tra le due unità.



L'immagine catturata dalla telecamera viene digitalizzata ed inviata ad un DSP dove viene elaborata con algoritmi che simulano i processi di pre-elaborazione che avvengono nella retina.

Il segnale in uscita dal DSP deve essere inviato al dispositivo impiantato; a questo riguardo gli approcci più interessanti sono dati dalla trasmissione ottica e dalla trasmissione a radio frequenza: tali metodi permettono un elevato trasferimento di potenza in grado di fornire l'alimentazione all'unità impiantata.

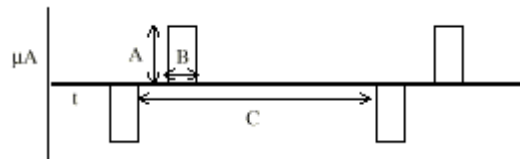


Nel sistema a RF (figura a destra) la trasmissione avviene per mezzo di un accoppiamento induttivo tra un avvolgimento primario esterno ed uno secondario impiantato in prossimità della cornea. Il segnale trasmesso è composto da una portante con frequenza dell'ordine dei MHz e dal segnale proveniente dal DSP con frequenza di alcuni KHz e modulato in ampiezza.

Nel caso di trasmissione per via ottica (figura a sinistra) si utilizza un raggio laser con  $\lambda=820$  nm (banda infrarossa) modulato in ampiezza dal segnale in uscita dal DSP; come ricevitore si utilizza un array di fotodiodi.

Il segnale ricevuto viene demodulato ed inviato al chip di stimolazione che genera gli impulsi di corrente e tramite un circuito di demultiplexing li indirizza ai singoli elettrodi (il chip e l'array di elettrodi sono collegati con una sottile striscia di poliimide).

I parametri che deve soddisfare il segnale agli elettrodi sono riportati nella figura seguente:

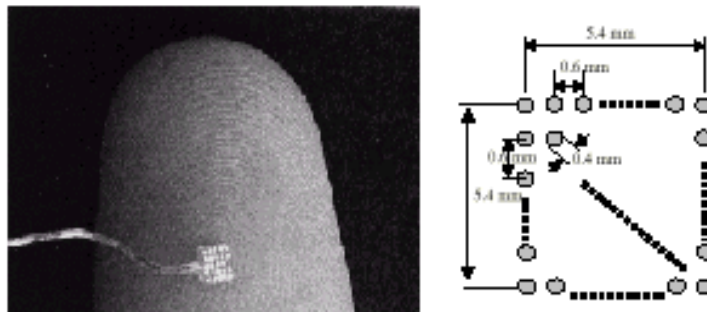


A= 100-600  $\mu$ A

B= 0.1-0.2 ms

C= 8-100 ms (corrispondenti ad una frequenza di 10-125 Hz)

L'array è fabbricato in gomma siliconica e contiene elettrodi in platino; per gli esperimenti su esseri umani sono stati utilizzati array 5x5, 10x10 (vedi figura) e sagomati a forma di lettere alfabetiche.



Attualmente gli studi sono rivolti verso la realizzazione di un array 15x15 che rappresenta il miglior compromesso tra definizione ed ingombro.

## 8.2 PATOLOGIE INDICATE

Questo dispositivo può essere usato per patologie quali la retinite pigmentosa e la degenerazione maculare che non comportano danni alle cellule gangliari ed al nervo ottico.

## 8.3 ESPERIMENTI SVOLTI

I primi esperimenti sulla stimolazione elettrica della retina cominciarono nel 1990 nell'ambito di uno studio congiunto tra il "Massachusetts Institute of Technology", la "Harvard Medical School" e la "Massachusetts Eye and Ear Infirmary Medical School": in questa sede si testò in vitro la risposta delle cellule gangliari a diversi tipi di stimoli elettrici; contemporaneamente esperimenti su animali (in particolare conigli) dimostravano la possibilità di ricevere segnali in corrispondenza della corteccia visiva in seguito a stimoli elettrici sulla retina.

I primi esperimenti portati a termine su soggetti umani sono stati svolti presso la "John Hopkins University". Gli esperimenti furono condotti su 15 pazienti non vedenti (13 affetti da RP e 2 da DM); in seguito alla stimolazione della retina tramite un piccolo elettrodo tutti i soggetti tranne uno furono in grado di localizzare la posizione dell'elettrodo sulla retina in base alla posizione del fosfene.

In questa sede fu tentato un altro esperimento su 2 pazienti ciechi usando elettrodi sagomati a forma di lettere alfabetiche: uno dei due pazienti fu in grado di riconoscere la lettera.

Esperimenti su soggetti umani sono tuttora in corso presso le sedi sopra citate ed in Germania presso le università di Bonn e Colonia nell'ambito del progetto "Retina Implant Association" fondato nel 1994.

#### **8.4 PROBLEMI IRRISOLTI**

Ricordando la struttura della retina si è visto che lo strato di cellule gangliari è ricoperto da un altro strato formato dagli assoni di tali cellule ed è su questo strato che viene posto l'array di elettrodi: è quindi molto difficile stimolare selettivamente una certa zona della retina senza stimolare anche gli assoni delle cellule delle regioni circostanti.

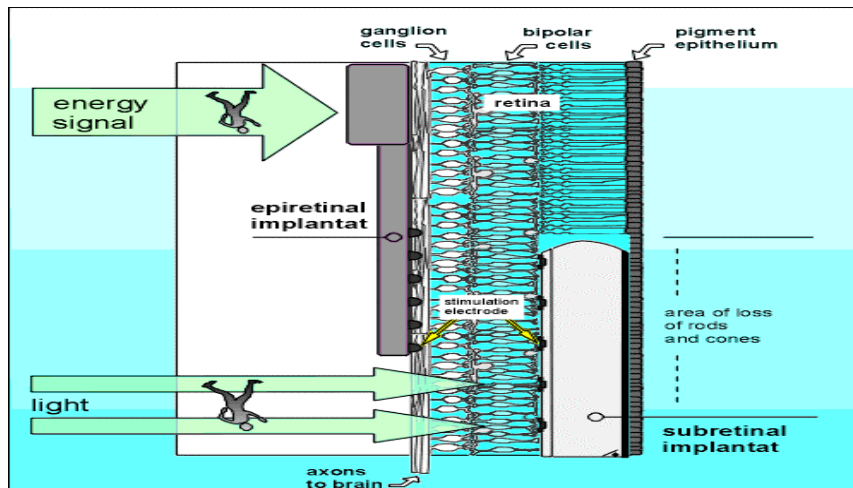
Notevoli problemi si stanno incontrando per il fissaggio della protesi: infatti la natura estremamente delicata della retina unita agli stress meccanici continui a cui è sottoposto l'occhio non hanno ancora permesso di trovare un metodo di ancoraggio dell'impianto che possa permettere di pensare ad impianti permanenti.

Un altro problema è dato dalla possibilità di formazione di tessuto fibroso attorno all'impianto che potrebbe comprometterne le prestazioni (ad esempio isolando elettricamente gli elettrodi).

Vi è infine il problema legato ai materiali ed alla biocompatibilità: infatti sebbene non si siano verificati problemi di infezioni negli esperimenti finora svolti, mancano ancora i dati sulla risposta dell'organismo ospite ad impianti a lungo termine (gli esperimenti sugli animali per lo studio della biocompatibilità sono appena iniziati).

## IX. PROTESI SUBRETINALI

*Negli impianti subretinali la protesi viene posta tra la retina e l'epitelio pigmentato in sostituzione dello strato di fotorecettori (coni e bastoncelli): in questo modo si vanno a stimolare le cellule bipolari. Nella figura sottostante vengono confrontate una protesi epiretinale con una subretinale: come si può notare la protesi subretinale è costituita da una sola unità in quanto non vi è bisogno di nessuna pre-elaborazione dell'immagine.*



### 9.1 DESCRIZIONE

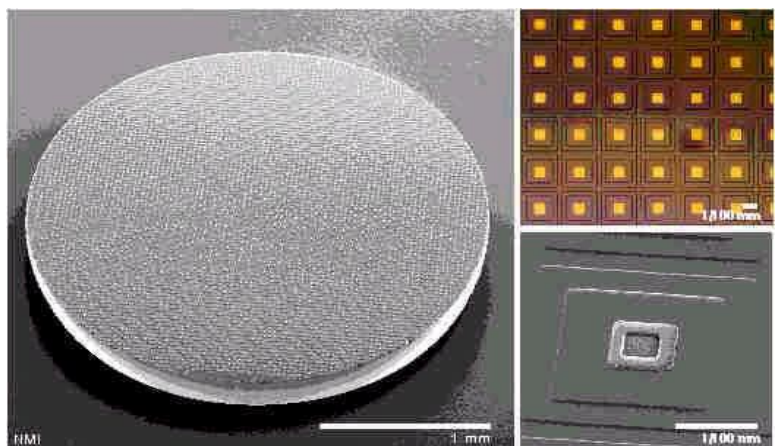
Il dispositivo in considerazione deve sostituire la funzione dei fotorecettori dell'occhio umano: esso è pertanto costituito da un array di fotodiodi che emettono una piccola corrente se colpiti da una radiazione luminosa.

L'array è realizzato in silicio, che può essere caricato elettricamente sia positivamente che negativamente in sede di costruzione: se una radiazione luminosa incide sul dispositivo si ha un passaggio di corrente dalla parte anteriore a quella posteriore del fotodiodo; la corrente risultante viene usata per stimolare lo strato di cellule bipolari per mezzo di microelettrodi affinché queste generino potenziali d'azione. In questo processo è essenziale che lo squilibrio di carica elettrica generata dal fotodiodo sia sufficiente a cambiare il potenziale di membrana delle cellule adiacenti di almeno 20 mV.

I prototipi creati in Germania nel 1996 presso il "Stuttgart-based Institute of Microelectronics" nell'ambito del "Subretinal Implant Project" contenevano 7000 elettrodi disposti su un disco del diametro di 3 mm e spesso 50  $\mu\text{m}$  (vedi figure a lato).

Ogni fotodiodo occupava un'area di  $20 \times 20 \mu\text{m}$ , il che permetteva di ottenere una densità di fotodiodi paragonabile a quella dei fotorecettori nella periferia della retina.

Gli elettrodi erano realizzati in oro ed avevano il diametro di 10  $\mu\text{m}$ , mentre la superficie dei fotodiodi era realizzata in silicio che è permeabile alla luce ma assicura un buon isolamento elettrico.



Attualmente è in fase di studio una seconda generazione di protesi subretinali: in particolare si sta cercando di determinare il tipo di impulso elettrico più adatto per stimolare opportunamente le cellule ON e le cellule OFF e si sta cercando di fare in modo che l'intensità di corrente ottenuta agli elettrodi sia proporzionale all'intensità della radiazione luminosa.

## ***9.2 PATOLOGIE INDICATE***

Con questo tipo di protesi è possibile intervenire su patologie che comportano danni ai fotorecettori, senza intaccare la funzionalità degli strati superiori della retina. Tra queste ricordiamo la retinite pigmentosa.

## ***9.3 ESPERIMENTI SVOLTI***

Per lo sviluppo del primo prototipo sono stati svolti esperimenti in vitro sulla risposta delle cellule bipolari a stimoli elettrici e sulla propagazione di tali stimoli attraverso la retina (la risposta veniva rilevata con un microelettrodo a vetro in corrispondenza delle cellule gangliari).

Sono tuttora in corso esperimenti su animali (soprattutto conigli e topi) su cui è stato effettuato un impianto subretinale: con tali esperimenti si testa il funzionamento della protesi registrando la risposta a stimoli visivi in corrispondenza della corteccia cerebrale.

Più recentemente, visti i buoni risultati ottenuti nelle fasi precedenti, si è dato il via ad esperimenti su animali al fine di testare la biocompatibilità dei materiali e di sviluppare tecniche chirurgiche di inserimento dell'impianto per poter dare inizio alla sperimentazione su soggetti umani.

## ***9.4 PROBLEMI IRRISOLTI***

La maggior parte dei problemi che si riscontra nelle protesi retinali è dovuto alla delicatezza del sito d'impianto: nelle protesi subretinali (ancor più che nelle epiretinali) sono ancora enormi le difficoltà riscontrate nell'inserire e nel fissare l'impianto senza arrecare danni al delicato tessuto della retina.

Gli impianti subretinali costituiscono l'approccio più recente al mondo delle protesi visive: mancano pertanto esperimenti su soggetti umani e dati sulla biocompatibilità sia a breve che a lungo termine.

Le protesi subretinali traggono energia direttamente dalla radiazione luminosa incidente: questo fatto, che indubbiamente rappresenta un vantaggio in termini di ingombro e semplicità del dispositivo, potrebbe anche essere un limite in quanto l'energia ricavata potrebbe non essere sufficiente per il corretto funzionamento della protesi.



## X. PROTESI CORTICALI

*Con questo tipo di protesi si cerca di recuperare la funzione visiva stimolando direttamente la porzione di corteccia cerebrale responsabile della formazione delle immagini.*

*L'aspetto che ha fatto prendere in considerazione la corteccia come sito d'impianto per una protesi visiva è la sua organizzazione retinotopica; alcuni studi svolti in questo campo hanno infatti indotto a pensare che stimoli visivi in punti vicini della retina vanno ad attivare punti vicini della corteccia visiva.*

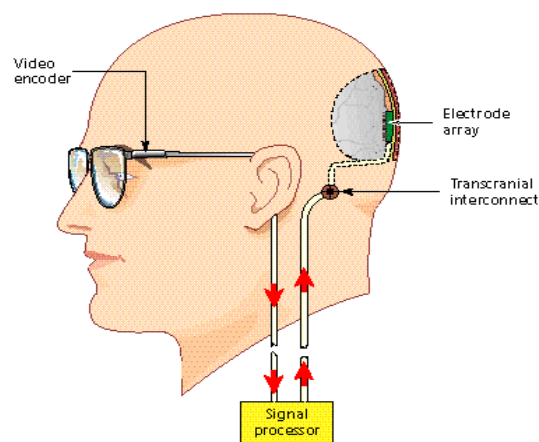
*Purtroppo esperimenti più recenti hanno costretto a rivedere questo concetto avendo rilevato alcune forti non linearità nella mappa retina-corteccia.*

*Ciò che fa ben sperare nel funzionamento degli impianti corticali è la capacità della corteccia visiva di adattare continuamente la sua attività in risposta ai cambiamenti degli stimoli visivi (sia a breve che a lungo termine).*

*Sfruttando questa proprietà (detta plasticità neuronale) si spera di indurre il cervello a "reimparare a vedere" facendo in modo che i fosfeni evocati rappresentino sempre più fedelmente il mondo reale.*

### 10.1 DESCRIZIONE:

Una protesi corticale segue lo schema generale mostrato nella figura sottostante:



Essa è cioè formata da una microcamera montata su un paio di occhiali che invia dati ad un'unità di elaborazione video: questa unità, oltre a svolgere le operazioni di filtraggio, edge enhancement, riduzione dei dati, corregge automaticamente le non linearità della mappa retina-corteccia visiva.

Il sistema comprende inoltre un generatore di impulsi elettrici ed un array di microelettrodi posto in contatto con la corteccia visiva primaria.

La connessione tra l'unità esterna (processore video e generatore di impulsi) e l'unità interna (array di elettrodi) può essere realizzata per mezzo di un sistema di trasmissione a RF simile a quello visto per le protesi epiretinali o tramite un cavo che attraversa la scatola cranica.

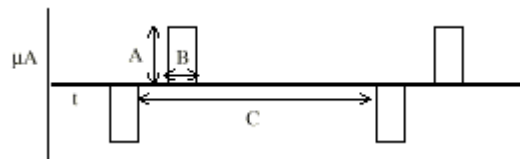
L'array può essere costituito da elettrodi piatti o da elettrodi appuntiti (i primi vengono solo posti in contatto con la corteccia mentre i secondi vengono impiantati per una profondità di 1-2 mm).

Usando elettrodi impiantati si ha il vantaggio di poter usare stimoli di intensità minore ma aumenta notevolmente il rischio di contrarre infezioni.

Gli esperimenti svolti inducono a pensare che un array di 32x32 elettrodi sarebbe sufficiente a recuperare un livello accettabile di funzione visiva (inclusa la capacità di leggere testi); volendo quindi realizzare un array 32x32 con uno spazio di 400  $\mu\text{m}$  tra un elettrodo e l'altro (per motivi spiegati più avanti) si otterrebbe un dispositivo con una superficie di circa 1.3  $\text{cm}^2$ .



Il segnale presente all'elettrodo deve essere di tipo bifasico con valori simili a quelli riportati nella figura a pagina seguente:



A= 1-5 mA (per elettrodi piatti)

A= 2-25  $\mu$ A (per elettrodi impiantati)

B= 0.5 ms

C= 20-250 ms (corrispondenti ad una frequenza di 4-50 Hz)

## 10.2 PATOLOGIE INDICATE

Le protesi corticali sono in teoria utilizzabili per tutte le patologie della retina (distacco di retina, degenerazione maculare, occlusione venosa e arteriosa, ecc.) e del nervo ottico (glaucoma).

## 10.3 ESPERIMENTI SVOLTI

Il primo esperimento di stimolazione elettrica della corteccia visiva fu condotto nel 1968 da Giles Brindley presso l'università di Cambridge; egli stimolò elettricamente la corteccia visiva di alcuni volontari ciechi tramite l'impianto di un array di 180 elettrodi.

Esperimenti simili condotti da W. H. Dobelle negli anni successivi presso la University of Utah portarono alle seguenti scoperte:

- I. Inviando corrente ad un singolo elettrodo si ha da parte del paziente la percezione di un fosfene
- II. Inviando corrente a più elettrodi contemporaneamente il paziente percepisce più fosfene distinti
- III. La posizione dei fosfene nel campo visivo rispecchia abbastanza fedelmente la posizione degli elettrodi nella corteccia
- IV. Due stimoli distinti danno origine a due fosfene distinti se la distanza tra i due elettrodi non è inferiore a 250-500  $\mu$ m.

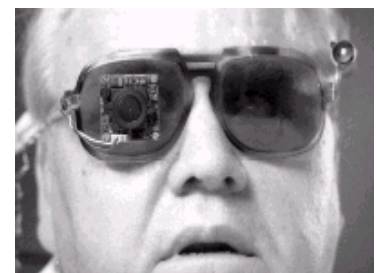
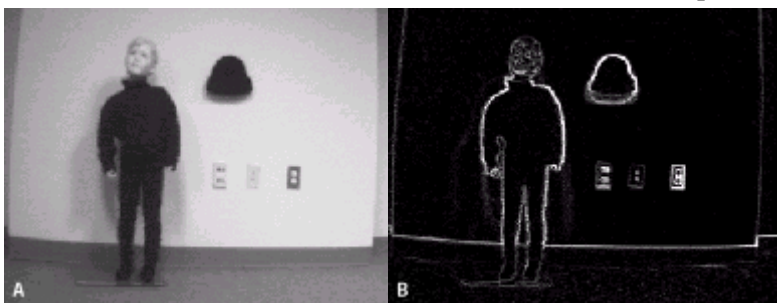
Lo stesso Dobelle è riuscito nel gennaio 1999 a ristabilire un'acuità visiva di 1/20 in un paziente completamente cieco da 20 anni tramite un impianto corticale (foto a destra).

Nel dispositivo ideato da Dobelle sono stati utilizzati 64 elettrodi che ricevono impulsi da un generatore comandato da un notebook computer.

I dati sono forniti da una telecamera CCD 297x512 pixel e da un sensore ad ultrasuoni utilizzato per il calcolo delle distanze (la telecamera ed il sensore sono montati su un paio di occhiali).

Il dispositivo comprende anche un'interfaccia che ne permette il collegamento ad un televisore o ad un personal computer.

Dopo alcune settimane di esercitazione il paziente riusciva a riconoscere alcuni semplici oggetti (in modo simile a quanto mostrato nella figura B) ed a muoversi in ambienti non familiari come la stazione della metropolitana.



#### ***10.4 PROBLEMI IRRISOLTI***

I problemi principali legati a questo tipo di impianto sono la difficoltà dell'operazione chirurgica per l'inserimento della protesi ed il successivo rischio di infezioni, più elevato rispetto agli altri siti di impianto(essendo l'area stimolata molto maggiore rispetto alle protesi oculari).

Un altro problema è dato dal fatto che non si è ancora trovato un metodo efficace per fissare gli elettrodi alla corteccia in modo che il funzionamento del dispositivo non sia influenzato dai movimenti del paziente.

Sebbene la strada degli impianti corticali sia stata la prima ad essere percorsa nell'ambito delle protesi visive non è stato ancora raccolto un numero sufficiente di dati sulla biocompatibilità a lungo termine.

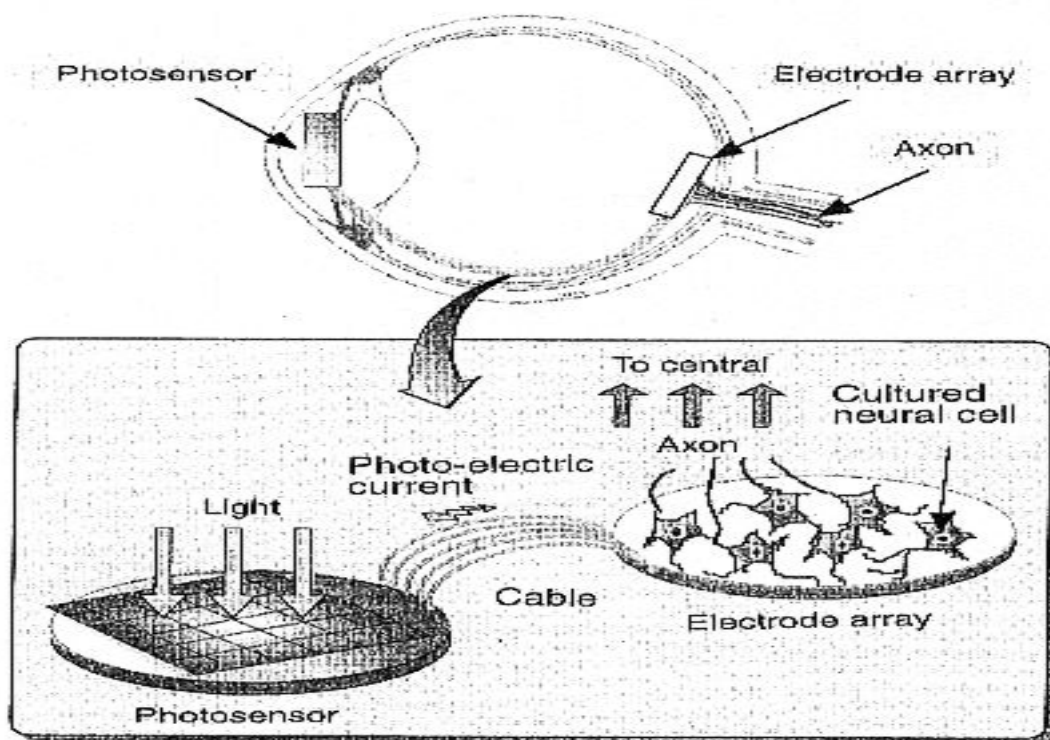
## XI. PROTESI RETINALI IBRIDE

*Questo tipo di protesi nasce dalla necessità di favorire una connessione stabile tra i neuroni del paziente ed il dispositivo. Una protesi retinale ibrida è una protesi oculare costituita da un'unità esterna di acquisizione ed elaborazione dell'immagine e da un'unità impiantata di stimolazione; ciò che differenzia una protesi ibrida da una epiretinale è la coltura di neuroni attaccata all'array di elettrodi, i cui assoni dovrebbero stabilire una connessione sinaptica con i neuroni del sistema nervoso del paziente; in questo il paziente dovrebbe essere in grado di recuperare parzialmente il senso della vista tramite la percezione di fosfeni in seguito alla somministrazione di stimoli elettrici in corrispondenza dell'array di elettrodi.*

### 11.1 DESCRIZIONE

Il funzionamento di una protesi retinale ibrida è simile a quello di una protesi epiretinale: il segnale proveniente dalla telecamera viene elaborato dall'unità esterna e quindi trasmesso all'unità impiantata per via ottica (ad esempio con una luce laser).

L'unità impiantata è costituita da un ricevitore ottico (ad esempio un array di fotodiodi), un cavo di connessione e da un array di elettrodi.



Come si vede dalla figura la connessione tra l'array di elettrodi ed il tessuto nervoso del paziente avviene per mezzo di uno strato di neuroni che vengono attaccati sull'array prima di procedere all'impianto (il complesso elettrodi-neuroni coltivati è detto interfaccia neuronale).

L'array di elettrodi è costruito a partire da un substrato di silicio con tecnologia a film sottile; al fine di ottenere una migliore adesione tra neuroni coltivati ed elettrodi, l'array viene ricoperto da uno strato di collagene.

Affinché il dispositivo funzioni è necessario che gli assoni dei neuroni dell'interfaccia neuronale formino connessioni sinaptiche con i neuroni del paziente (ad esempio nel corpo genicolato laterale).

## ***11.2 PATOLOGIE INDICATE***

Poiché si suppone che l'interfaccia neurale stabilisca contatto con i neuroni dei nuclei genicolati laterali questo dispositivo sarebbe utilizzabile anche per patologie che prevedono la perdita delle cellule gangliari e del nervo ottico (glaucoma), oltre a quelle viste per la protesi epiretinali.

Si otterrebbe cioè un dispositivo con gli stessi campi di applicazione di una protesi corticale ma che conserverebbe i vantaggi di una protesi oculare in termini di intervento chirurgico.

## ***11.3 ESPERIMENTI SVOLTI***

Negli esperimenti attualmente in corso presso la Nagoya University si sta studiando un metodo per accelerare e guidare la crescita degli assoni dei neuroni dell'interfaccia neuronale:

Nei test in vitro si sta cercando di guidare gli assoni per mezzo di un gradiente di concentrazione di fattori neurotrofici: tali esperimenti hanno portato ad identificare un buon numero di sostanze che favoriscono la crescita degli assoni ma non si è ancora trovato il metodo di guidare la crescita in una direzione voluta.

Esperimenti condotti su animali (in particolare su gatti) hanno dimostrato che la crescita degli assoni può essere favorita anche utilizzando cellule di Schwann o sostituendo il nervo ottico danneggiato con spezzoni di nervo sciatico; in tali esperimenti non si è però ancora riusciti a stabilire connessioni funzionali tra i neuroni.

## ***11.4 PROBLEMI IRRISOLTI***

Come evidenziato dai risultati degli esperimenti non si è ancora trovato un metodo efficace per guidare gli assoni nella direzione voluta e per indurli a stabilire connessioni sinaptiche con altri neuroni.

Ammettendo di riuscire in quanto detto sopra non è comunque assicurata la proprietà di retinotopia: ciò significa che i fosfeni evocati si troverebbero in posizioni dello spazio non corrispondenti a quelle desiderate rendendo molto difficile la ricostruzione dell'immagine.

## Appendice A: ACUITA' VISIVA

L'acuità visiva o acutezza visiva è la capacità di percepire separati due punti molto vicini tra loro. Si distinguono una acutezza visiva diretta (della fovea) ed una indiretta (del resto della retina).

L'acuità visiva è massima nella fovea e decresce mano a mano che ci si ne allontana (già a 2 gradi dalla fovea l'acutezza si riduce di quasi la metà).

Si definisce angolo visivo l'angolo formato dai raggi che, partendo dall'oggetto, si incrociano nel punto nodale dell'occhio e finiscono sulla retina. L'angolo visivo è direttamente proporzionale alla grandezza dell'oggetto e inversamente proporzionale alla distanza dell'oggetto dall'occhio. Il più piccolo angolo visivo, sotteso da due punti molto ravvicinati, ancora percepiti come separati, viene definito minimo separabile e corrisponde approssimativamente ad 1' di arco. Questo significa che due punti per essere percepiti come separati devono essere ad una distanza angolare di 1' di arco. Generalmente, però, l'acuità visiva non si misura con grandezze angolari ma come rapporto tra due distanze: la distanza (d) alla quale un occhio riconosce un simbolo (generalmente 5 m) e la distanza (D) alla quale quel simbolo viene riconosciuto da un occhio normale (sano). Tale rapporto è detto visus ( $V = d/D$ ) ed esprime il potere di separazione dell'occhio, quindi l'acutezza visiva.

Per la misurazione dell'acuità visiva sono usati gli ottotipi. Questi ultimi sono tabelle illuminate su cui sono stampati simboli di vario tipo. Si usano anelli incompleti o la lettera E con cui si fanno test detti angolari perché il soggetto deve indicare l'orientamento dei simboli o caratteri alfabetici, numeri e figure elementari (per i bambini) nei test morfoscopici in cui si richiede anche il riconoscimento della forma.

Gli ottotipi più largamente usati sono composti da lettere di grandezza diversa, ordinate per righe, in modo tale che ogni riga corrisponda ad un diverso angolo visivo. Le lettere più piccole (nell'ultima riga in basso), possono essere lette solo dai soggetti con acuità visiva normale: esse sottendono, a 5 metri di distanza, un angolo di 5' e sono inscritte in un quadrato di 7.3 mm di lato. Le linee che formano le lettere hanno uno spessore pari ad un quinto del lato del quadrato (1.46 mm) per cui sottendono un angolo di 1'. Quando un occhio riconosce le lettere di questa riga alla distanza di 5m, il suo visus è 5/5 o (espresso in decimi) 10/10.

Le lettere delle altre righe hanno dimensioni tali da sottendere angoli visivi sempre maggiori. Negli ottotipi usati in Italia (decimali) a ciascuna delle dieci righe corrisponde, alla distanza di 5m, un valore del visus espresso in decimi: da 1/10 a 10/10.

Ad esempio le lettere della quinta riga sottendono un angolo di 10', quindi se vengono riconosciute solo alla distanza di 5 m indicano una acuità visiva di 5/10. La lettera maggiore dell'ottotipo (prima riga) è iscritta in un quadrato di 73 mm di lato e sottende un angolo di 50', quindi se viene risolta soltanto alla distanza di 5 m indica una acuità visiva di 1/10.

Nel caso in cui il soggetto non distingua neppure il carattere della prima riga, alla distanza di 5m, lo si deve avvicinare gradualmente all'ottotipo: se riconosce il carattere a 2.5 m, il visus è di 1/50, se lo legge a 50 cm è di 1/100.

Valori ancora più piccoli dell'acuità visiva vengono invece espressi nei seguenti modi: conta delle dita, moto della mano, percezione della luce, percezione incerta della luce, visus abolito o spento.

L'acutezza visiva va sempre misurata prima in visione monoculare e successivamente può essere misurata in visione binoculare. In tal caso risulta leggermente superiore a quella registrata monocularmente con l'occhio migliore.

Le Diottrie indicano la potenza delle lenti necessarie per ottenere un buon visus: questo significa che i 10 decimi possono essere letti, sia da persone che non portano lenti, sia da persone che hanno un difetto completamente corretto con lenti. Nel primo caso si tratta di persone che hanno 10 decimi al naturale, nel secondo di 10/10 con correzione mediante lenti.

Per determinare l'acutezza visiva da vicino (circa 33cm) vengono usati particolari ottotipi composti da brani stampati con caratteri di grandezze decrescenti e scelti secondo una progressione analoga a quella adottata per gli ottotipi da lontano. Questo tipo di esame va eseguito dopo quello per la rilevazione del visus da lontano e serve per la prescrizione di lenti da lettura.

Il visus può essere ridotto per i seguenti motivi: difetti di impostazione ottica (miopia e ipermetropia), difetti di formazione dell'immagine (astigmatismo), opacizzazione di una delle componenti del sistema diottrico dell'occhio, alterazioni della retina, della corioide, dei centri ottici o dei centri corticali. Solo la riduzione del visus da difetti di impostazione ottica o di formazione delle immagini può essere corretta con le lenti.

## Appendice B: OTTICA GEOMETRICA

L'ottica geometrica si basa sul principio della propagazione rettilinea della luce e sull'indipendenza dei raggi luminosi (assumendo che essi non interagiscano) e può essere utilizzata per descrivere i fenomeni di riflessione e rifrazione. Trova numerose applicazioni nel progetto di lenti e altri componenti di strumenti ottici.

### B.1 RIFLESSIONE E RIFRAZIONE

Quando un raggio luminoso incide sulla superficie di separazione di due mezzi omogenei, una parte della luce viene riflessa (raggio riflesso), mentre la parte restante (raggio rifratto) penetra nel secondo mezzo dove può essere assorbita oppure continuare la propagazione. Il piano di incidenza è per definizione quello individuato dal raggio incidente e dalla retta perpendicolare alla superficie di separazione nel punto di incidenza. Secondo le leggi dell'ottica geometrica il raggio incidente, il raggio riflesso ed il raggio rifratto sono contenuti nel piano di incidenza. In riferimento alla figura 1 si definiscono i seguenti angoli:

$i$  = angolo d'incidenza

$r$  = angolo di riflessione (misurato rispetto alla normale alla superficie)

$t$  = angolo di rifrazione (misurato rispetto alla normale alla superficie)

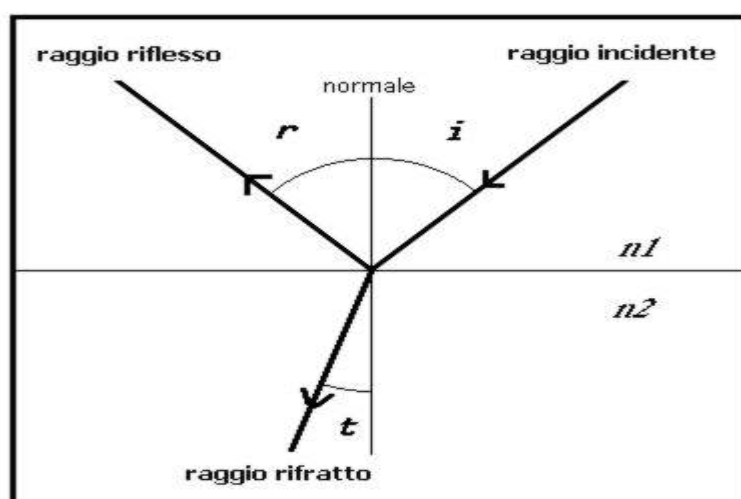


Figura 5

La legge della riflessione stabilisce che:

$$i = r$$

La legge della rifrazione stabilisce che:

$$\frac{\sin i}{\sin t} = \frac{v_1}{v_2} = \text{costante}$$

In cui  $v_1$  e  $v_2$  sono rispettivamente le velocità della luce nei mezzi 1 e 2.

Definendo l'indice di rifrazione  $n$ , di un mezzo come il rapporto:

$$n = \frac{\text{velocità della luce nel vuoto}}{\text{velocità della luce nel mezzo}} = \frac{c}{v}$$

si ottiene la legge di Snell:

$$\frac{\sin i}{\sin t} = \frac{n_1}{n_2}$$

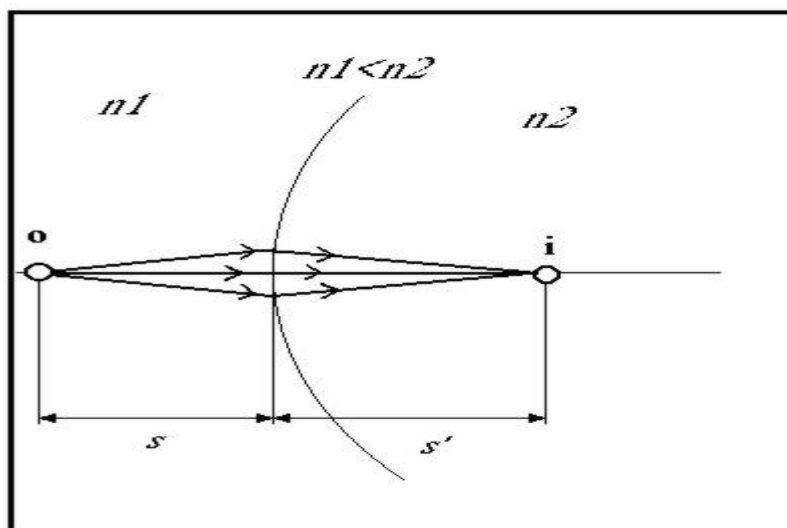
In genere, l'indice di rifrazione delle sostanze trasparenti cresce al crescere della densità (la velocità della luce è più bassa nei mezzi più densi). Come conseguenza della legge di Snell, inoltre, un raggio che raggiunge in direzione obliqua la superficie di separazione tra due mezzi viene deviato penetrando nel secondo mezzo: in particolare si avvicina alla perpendicolare se quest'ultimo ha indice di rifrazione maggiore del primo e si allontana nel caso contrario

## B.2 RIFRAZIONE SU SUPERFICI SFERICHE

Si considerino due mezzi con indici di rifrazione  $n_1$  e  $n_2$  separati da una superficie sferica di raggio  $R$ .

Si assuma che l'oggetto nel punto  $O$  sia nel mezzo il cui indice di rifrazione è  $n_1$  e valga infine l'ipotesi di considerare raggi parassiali (quasi paralleli all'asse ottico).

Tutti i raggi che hanno avuto origine dal punto oggetto saranno rifratti alla superficie sferica e si focalizzeranno in un singolo punto  $i$ , il punto immagine (vedi figura 2)



**Figura 6**

Applicando la legge di Snell ed in seguito ad alcune semplici considerazioni geometriche si ricava:

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{(n_1 - n_2)}{R}$$

Per tale equazione valgono le seguenti convenzioni

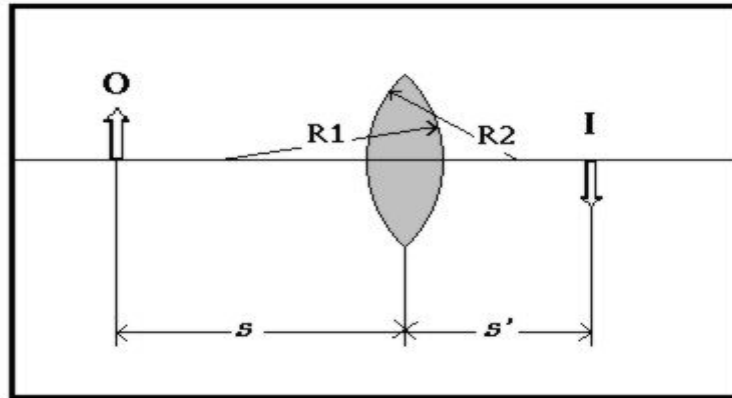
- $s$  è + se l'oggetto sta davanti alla superficie (oggetto reale)
- $s$  è - se l'oggetto sta dietro la superficie (oggetto virtuale)
- $s'$  è + se l'immagine sta dietro la superficie (immagine reale)
- $s'$  è - se l'immagine sta davanti alla superficie (immagine virtuale)
- $R$  è + se il centro di curvatura sta dietro la superficie
- $R$  è - se il centro di curvatura sta davanti alla superficie

## B.3 LE LENTI SOTTILI

La lente è un mezzo trasparente limitato da due facce ben levigate di cui almeno una è curva. Si tratta della più importante applicazione del fenomeno della rifrazione. Secondo la curvatura delle facce, le lenti possono essere: sferiche, cilindriche, paraboliche. La trattazione della rifrazione dei raggi luminosi attraverso una

lente risulta, nel caso generale, molto complessa; ci limitiamo pertanto al caso particolare delle lenti molto sottili (lo spessore è molto piccolo rispetto al raggio di curvatura) e raggi parassiali

Si consideri una lente sottile con indice di rifrazione  $n$  e raggi di curvatura  $R_1$  e  $R_2$  (figura 3).



**Figura 7**

Come conseguenza dell'equazione vista per le superfici sferiche si ottiene:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

In questa equazione  $n$  sta ad indicare il rapporto tra l'indice di rifrazione della lente ( $n_2$ ) e quello del mezzo circostante ( $n_1$ ); nel caso in cui il mezzo circostante sia aria (indice di rifrazione unitario)  $n$  è proprio l'indice di rifrazione della lente.

Definiamo ora la **distanza focale**  $f$  di una lente come la distanza dell'immagine che corrisponde ad una distanza dell'oggetto infinita; dalla equazione precedente, per  $s \rightarrow \infty$  e  $s' = f$  si ricava l'**equazione dei costruttori di lenti**:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

dalle ultime due equazioni si ricava anche:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

Si definisce potenza della lente il rapporto:

$$D = \frac{1}{f}$$

La potenza della lente viene misurata in **numero di diottrie**.

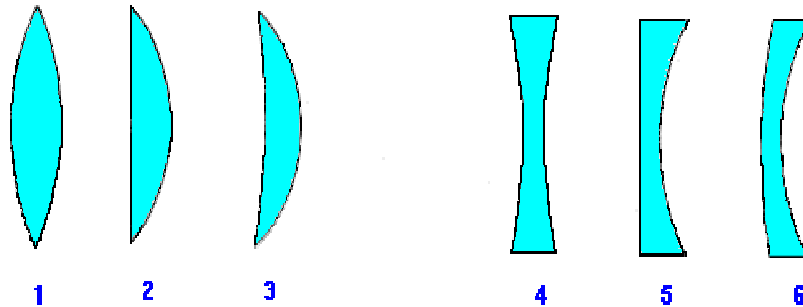
#### **B.4 LENTI CONVERGENTI E LENTI DIVERGENTI**

Nella presente trattazione ci occupiamo delle lenti sferiche, dividendole in due gruppi: convergenti (quelle che fanno convergere un fascio di raggi paralleli) e divergenti (quelle che li fanno divergere).



Una lente convergente (più grossa al centro che agli orli) si può pensare ottenuta da una coppia di prismi riuniti per le basi: i raggi emergenti, deviando verso le basi, sono portati a convergere.

Una lente divergente (più grossa agli orli che al centro) ricorda una coppia di prismi riuniti per gli spigoli: i raggi emergenti emergono deviando verso le basi. Sia le lenti convergenti che le divergenti si possono classificare in tre tipi: biconvessa, piano-convessa, concavo-convessa (o menisco convergente), biconcava, piano-concava, convesso-concava (o menisco divergente).



#### CONVERGENTI:

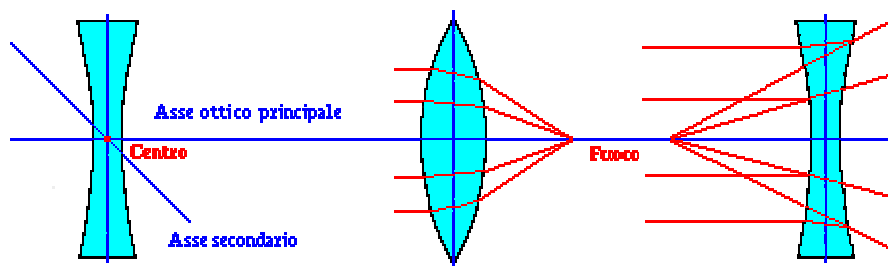
1) biconvessa, 2) piano-convessa, 3) concavo-convessa

#### DIVERGENTI:

4) biconcava, 5) piano-concava, 6) convesso-concava

Si chiama **asse ottico principale** la retta congiungente i centri delle superfici sferiche che delimitano la lente; nel caso di lenti piano-sferiche coincide con la retta passante per il centro della superficie sferica e perpendicolare alla superficie piana. Si chiama **asse secondario** ogni retta passante per il centro ottico.

È denominato **centro** il punto dell'asse ottico della lente sottile che gode della proprietà di non deviare le radiazioni luminose passanti per esso. Il centro divide il segmento congiungente i centri di curvatura in parti direttamente proporzionali ai raggi.



Il **fuoco** di una lente è il punto dell'asse principale nel quale convergono i raggi di un fascio monocromatico, parallelo al medesimo asse, dopo aver inciso sulla lente.

Si chiama **distanza focale** la distanza del fuoco dal centro della lente; vale la seguente regola:

- Una lente convergente ha distanza focale positiva ( $f > 0$ )
- Una lente divergente ha distanza focale negativa ( $f < 0$ )

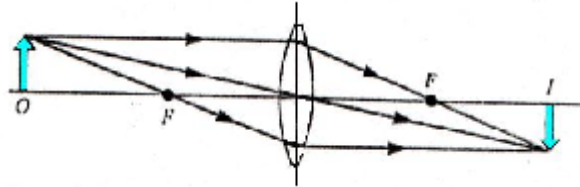
Si definisce infine l'ingrandimento trasversale  $M$  della lente come il rapporto della la dimensione dell'immagine,  $y'$ , con la dimensione dell'oggetto,  $y$ , ed è espresso dalla relazione:

$$M = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} = \frac{f}{s - s'}$$

### **B.5 COSTRUZIONE GRAFICA DEI RAGGI LUMINOSI PER LENTI SOTTILI**

Per localizzare l'immagine, si tracciano i tre raggi seguenti dalla cima dell'oggetto:

1. Un primo raggio è parallelo all'asse ottico. Dopo essere stato rifratto dalla lente, questo raggio passa per uno dei punti focali.
2. Il secondo raggio passa per il centro della lente. Questo raggio continua in una linea retta.
3. Il terzo raggio passa attraverso il fuoco  $F$  ed emerge dalla lente parallelamente all'asse ottico.



### **B.6 COMBINAZIONE DI LENTI SOTTILI**

Se si usano due lenti sottili per formare un'immagine, il sistema può essere trattato nel modo seguente. Dapprima si calcola l'immagine della prima lente come se la seconda lente non fosse presente. Successivamente, l'immagine della prima lente è trattata come oggetto della seconda lente. L'immagine della seconda lente è l'immagine finale del sistema. Se l'immagine della prima lente sta a destra della seconda, allora l'immagine è trattata come un oggetto virtuale per la seconda lente (cioè  $s$  negativo).

La stessa procedura può essere estesa ad un sistema di tre o più lenti.

L'ingrandimento totale eguaglia il prodotto degli ingrandimenti delle singole lenti.

Nel caso in cui due lenti con focali  $f_1$  e  $f_2$  siano poste in contatto, tale sistema può essere rappresentato da una singola lente la cui focale,  $f$ , è data dalla formula sottostante:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

## Appendice C: ESERCIZI

### ESERCIZIO 1

*Un soggetto ipermetrope porta occhiali da  $D=+2$  diottrie. Determinare la distanza del punto prossimo e la distanza della visione distinta dell'occhio non corretto da occhiali.*

L'ipermetrope porta una lente convergente la cui distanza focale, espressa in metri, è uguale all'inverso del potere diottrico  $D$  espresso in diottrie:

$$D = \frac{1}{f}$$

Nel nostro caso si ha  $f = +50\text{cm}$

Poiché per un occhio normale la distanza dall'occhio del punto prossimo (vedi a pagina 2) è pari a 8 cm, ponendo, nell'espressione:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

$$p = 8\text{cm}$$

si ha:

$$\frac{1}{8} + \frac{1}{q} = \frac{1}{50}$$

da cui  $q = -9.5\text{cm}$ , che rappresenta la distanza del punto prossimo dall'occhio non corretto da occhiali.

La distanza della visione distinta è la minima distanza (nell'occhio normale è di circa 25 cm) alla quale un oggetto può essere focalizzato sulla retina senza sensibile sforzo di accomodamento. Essendo la distanza normale della visione distinta pari a 25 cm, ponendo  $p = 25\text{cm}$  si ha

$$\frac{1}{25} + \frac{1}{q} = \frac{1}{50}$$

da cui  $q = -50\text{cm}$ , che rappresenta la distanza della visione distinta per l'occhio non corretto da occhiali.

### ESERCIZIO 2

*Un soggetto porta occhiali da -3 diottrie. Determinare la distanza del punto remoto, del punto della visione distinta e del punto prossimo dell'occhio non corretto da occhiali.*

Poiché il potere diottrico è negativo, si tratta di un soggetto miope, (la miopia si corregge con lenti divergenti che hanno distanza focale negativa ( $D = \frac{1}{f}$ )), in cui il punto remoto è localizzato alla distanza finita di

$\frac{1}{3}\text{m} = 33\text{cm}$ . Ripetendo le stesse considerazioni dell'esercizio precedente ( $p = 8\text{cm}$ ), si ha:

$$\frac{1}{8} + \frac{1}{q} = -3 \cdot 10^{-2}$$

da cui  $q = -6.4\text{cm}$  (distanza del punto prossimo).

La distanza della visione distinta è la minima distanza (nell'occhio normale è di circa 25 cm) alla quale un oggetto può essere focalizzato sulla retina senza sensibile sforzo di accomodamento.

$$\frac{1}{25} + \frac{1}{q} = -3 \cdot 10^{-2}$$

da cui  $q = -14.2 \text{ cm}$  (distanza della visione distinta).

### ESERCIZIO 3

Il diametro della pupilla dell'occhio vale  $D = 3 \text{ mm}$ . Calcolare il potere risolutivo per la luce di lunghezza d'onda  $\lambda = 600 \text{ nm}$ .

L'inverso del valore dell'angolo visivo (vedi appendice A) si chiama potere risolutivo. Il più piccolo angolo ancora risolvibile vale:

$$\sigma_m = \frac{\lambda}{D} = \frac{600 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \cong 1'$$

Due punti quindi possono essere visti distinti se come minimo sono visti sotto un angolo di un primo, che è l'angolo di visuale, per esempio, sotto cui appare un uomo a dieci chilometri di distanza. Il potere risolutivo dell'occhio umano vale quindi:

$$\frac{1}{\sigma_m} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}} = 5000$$

Questo risultato rappresenta ovviamente solo un'approssimazione grossolana. Per avere un valore più preciso avremmo dovuto inserire nella formula non la lunghezza d'onda nel vuoto ma quella (inferiore) nell'umore vitreo dell'occhio. Però, dato che il diametro della pupilla, a seconda della luminosità, può variare fra 2 mm e 8 mm, una maggior precisione nei calcoli non avrebbe senso.

### ESERCIZIO 4

Le lenti di Fig.1 hanno raggi di curvatura di 40cm e sono fatte di vetro con  $n=1,65$ . Calcolare le loro distanze focali.

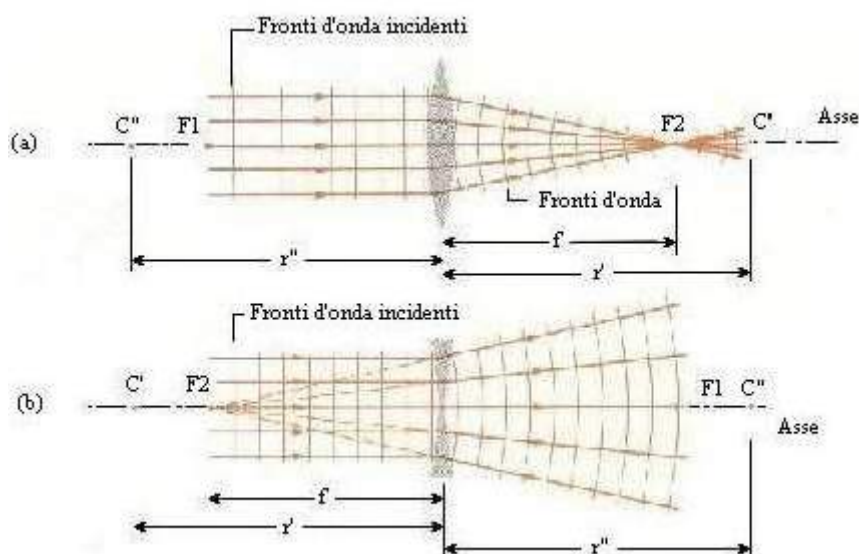


Figura 8

Poiché  $C'$  sta nello spazio ottico  $R$  della lente di Fig.1a,  $r'$  è positivo (+40 cm) (vedi appendice B). Poiché  $C''$  sta nello spazio ottico  $V$ ,  $r''$  è negativo (-40 cm). Sostituendo nella formula dei fabbricanti di lenti, si ha:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \left( \frac{1}{r'} - \frac{1}{r''} \right) = (1,65-1) \cdot \left( \frac{1}{+40cm} - \frac{1}{-40cm} \right)$$

cioè:

$$f = +31cm$$

Una distanza focale positiva indica che il fuoco  $F_2$  è nello spazio ottico  $R$  della lente, in accordo con la Fig.1a, e che luce parallela incidente sulla lente, dopo rifrazione, converge e forma un'immagine reale.

In Fig.1b,  $C'$  sta nello spazio ottico  $V$  della lente per cui  $r'$  è negativo (-40 cm). Poiché  $r''$  è positivo (+40cm), l'equazione:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \left( \frac{1}{r'} - \frac{1}{r''} \right) = (1,65-1) \cdot \left( \frac{1}{-40cm} - \frac{1}{+40cm} \right)$$

dà:

$$f = -31cm$$

Una distanza focale negativa implica che, in coerenza con la Fig.1b, il fuoco  $F_2$  è nello spazio ottico  $V$  della lente e che luce parallela incidente sulla lente, dopo rifrazione, diverge e forma un'immagine virtuale.

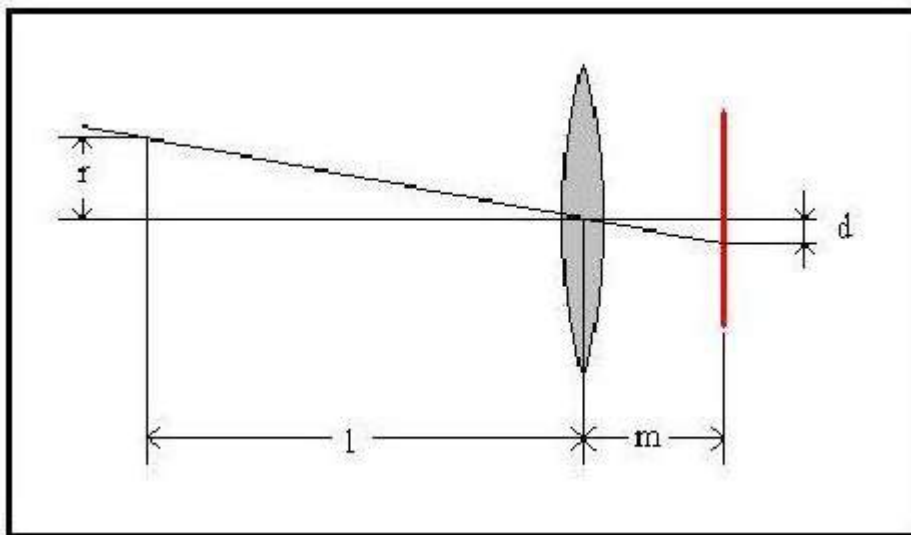
## ESERCIZIO 5

*Calcolare la risoluzione angolare dell'occhio.*

*Calcolare, inoltre, la risoluzione laterale dell'occhio per un oggetto posto ad una distanza di 6m .*

Per calcolare la risoluzione angolare si usa il modello dell'occhio ridotto: in tale modello tutti i mezzi pre-retinali vengono rappresentati con una lente posta ad una distanza  $m = 16,7mm$  dalla retina (vedi figura in basso). Sapendo che la distanza media ( $d$ ) tra due fotorecettori nella retina è di circa 5 micron , la risoluzione angolare  $\alpha$  si ottiene dall'espressione:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{d}{m}\right) = 0.017^\circ$$



**r = risoluzione laterale**  
**d = 5 μm**  
**l = distanza dell'oggetto**  
**m = 16,7 mm**

Volendo calcolare la risoluzione laterale ( $r$ ) per un oggetto distante 6 m si usa l'espressione

$$r = \left( \frac{d \cdot l}{m} \right) = 5mm$$