

## ANATOMO FIOLOGIA DELL'APPARATO VISIVO

### FASCIA DEL BULBO (CAPSULA DI TENONE)

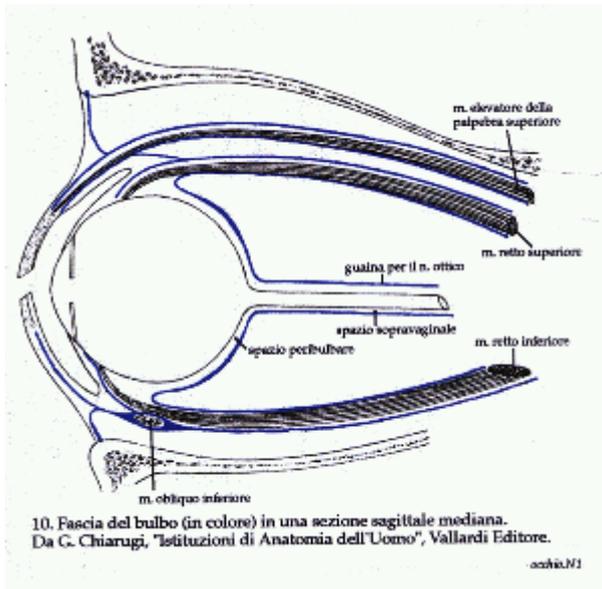


Fig. 10. Fascia del bulbo

La fascia del bulbo, o capsula di Tenone, (Fig. 10) è una formazione connettivale e lamellare, che nella sua parte principale ha forma di sfera cava e nella quale è contenuto e si muove il bulbo oculare. E' applicata all'emisfero posteriore del bulbo, e lo separa dal corpo adiposo dell'orbita; si prolunga in avanti, dietro al fornice congiuntivale, fin presso al margine della cornea. Si connette, per mezzo di un suo prolungamento imbutiforme, al contorno dell'orbita e contrae speciali rapporti con i muscoli oculari. Si ritiene che si sia differenziata come una dipendenza dell'apparato muscolare.

La parte posteriore della fascia, che sta in più diretto rapporto col bulbo, ed alla quale più propriamente si adatta il nome di capsula del bulbo, si presenta nella sua parte centrale, attorno al nervo ottico, assai sottile, cosicché vista dall'avanti lascia trasparire il corpo adiposo; dà passaggio al nervo ottico, e si riflette sulla superficie di questo, coprendone la guaina durale, in forma di membranella sottile e poco distinta.

Di dietro in avanti, modellandosi sulla sclera, la capsula aumenta di grossezza, raggiungendo un massimo circa a livello dell'equatore del bulbo. A questa parte posteriore della capsula fa direttamente seguito la parte anteriore, piuttosto sottile e traslucida che, insinuandosi sotto la congiuntiva bulbare, finisce per confondersi con la tonaca propria di questa, e termina sul contorno della cornea.

La capsula sta a contatto, esternamente e posteriormente, col corpo adiposo dell'orbita, fra i cui lobuli manda tenue propaggini; anteriormente, si pone prima sotto il fornice congiuntivale, poi sotto la congiuntiva. Con la sua superficie interna prende rapporto con la sclerotica e, per la maggior parte della sua estensione, non vi aderisce che lassamente, rimanendo fra le due membrane una fessura attraversata da trabecole connettivali, lo spazio intrafasciale, considerato come una fessura linfatica. Nella zona anteriore, sottocongiuntivale, invece, la capsula si applica direttamente alla sclera e vi aderisce, tanto che qui lo spazio intrafasciale non è più presente. Una forte aderenza fra capsula e sclerotica si osserva anche sul contorno del nervo ottico.

### RAPPORTI CON I MUSCOLI OCULARI

I muscoli oculari (muscoli estrinseci dell'occhio) decorrono per la maggior parte della loro lunghezza nella loggia posta posteriormente alla porzione capsulare della fascia del bulbo, immersi nel corpo adiposo ed attraversano la capsula con i loro tendini, circa a livello dell'equatore dell'occhio, per raggiungere la sclerotica, sulla quale si inseriscono.

A livello della fessura dove i muscoli attraversano la capsula, questa si prolunga sui muscoli stessi in direzione prossimale; essa forma una guaina muscolare completa, più sviluppata in avanti, più sottile e trasparente in dietro. Le guaine dei diversi muscoli sono collegate da una lamella connettivale sottilissima. La capsula forma una guaina simile anche per il muscolo elevatore della palpebra superiore, che pure la attraversa per portarsi verso la sua terminazione.

La capsula del bulbo manda una sua estensione, a forma di imbuto, che raggiunge il contorno dell'orbita, passando dietro le palpebre, e si fissa al periostio. Questo imbuto connettivale ha una grossezza non uniforme, essendo a punti molto sottile ed a punti grosso e resistente. Gli ingrossamenti sono dovuti a fasci di rinforzo per mezzo dei quali i muscoli oculari acquistano una inserzione secondaria sul contorno dell'orbita, noti come tendini orbitari o di arresto.

Il muscolo retto superiore, in particolare, possiede due tendini orbitari che nascono dai margini mediale e laterale della sua guaina e vanno ad inserirsi agli angoli superiori, mediale e laterale, dell'orbita. Essi inviano numerose fibre al tarso (setto fibroso delle palpebre) ed al fornice congiuntivale, e si confondono in parte con le espansioni collaterali che il tendine del muscolo elevatore della palpebra superiore manda agli angoli dell'orbita.

Questi rapporti fanno comprendere come esista una certa solidarietà funzionale fra il muscolo retto superiore e l'elevatore della palpebra alla quale contribuisce, appunto, l'unione fra le guaine dei due muscoli. Infatti, quando il muscolo retto superiore si contrae, facendo ruotare il bulbo verso l'alto, la palpebra superiore viene sollevata. Il tendine orbitario del muscolo retto inferiore, portandosi in avanti e superato il muscolo obliquo inferiore, si inserisce un po' al di sotto del margine orbitario; esso invia numerose fibre al fornice congiuntivale ed al tarso inferiore e ciò spiega come questo muscolo, oltre a far ruotare in basso il bulbo, abbassi anche la palpebra inferiore.

Grande è l'importanza funzionale delle connessioni che esistono tra le guaine muscolari ed i muscoli oculari prima del passaggio dei loro tendini attraverso la capsula, e quella dei tendini orbitari, che dalle fasce muscolari vanno al margine orbitario. La contrazione di un muscolo, infatti, non esercita effetti spiegabili solo in base alla sue inserzioni sull'orbita e sul globo oculare, in quanto essi dipendono anche dalla tensione del suo tendine orbitario che, se reciso, consente all'occhio una mobilità molto superiore di quella normalmente possibile (da qui il nome di tendine di arresto). La tensione dei tendini orbitari impedisce che la forza esercitata da un muscolo contratto si applichi con troppa energia all'equatore dell'occhio, deformandolo, ed impedisce l'eccessivo accorciamento del muscolo stesso, mantenendolo obbligato verso il margine orbitario.

## CONGIUNTIVA

La congiuntiva è una membrana mucosa, di derivazione ed in continuazione con la cute, che riveste la faccia posteriore delle palpebre e la parte anteriore dell'occhio. Forma nel suo insieme una specie di sacco, il sacco congiuntivale, chiuso quando le palpebre si toccano con i loro margini liberi, comunicante con l'esterno attraverso la rima palpebrale, quando le palpebre sono aperte. Le pareti anteriore e posteriore del sacco sono addossate l'una all'altra, tanto che la cavità che delimitano è in realtà una fessura. Le lacrime, che di continuo si versano nel sacco congiuntivale, mantengono la congiuntiva umida e splendente. Viene suddivisa in tonaca congiuntivale delle palpebre, del bulbo, fornice congiuntivale superiore ed inferiore.

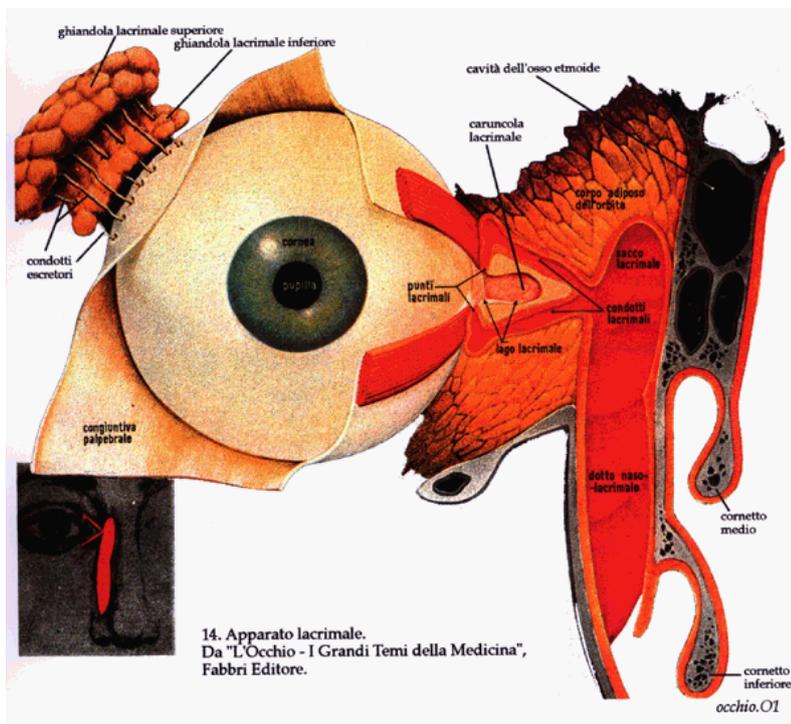


Figura 14

Le lacrime, che di continuo si versano nel sacco congiuntivale, mantengono la congiuntiva umida e splendente. Viene suddivisa in tonaca congiuntivale delle palpebre, del bulbo, fornice congiuntivale superiore ed inferiore.

La tonaca congiuntivale delle palpebre, o congiuntiva palpebrale, è la parte di congiuntiva che tappezza la faccia posteriore delle palpebre. Facendo seguito alla pelle, inizia in corrispondenza del margine libero delle palpebre; si distende prima sulla faccia posteriore dei tarsi, ai quali aderisce intimamente, poi si applica, con l'interposizione di tessuto connettivo lasso, sulla faccia posteriore dei muscoli tarsali, e infine trapassa nel fornice. E' una membrana sottile, trasparente, rossa o rosea.

La tonaca congiuntivale del bulbo, o congiuntiva bulbare, è la parte di congiuntiva che si applica sul bulbo oculare, coprendone la maggior parte del segmento anteriore; comincia a non molta distanza davanti all'equatore ed arriva al margine della cornea. E' liscia, molto sottile e trasparente, così che lascia vedere il colore bianco della sclerotica (bianco dell'occhio) ed i vasi congiuntivali e ciliari anteriori. E' unita alla

sclerotica da tessuto connettivo molto lasso, che si confonde insensibilmente con il segmento anteriore della capsula del bulbo. Presso l'orlo corneale, la congiuntiva aderisce intimamente alla tonaca fibrosa dell'occhio, formando una stretta zona circolare, spesso alquanto sporgente, detta anello della congiuntiva; dopo di che cessa come membrana distinta, ed il suo epitelio si continua nell'epitelio corneale. All'angolo interno dell'occhio, nel lago lacrimale, la congiuntiva bulbare si continua in due particolari formazioni, che sono la caruncola lacrimale e la piega semilunare della congiuntiva (fig. 14). La caruncola lacrimale è una piccola sporgenza mammellonata, situata nel fondo del lago lacrimale fra le porzioni lacrimali dei margini delle palpebre. E' rivestita superficialmente dalla mucosa e contiene uno stroma connettivale denso, traversato da alcuni fascetti di cellule muscolari lisce e striate, appartenenti, queste ultime, al muscolo orbicolare. Riposa sopra un cuscinetto adiposo, che concorre a determinarne il rilievo e la forma. Vi si trovano una dozzina di follicoli piliferi con peli rudimentali ed annesse ghiandole sebacee; altre ghiandole sebacee sono indipendenti e più voluminose, ricordando quelle tarsali. La piega semilunare della congiuntiva è situata lateralmente alla caruncola e, essendo in gran parte nascosta dalle palpebre, è visibile solo nella sua porzione media. E' una piega falciforme, verticale, che si estende dal fornice superiore a quello inferiore della congiuntiva ed il cui margine libero, concavo, è diretto in fuori ed applicato al bulbo oculare. E' il vestigio della "terza palpebra", ben sviluppata in altri vertebrati (uccelli).

Il fornice congiuntivale è il cul di sacco che si costituisce, in alto ed in basso, per la riflessione della congiuntiva palpebrale nella bulbare. La circonferenza del fornice è un po' spostata rispetto a quella del bulbo, particolarmente sul lato nasale cosicché, in corrispondenza dell'angolo mediale dell'occhio, si forma il lago lacrimale, interamente contenuto nel sacco congiuntivale.

Struttura della congiuntiva. istologicamente, la congiuntiva offre a considerare: l'epitelio di rivestimento, la tonaca propria, il tessuto sottocongiuntivale e le ghiandole.

L'epitelio di rivestimento della congiuntiva è in continuazione con la epidermide del margine palpebrale e comincia al di là del lembo posteriore del margine. Nella congiuntiva palpebrale è cilindrico e prevalentemente bistratificato. Nella regione del fornice e nella limitrofa congiuntiva bulbare, l'epitelio presenta, fra i due strati ora detti, un'interposizione di vari strati di cellule poliedriche. Verso l'orlo corneale, l'epitelio va acquistando gradatamente i caratteri di un epitelio pavimentoso a più strati, diventando sempre più simile a quello della cornea col quale, all'orlo corneale, si continua. Specialmente abbondanti nella congiuntiva bulbare ed in quella del fornice, si trovano cellule mucipare che, formatesi negli strati profondi, migrano poi in superficie dove svuotano il loro prodotto di secrezione.

La tonaca propria della congiuntiva risulta costituita prevalentemente da tessuto connettivo reticolato, infiltrato di cellule linfoidi, maggiormente rappresentate nella congiuntiva palpebrale. Vi si possono trovare anche follicoli linfatici ben individualizzati, che sono spesso ritenuti, però, di natura patologica. Il tessuto sottocongiuntivale, che fa direttamente seguito alla tonaca propria, è un connettivo lasso, con grossi fasci di fibrille, fibre elastiche e lobuletti di cellule adipose, questi ultimi specialmente abbondanti nella regione del fornice e nella congiuntiva bulbare, lungo il meridiano orizzontale.

Le ghiandole lacrimali accessorie, di struttura analoga a quella della ghiandola lacrimale principale, sono disseminate nel fornice congiuntivale e nella congiuntiva palpebrale del margine concavo del tarso. Quelle del fornice (ghiandole di Krause) sono circa 20 e sono particolarmente numerose e sviluppate nella palpebra superiore, in prossimità della commessura laterale. Hanno in genere un volume di 0,5-1,5 mm, ma se ne trovano anche di più piccole. Sono contenute nello strato profondo della tonaca propria. Le ghiandole della congiuntiva palpebrale (ghiandole di Ciaccio) sono meno numerose ed assai più voluminose delle precedenti; il loro corpo è contenuto nello spessore del tarso.

Le ghiandole tubulose (di Henle) si trovano nella congiuntiva che tappezza la parte posteriore delle palpebre, in vicinanza del margine convesso del tarso. Hanno la forma di invaginazioni tubulari, spesso bifide ed un po' rigonfiate alle estremità. Sono da considerare come ghiandole mucose.

### **CORPO ADIPOSO DELL'ORBITA**

Si dà il nome di corpo adiposo dell'orbita alla massa lobulare di tessuto adiposo che riempie la cosiddetta loggia retrofasciale della cavità orbitaria, cioè quella parte della cavità orbitaria che rimane al di dietro della fascia del bulbo. Esso è compreso fra la periorbita ed il nervo ottico, avvolto nelle sue guaine, arrivando, in avanti, a contatto con la fascia del bulbo. E' attraversato dai muscoli oculari, avvolti dalle guaine fornite loro dalla fascia del bulbo, dai vasi e dai nervi dell'orbita e prende rapporto con la capsula che racchiude la

ghiandola lacrimale. La massa principale del corpo adiposo è quella compresa nello spazio piramidale limitato dai muscoli oculari, mentre è sottile, specialmente in dietro, lo strato che rimane più superficialmente, fra i muscoli e la periorbita.

Il corpo adiposo persiste, pur diminuendo di volume, anche negli individui molto emaciati; per questa caratteristica, viene considerato "grasso permanente". La riduzione è prevalentemente dovuta a perdita di acqua da parte delle cellule adipose. L'infossamento dell'occhio non può andare, comunque, oltre un certo limite, per la resistenza opposta dalla fascia del bulbo.

## MUSCOLI ESTRINSECI DELL'OCCHIO

I muscoli striati che presiedono ai movimenti oculari sono tutti contenuti nella cavità

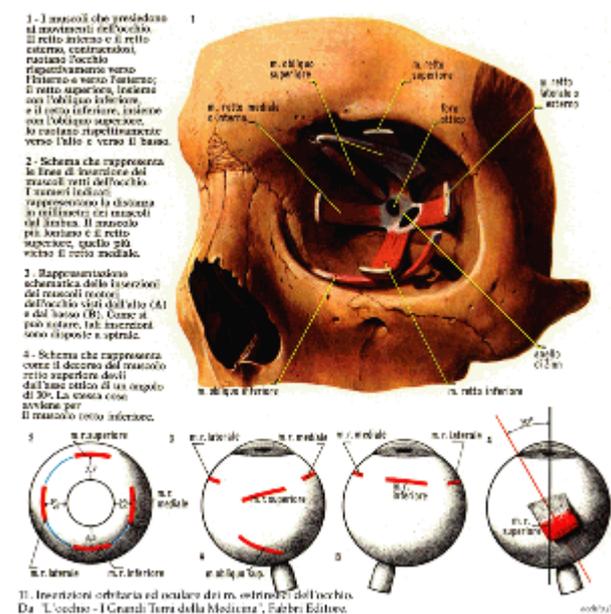


Fig. 11. Inserzione dei muscoli estrinseci dell'occhio

orbitaria (Fig. 11) e vengono classificati in due gruppi: muscoli retti (superiore, inferiore, laterale e mediale) ed obliqui (superiore ed inferiore). Alcuni Autori annoverano fra questi muscoli anche l'elevatore della palpebra superiore, essendo anch'esso contenuto nella cavità orbitaria. Data la sua diversa funzione, però, questo muscolo verrà trattato insieme alle palpebre. I muscoli della cavità orbitaria contraggono particolari rapporti con la fascia del bulbo che forma, per ciascuno di loro, una guaina completa (cfr. Fig. 10).

Tutti i muscoli retti traggono origine da un'unica formazione tendinea posta sul fondo dell'orbita: l'anello tendineo comune di Zinn. Si tratta di un anello imbutiforme che contorna il tratto mediale e superiore del margine del forame ottico e lateralmente si attacca ad una sporgenza della faccia orbitaria della grande ala dello sfenoide. E' intimamente unito alla guaina durale del nervo ottico ed alla membrana resistente, formata dall'unione della dura madre con la periorbita (periostio della cavità orbitaria). Il margine anteriore dell'anello, svasato, si prolunga nei tendini di origine dei muscoli retti.

I muscoli retti hanno anche altri caratteri in comune. Sono allungati, nastriformi, più stretti in dietro e più larghi in avanti. Scorrendo in prossimità delle pareti dell'orbita, si portano in avanti divergendo fino all'equatore dell'occhio; poi si incurvano sul segmento anteriore di questo e, per mezzo di un tendine lungo, appiattito, sottile, più largo del corpo muscolare, si attaccano alla sclera, a breve distanza dalla cornea. Nell'insieme, descrivono un cono con l'apice posteriore e la base aperta in avanti, che abbraccia il globo oculare ed è attraversato dal nervo ottico. Inizialmente decorrono sulla superficie del corpo adiposo dell'orbita, per poi immergersi quando si accostano al bulbo oculare. Considerati insieme, il corpo ed il tendine hanno mediamente la stessa lunghezza, che è circa di 40 mm, ma la lunghezza del tendine varia per ciascun muscolo, essendo massima nel retto mediale (8,8 mm), minima nel retto laterale (3,7 mm) ed intermedia negli altri due (5,5-5,8 mm). Il più grosso e robusto è il retto mediale.

Muscolo retto superiore. Nasce dalla parte superiore dell'anello tendineo (Fig. 11,1). E' posto immediatamente al di sotto ed accollato al muscolo elevatore della palpebra superiore (Fig. 10).

Anteriormente è incrociato, obliquamente e dal di sotto, dalla porzione riflessa del tendine del muscolo obliquo superiore. La linea di inserzione sull'occhio è lunga mediamente 10,6 mm, leggermente convessa in avanti ed obliqua (Fig. 11, 2-3); rispetto al meridiano verticale, è più estesa lateralmente. E' innervato dal nervo oculomotore.

Contraendosi, determina un movimento di sola elevazione soltanto quando l'occhio è abdotto di 23°; ha pura funzione di rotatore interno quando l'occhio è abdotto; in tutte le posizioni intermedie ha una funzione mista di rotatore ed elevatore.

**Muscolo retto mediale.** Nasce dalla parte mediale dell'anello tendineo e termina inserendosi sulla sclera con una linea di inserzione mediamente lunga 10,3 mm, leggermente convessa in avanti, parallela all'equatore e per lo più simmetrica rispetto al meridiano orizzontale (Fig. 11, 1-2). Decorre fra il muscolo obliquo superiore, in alto, ed il retto inferiore, in basso. E' innervato dal nervo oculomotore. Contraendosi, fa ruotare il globo all'interno, portando la cornea medialmente, nel piano orizzontale (adduzione).

**Muscolo retto inferiore.** Nasce dalla parte inferiore dell'anello tendineo e termina sulla sclera con una linea di inserzione lunga 9,8 mm, per lo più molto convessa in avanti, leggermente obliqua e simmetrica rispetto al meridiano verticale (Fig. 11,1-2-3). Anteriormente è separato dalla parete inferiore dell'orbita dal muscolo obliquo inferiore, che lo accoglie nella sua concavità (Fig. 11, 1). E' innervato dal nervo oculomotore.

Contraendosi, fa ruotare l'occhio in basso quando è addotto; è un puro ruotatore esterno quando l'occhio è addotto ed ha una funzione mista nelle posizioni intermedie.

**Muscolo retto laterale.** Ha due capi di origine: uno, che è il principale, nasce dalla parte laterale dell'anello tendineo (Fig. 11,1); l'altro, lacerto del muscolo retto laterale, è un capo accessorio che si stacca da una spina della faccia orbitale della grande ala dello sfenoide, presso la fessura orbitale superiore (non mostrato nella Figura 11). Termina inserendosi mediamente a 6,9 mm dal tratto laterale del margine corneale; la linea di inserzione è lunga 9,2 mm, leggermente convessa in avanti, leggermente obliqua e per lo più simmetrica rispetto al meridiano orizzontale. E' innervato dal nervo abducente. Contraendosi, fa ruotare soprattutto il globo all'esterno, portando la cornea lateralmente, sul piano orizzontale (abduzione).

**Muscolo obliquo superiore.** E' il più lungo e sottile dei muscoli oculari. Nasce, per mezzo di un breve tendine, sul contorno mediale del forame ottico, dalla guaina del nervo ottico (Fig. 11,1), in immediato rapporto in alto con la inserzione del m. elevatore della palpebra superiore. Si porta col suo ventre, leggermente appiattito, in avanti, occupando l'angolo supero-mediale dell'orbita. In prossimità della base dell'orbita, si trasforma in un tendine cilindrico che si immette subito in un occhiello fibro-cartilagineo, la troclea, fissato alla fossetta o alla spina trocleare dell'osso frontale, dove è contornato da una piccola borsa mucosa, la borsa trocleare. Il tendine attraversa la troclea, si riflette su di essa e si dirige lateralmente ed in dietro verso il bulbo oculare, slargandosi a ventaglio man mano che vi si accosta. Termina inserendosi sulla sclera, nella parte supero-laterale dell'emisfero posteriore dell'occhio. La linea di inserzione, larga circa 11 mm, è convessa in dietro e lateralmente, obliqua e rimane più di mezzo centimetro dietro l'inserzione del muscolo retto superiore. E' innervato dal nervo trocleare.

Contraendosi, è un abbassatore quando l'occhio è addotto di 50°; in abduzione è un ruotatore esterno in modo che l'estremità superiore del meridiano verticale si inclina in dentro. Inoltre solleva la metà posteriore del bulbo e quindi la cornea ruota all'esterno. Complessivamente ruota, abbassa ed abduce il bulbo.

**Muscolo obliquo inferiore.** E' il più corto fra i muscoli dell'occhio. Nasce dalla parte antero-mediale della parete inferiore dell'orbita, sull'osso mascellare, subito sotto la fossa del sacco lacrimale. Si dirige lateralmente e nello stesso tempo in dietro ed in alto, descrivendo un'ansa intorno al globo oculare ( Fig. 11,1) e raggiungendo la sclera circa all'altezza del meridiano orizzontale, con una linea di inserzione larga circa 10 mm, leggermente convessa in alto ed obliqua, a 16 mm dall'orlo della cornea. A livello della sua inserzione, è coperto dal muscolo retto laterale, mentre, nel descrivere la sua curva sotto al globo oculare, incrocia obliquamente e dal di sotto il muscolo retto inferiore, tanto che le due guaine aderiscono intimamente (cfr. Fig. 10). E' innervato dal nervo oculomotore. Contraendosi, è un puro elevatore in adduzione; in abduzione è un ruotatore esterno in modo che l'estremità superiore del meridiano verticale si inclina in fuori; inoltre esso attira in basso la metà posteriore del bulbo e quindi la cornea si innalza; infine attira in dentro la metà posteriore del bulbo e quindi lo abduce.



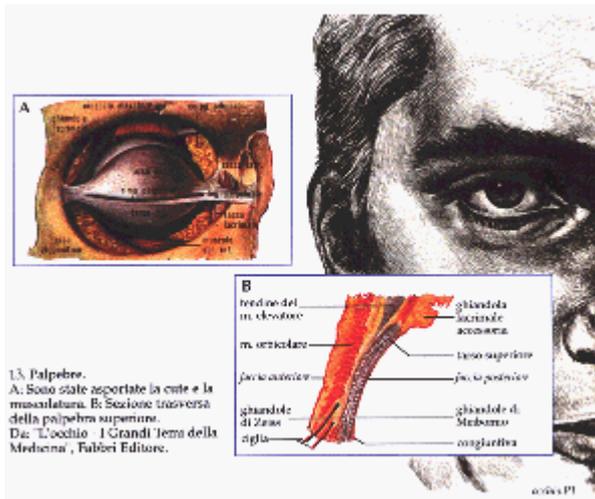


Fig. 13. Palpebre

ed allineate in serie. E' separata dal globo oculare mediante il sacco congiuntivale, in forma di sottile fessura. La commessura laterale è segnata sulla superficie cutanea da una leggera depressione lineare, diretta obliquamente in basso ed in fuori. Vi convergono pieghe cutanee, specialmente sviluppate nel vecchio, che costituiscono la cosiddetta zampa d'oca. Nella commessura mediale, la pelle è sollevata in un piccolo rilievo trasversale, determinato dal ligamento palpebrale mediale, che si mette in evidenza e può essere ben apprezzato col tatto, quando si stirino le palpebre verso l'esterno. I margini liberi delle due palpebre, opposti l'uno all'altro e che intercettano la rima palpebrale, sono ricoperti dalla pelle della faccia anteriore delle palpebre. Vi si distinguono due porzioni: una principale, laterale, la parte ciliare o bulbare ed un'altra molto breve, mediale, la parte lacrimale. Il limite fra le due parti è segnato da una piccola sporgenza, la papilla lacrimale, sul cui apice si trova l'orifizio puntiforme del condotto lacrimale.

La parte ciliare o bulbare dei margini palpebrali dà impianto alle ciglia e sta in diretto rapporto col bulbo oculare. Rappresenta i sette ottavi di tutta la lunghezza del margine. Le ciglia sono peli lunghi e rigidi, più numerosi, grossi e fitti nella palpebra superiore, dove hanno una lunghezza di 8-12 mm, contro i 6-8 mm di quelli della palpebra inferiore. Ai follicoli delle ciglia sono annesse ghiandole sebacee, e talvolta vi sboccano anche ghiandole ciliari (di Moll). Le ciglia concorrono, con le palpebre, alla protezione degli occhi.

La parte lacrimale dei margini palpebrali contiene il corrispondente condotto lacrimale. Manca di ciglia ed è coperta da una lanugine appena visibile.

L'angolo mediale è costituito dall'incontro dei margini lacrimali delle due palpebre. Lo spazio semiellittico che vi corrisponde prende il nome di lago lacrimale, nel fondo del quale compaiono la caruncola lacrimale e la piega lacrimale della congiuntiva.

Struttura delle palpebre. Le palpebre risultano di diversi strati sovrapposti, che dalla faccia anteriore alla posteriore sono: la pelle, il connettivo sottocutaneo col muscolo orbicolare dell'occhio, lo strato fibroso, uno strato muscolare a cellule lisce rappresentato dai muscoli tarsali superiore ed inferiore e la congiuntiva.

Il connettivo sottocutaneo delle palpebre è molto lasso e si lascia facilmente infiltrare e distendere dai liquidi e dall'aria in vari stati patologici. Comprende in sé la parte palpebrale del muscolo orbicolare dell'occhio, separandolo dallo strato fibroso. La parte palpebrale del muscolo orbicolare dell'occhio è separata dalla parte ciliare, muscolo ciliare, dai follicoli delle ciglia e dalle ghiandole ciliari di Moll. Il muscolo ciliare aderisce ai tarsi e per la maggior parte si dispone anteriormente alla parte corrispondente delle ghiandole tarsali di Meibomio. Contraendosi, serve specialmente ad applicare sul bulbo oculare il lembo posteriore del margine libero delle palpebre e a comprimere la parte corrispondente dei dotti escretori delle ghiandole tarsali, favorendo l'uscita del secreto. Lo strato fibroso, che forma lo scheletro delle palpebre, comprende una parte periferica, il setto orbitale, ed una parte centrale, rappresentata dai tarsi, che fa seguito alla precedente e raggiunge il margine libero delle palpebre. Il setto orbitale è una membrana fibrosa che si stacca dal contorno osseo dell'orbita, confondendosi con il periostio, e raggiunge il margine orbitario del corrispondente tarso, fondendosi intimamente con la sua faccia anteriore. Forma, nel suo insieme, come un diaframma interposto fra il contenuto dell'orbita e gli strati superficiali delle palpebre. Medialmente prende inserzione

i margini palpebrali si pongono a contatto (Fig. 13). Attraverso questa fenditura si affaccia una parte più o meno estesa del segmento anteriore dell'occhio, per il quale rappresentano un apparato di protezione. Si distinguono, per posizione, in superiore ed inferiore.

La palpebra superiore è molto più estesa e mobile di quella inferiore; la grossezza è di circa 3 mm al margine libero ed aumenta gradatamente, fino a raddoppiare o più, al margine orbitario.

La faccia anteriore delle palpebre, formata dalla pelle, presenta, dopo l'età giovanile, sottili rughe trasversali che si moltiplicano e si fanno più distinte con gli anni. La faccia posteriore delle palpebre è tappezzata dalla tonaca congiuntivale, sottile, trasparente e rosea. Attraverso di questa si vedono le ghiandole tarsali (di Meibomio), di colorito gialliccio, disposte verticalmente

sulla cresta lacrimale posteriore, dietro al sacco lacrimale ed alla parte lacrimale del muscolo orbicolare dell'occhio, che quindi rimangono al di fuori dell'orbita. Prima di unirsi ai tarsi, si unisce intimamente alle espansioni tendinee del muscolo elevatore della palpebra, ai tendini orbitari del muscolo retto superiore ed al setto dei tendini orbitari dei muscoli retto e obliquo inferiore. I tarsi sono due lamine fibro-elastiche, grosse, dense e resistenti, che fanno seguito al setto orbitale. Occupano quella parte delle palpebre che si modella sul globo oculare e che da essi prende il nome di parte tarsale e raggiungono il margine libero delle palpebre. Le estremità laterali dei tarsi, piuttosto acute, si uniscono per formare un nastrino fibroso sottile e resistente, il rafe palpebrale laterale, che si inserisce sul contorno laterale dell'orbita. Le estremità mediali dei tarsi, più ottuse, si continuano ciascuna in un cordoncino fibroso e, convergendo, danno origine al ligamento palpebrale mediale, piatto e largo, che si attacca alla cresta lacrimale anteriore e fa da tendine al muscolo orbicolare dell'occhio.

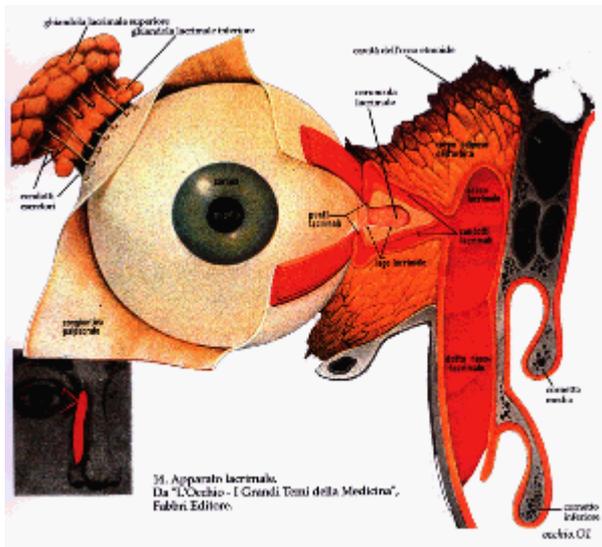
Lo strato muscolare a cellule lisce si trova sulla faccia profonda del setto orbitale, applicato sulla congiuntiva, ed è rappresentato da due lamine, i cosiddetti muscoli tarsali superiore ed inferiore, di Muller. Con il loro grado di contrazione tonica viene regolata l'ampiezza della rima palpebrale. Come il muscolo dilatatore della pupilla, i muscoli tarsali sono innervati da fibre simpatiche provenienti dal ganglio cervicale superiore.

Tra la pelle e la congiuntiva, la regione del margine libero delle palpebre è formata da tessuto connettivo denso, ricco di fibre elastiche, ed è caratterizzata dai follicoli delle ciglia (che si approfondano molto, potendo raggiungere i tarsi), con le annesse ghiandole sebacee e dalle ghiandole ciliari di Moll (ghiandole sudoripare arrestate durante lo sviluppo); vi penetrano con la parte prossima al loro orifizio le ghiandole tarsali di Meibomio, che per la maggior parte della loro lunghezza sono contenute nei tarsi; vi decorre, infine, il muscolo ciliare (di Riolano). Le ghiandole tarsali di Meibomio hanno forma allungata e sono poste parallelamente le une alle altre, per lo più in una fila semplice, perpendicolarmente al margine libero delle palpebre; nella parte media dei tarsi sono decisamente verticali. Si scorgono per trasparenza, attraverso la congiuntiva, nelle palpebre rovesciate ed appaiono di colorito giallastro per il loro contenuto in sostanze grasse. Il loro secreto, sebo palpebrale, è una poltiglia con goccioline di grasso, alla formazione del quale concorrono in piccola parte anche le ghiandole sebacee annesse ai follicoli delle ciglia.

**Muscolo elevatore della palpebra superiore.** Ha forma di triangolo molto allungato, con l'apice nel fondo dell'orbita e la base nella palpebra superiore (cfr. [Fig. 10](#)). Nasce con un corto tendine dal contorno superiore del forame ottico e dalla guaina durale del nervo ottico, immediatamente al di sopra dell'anello tendineo comune, al quale è unito. Decorre, per la maggior parte della sua lunghezza, nell'orbita, immediatamente al di sotto della volta orbitaria, sovrapposto al muscolo retto superiore, che sporge al di fuori di esso col suo margine laterale. Arrivato all'altezza dell'equatore del bulbo, scende ad arco in avanti verso la palpebra, dove cessa il corpo muscolare, seguito da una larga membrana, che rappresenta il tendine terminale del muscolo. Si unisce intimamente col setto orbitale, dove si risolve in due lamine secondarie, posteriore ed anteriore. La lamina posteriore è più robusta e contiene cellule muscolari lisce che formano il muscolo tarsale superiore; scorre davanti alla congiuntiva palpebrale e, espandendosi a ventaglio, si fissa su tutto il margine superiore del tarso superiore. La lamina anteriore, attraversando il setto orbitale, passa davanti al tarso sulla faccia posteriore del muscolo orbicolare e si risolve in fascetti divergenti, isolati, che attraversano l'orbicolo per perdersi nella faccia profonda della cute. E' innervato dal nervo oculomotore. Contraendosi, tira in alto ed in dietro la palpebra superiore.

## APPARATO LACRIMALE

L'apparato lacrimale (Fig. 14) fa parte, insieme con le palpebre e la congiuntiva, dell'apparato di protezione dell'occhio. Risulta costituito dalla ghiandola lacrimale e dalle vie lacrimali, comprendenti i condotti



lacrimali, il sacco lacrimale ed il condotto naso-lacrimale.

### Ghiandola lacrimale.

E' una ghiandola tubulare composta situata nella parte supero-laterale della regione orbito-palpebrale che si apre, mediante un certo numero di canali escretori, nella parte supero-laterale del fornice congiuntivale. La sua funzione è quella di secernere le lacrime. Al suo prodotto di secrezione si aggiunge quello delle piccole ghiandole, di diversa natura, che si trovano nella congiuntiva. Le lacrime, che vengono prodotte continuamente, facilitano lo scorrimento delle palpebre sul globo oculare, rimuovono le particelle solide che si depositano dall'aria atmosferica ed impediscono i dannosi effetti che l'evaporazione degli umori avrebbe sull'epitelio della cornea e della congiuntiva.

Fig. 14. Apparato lacrimale

La ghiandola ha aspetto lobulato e colore rosso-grigio; esteriormente, assomiglia alle ghiandole salivari. Il tendine del muscolo elevatore della palpebra superiore e la sua espansione laterale, insieme al margine laterale del muscolo retto superiore, dividono la ghiandola in due porzioni: una principale e più compatta, la ghiandola lacrimale superiore, ed una più piccola, la ghiandola lacrimale inferiore, situata al di sotto della precedente, che prende rapporto col fornice congiuntivale.

La ghiandola lacrimale superiore occupa la fossa lacrimale dell'osso frontale, nella volta dell'orbita (cfr. Fig. 15). E' un organo a contorno ovalare, appiattito dall'alto in basso. Le sue dimensioni sono variabili: misura, in media, 20 mm nel diametro trasversale, 12 mm in quello sagittale e 5 mm in quello verticale. E' avvolta da una capsula, alla quale la ghiandola aderisce tenuemente, tanto che può essere facilmente enucleata.

La ghiandola lacrimale inferiore è costituita da un cumulo di piccoli lobuli, lassamente uniti ed in parte isolati. Nell'insieme è appiattita dall'alto in basso, a contorno poco netto, irregolarmente quadrilatera. Raggiunge un volume che è appena la metà di quello dell'altra ghiandola e può anche essere molto più piccola o addirittura mancare. E' avvolta in tessuto connettivo denso, dal quale non si può facilmente enucleare.

I condotti escretori delle ghiandole lacrimali (3-5 per la superiore e 6-8 per la inferiore) hanno un calibro di 0,3-0,4 mm, sono paralleli fra loro e si aprono nella parte laterale del fornice congiuntivale, formando una serie regolare di orifizi. Alcuni condotti della ghiandola superiore attraversano quella inferiore, ricevendone la maggior parte dei condotti, ma su questo vi è una grande variabilità.

### Vie lacrimali.

Le lacrime, che si versano continuamente nel sacco congiuntivale, si raccolgono all'angolo mediale dell'occhio, nella regione del lago lacrimale, dove trova inizio la loro via di escrezione, rappresentata: dai sottili condotti lacrimali, che si aprono nel sacco della congiuntiva per mezzo dei punti lacrimali e che sboccano nel sacco lacrimale; dal sacco lacrimale, specie di serbatoio accolto nell'omonima fossa ossea; dal condotto naso-lacrimale che, drenando il serbatoio, decorre nella parete laterale delle fosse nasali e sbocca nel meato inferiore.

I condotti lacrimali, superiore ed inferiore, originano da orifizi noti come punti lacrimali, circolari od ovali, crateriformi, aperti sul sacco congiuntivale e situati all'apice delle papille lacrimali. Queste ultime sono piccoli rilievi che sporgono sul margine libero delle palpebre, al confine fra la parte ciliare e quella lacrimale. Il punto lacrimale superiore è più stretto di quello inferiore (0,20-0,25 mm contro 0,30 mm) e dista circa 6 mm dall'angolo mediale dell'occhio; l'inferiore è un po' più laterale, a 6,5 mm, tanto che, a palpebre chiuse, i due

punti non si sovrappongono, ma si collocano l'uno accanto all'altro. Scavati in un tessuto connettivo denso, dipendenza di quello del tarso, i due punti lacrimali rimangono costantemente beanti.

I condotti lacrimali, che fanno seguito ai punti lacrimali, decorrono nella parte ciliare del margine libero della rispettiva palpebra e sboccano nel sacco lacrimale. Ciascun condotto risulta di una prima porzione, più breve, diretta quasi verticalmente (parte verticale) e di una seconda porzione, più lunga (parte orizzontale) che fa angolo (gomito) con la precedente ed è diretta medialmente. I due condotti possono sboccare nel sacco lacrimale indipendentemente o, più frequentemente, mediante un tratto comune, più o meno sviluppato. La lunghezza dei condotti lacrimali varia fra 8 e 10 mm, ed il loro calibro non è uniforme, variando, nelle varie porzioni, fra 0,3 e 0,8 mm (cfr. Fig. 14). Per la sottilezza delle pareti e per quella degli strati che li separano dal tegumento, i condotti lacrimali sono visibili attraverso la pelle sottile del margine palpebrale, qualora si introduca nella loro cavità un liquido colorato. Le lacrime penetrano nei condotti lacrimali per capillarità e per l'azione dilatatrice che il muscolo orbicolare dell'occhio esercita sul sacco, con effetto di aspirazione.

Il sacco lacrimale è un serbatoio membranoso, di forma cilindrica, accolto nella fossa lacrimale, che in alto termina a fondo cieco, fornice, ed in basso si continua direttamente, senza limiti netti, nel condotto naso-lacrimale; riceve lateralmente lo sbocco dei condotti lacrimali, che vi portano le lacrime. Ha una lunghezza di 12-15 mm ed è appiattito lateralmente. Se vuoto o quasi vuoto, il suo lume prende la forma di fessura sagittale, che misura non più di 3 mm. Normalmente, la sua capacità è di 2 ml, ma, essendo estremamente distensibile, può raggiungere i 12 ml.

Il sacco è contenuto in una cavità chiusa, costituita dalla fossa lacrimale (formata dall'osso lacrimale e dal processo frontale della mascella) e da una membrana fibrosa in continuazione del periostio, tesa fra le creste lacrimali anteriore e posteriore. E' tappezzato internamente da mucosa, rivestita da epitelio molto sottile e la cui tonaca propria è infiltrata da numerose cellule linfoidi, che spesso si accumulano in veri e propri noduli linfatici.

Il condotto naso-lacrimale è un dotto membranoso che fa seguito al sacco lacrimale e decorre nella parete laterale delle fosse nasali, contenuto nel canale osseo naso-lacrimale, a formare il quale concorrono l'osso lacrimale, la mascella ed il processo lacrimale del cornetto inferiore. Sbocca nel meato inferiore delle fosse nasali. E' lungo, in media, 15 mm, ma può variare dai 10 ai 27 mm, poiché a volte termina alla sommità del meato, altre volte più in basso, sotto la mucosa della parete laterale del meato stesso. E' pressoché cilindrico, un po' appiattito in senso laterale, con un diametro di circa 2,5 mm.

Per la turgescenza del tessuto cavernoso, che lo circonda, la sua cavità può ridursi ad una semplice fessura. Il condotto, infatti, è solidamente unito al periostio del canale da uno strato di connettivo denso, ricco di fibre elastiche, nel quale si trova un plesso venoso, in continuazione con il tessuto erettile del cornetto inferiore. E' rivestito internamente da mucosa.

## ORBITA

Le orbite sono due cavità a forma di piramide quadrangolare, con l'asse leggermente inclinato in basso ed all'esterno; gli assi delle due orbite, prolungati posteriormente, si incontrerebbero in corrispondenza della



Fig. 15: cavità orbitaria

apofisi orbitarie, esterna ed interna; in basso ed all'interno dall'apofisi montante dell'osso mascellare superiore; all'esterno ed in basso dall'osso zigomatico; in basso dall'osso mascellare superiore. Fra il terzo medio ed il terzo interno del bordo orbitario superiore si trova l'incisura sopraorbitaria, spesso convertita in foro, attraverso la quale passano il nervo frontale esterno, o sopraorbitario, e l'arteria sopraorbitaria. Sotto il

sella turcica, formando un angolo di 40-45°. Contengono il bulbo oculare, che occupa la metà anteriore della cavità, separato dalle pareti orbitarie da una distanza variabile tra i 9 e gli 11 mm, ed è più vicino alla pareti esterna e superiore. La cavità orbitaria (Fig. 15) presenta 1 base, 4 pareti ed un apice.

La base dell'orbita, che corrisponde all'apertura anteriore, ha forma quadrangolare ed il suo bordo è costituito: in alto dall'osso frontale, con le sue due

bordo orbitario inferiore, alla metà circa, si trova il foro sottorbitario dal quale esce il nervo sottorbitario, o mascellare superiore, con i vasi che lo accompagnano.

La parete superiore, o volta dell'orbita, è formata, in avanti, dall'osso frontale ed indietro dalla piccola ala dello sfenoide; è in rapporto con la fossa cranica anteriore e coi i lobi frontali dell'encefalo, ivi contenuti. E' molto sottile, diretta obliquamente dall'avanti all'indietro e dall'alto al basso; è lunga, in media, 48 mm.

La parete inferiore, o pavimento dell'orbita, è formata, dall'avanti all'indietro: dall'osso zigomatico, dal mascellare superiore e dal processo orbitario dell'osso palatino. E' attraversata da un solco che si trasforma, in avanti, nel canale sottorbitario. E' diretta obliquamente dall'avanti all'indietro e dal basso verso l'alto ed è lunga, in media, 46 mm e spessa 2-3 mm.

La parete esterna dell'orbita è formata dalla grande ala dello sfenoide, dall'apofisi orbitaria dell'osso zigomatico e dall'osso frontale ed è in rapporto, anteriormente, con la fossa temporale. E' molto sottile, ed ha direzione obliqua dall'avanti all'indietro e dall'esterno all'interno.

La parete interna dell'orbita è costituita, dall'avanti all'indietro: dall'apofisi montante del mascellare superiore, dall'osso lacrimale, dalla lamina papiracea dell'etmoide e dalla faccia esterna del corpo dello sfenoide. E' separata dalla cavità nasale mediante le cellule etmoidali. Indietro è in rapporto col seno sfenoidale; in avanti, talvolta col seno mascellare e con le fosse nasali. Lungo l'angolo supero-interno si trovano i due fori etmoidali, anteriore e posteriore, nei quali passano le arterie ed i nervi etmoidali. Poco dietro il bordo orbitario, all'angolo infero-interno, si trova la doccia lacrimale, costituita dalla branca montante del mascellare superiore e dall'osso lacrimale e nella quale è situato il sacco lacrimale. Alla doccia lacrimale fa seguito un canale osseo che contiene il dotto lacrimale e sbocca nel meato inferiore delle fosse nasali. La parete ha direzione parallela al piano mediano ed è sottilissima. Verso il fondo dell'orbita esistono tre aperture: la fessura sfenosfenoidale, la fessura sfenomascellare ed il foro ottico.

La fessura sfenosfenoidale, o orbitaria superiore, corrisponde all'angolo supero-esterno del fondo dell'orbita ed all'apice dell'orbita, ed è situata fra la piccola e la grande ala dello sfenoide. Ha la forma di una virgola, con grossa estremità inferiore e mediale. Al suo margine interno presenta un piccolo tubercolo sul quale si inserisce l'anello tendineo di Zinn. Rappresenta la più ampia comunicazione fra l'orbita e la fossa cranica media. Dà passaggio ai nervi nasociliare, frontale e lacrimale (rami della prima branca del trigemino), al nervo oculomotore comune, al nervo trocleare, al nervo abducente, alle vene oftalmiche ed alla radice simpatica del ganglio ciliare.

La fessura sfenomascellare, o orbitaria inferiore, è situata all'angolo infero-esterno del fondo dell'orbita: inizia sotto e lateralmente al foro ottico e giunge fino a circa 2 cm dal margine orbitario inferiore. Comunica, anteriormente, con la fossa zigomatica, posteriormente con la fossa pterigopalatina e dà passaggio, nella sua parte esterna, al nervo zigomatico e, nella parte interna, ai rami orbitari del ganglio sfenopalatino, nonché a un'anastomosi fra la vena oftalmica inferiore ed il plesso pterigoideo.

Il foro ottico giace al disopra e all'interno della fessura sfenosfenoidale; ad esso fa seguito il canale ottico, che ha stretti rapporti di vicinanza col seno sfenoidale e, talora, anche con qualche cellula etmoidale posteriore. Vi passano il nervo ottico con le sue guaine e l'arteria oftalmica, che è situata sotto e lateralmente al nervo.

Col nome di periorbita si intende il periostio che tappezza la cavità orbitaria.

## **SOPRACCIGLIA**

Le sopracciglia sono due rilievi muscolo-cutanei provvisti di peli, che, a ciascun lato della linea mediana, descrivono un'arcata trasversale a concavità inferiore, all'altezza del margine sovraorbitale ed al di sopra della palpebra superiore, sporgendo più o meno rispetto a questa. Si considerano, di dentro in fuori, tre porzioni a limiti indistinti: una breve porzione slargata e provvista di peli, la testa; una seconda porzione allungata, il corpo; una porzione terminale, sottile, a peli via via più radi che si sparpagliano verso la tempia, la coda. Si dice spazio intersovraciliare l'intervallo fra i due sopraccigli, soprastante alla radice del naso e largo 1-2 cm, nel quale la pelle può essere glabra o quasi glabra. Le sopracciglia presentano una grande variazione individuale e di razza, e rappresentano un carattere fisionomico importante. A formare il sopracciglio concorrono: la pelle, il connettivo sottocutaneo, alcuni muscoli ed uno strato di connettivo

retrostante i muscoli. Questi piani sovrapposti appoggiano sullo scheletro, cioè sull'osso frontale, rivestito dal periostio. La pelle assomiglia nell'insieme a quella della fronte ed è molto aderente allo strato sottostante. Il connettivo sottocutaneo è piuttosto lasso. Il piano muscolare è rappresentato superficialmente dai fasci più eccentrici del muscolo orbicolare dell'occhio e da quelli del muscolo frontale, che rimangono al di dietro dei precedenti; più profondamente si trovano i fasci del muscolo corrugatore del sopracciglio. Lo strato connettivale sottomuscolare è rappresentato da connettivo lasso, contenente lobuli adiposi, che permette al sopracciglio di spostarsi rispetto allo scheletro. La porzione più mobile del sopracciglio è la coda, quella meno mobile è la testa.

## CENNI DI EMBRIOLOGIA

Lo sviluppo dell'occhio (Figg. 16-17) richiede l'intervento di due dei tre foglietti embrionali: l'ectoderma ed il mesoderma. Intorno al 18° giorno (Fig. 16C), sulla parete neuroectodermica del futuro proencefalo, prima

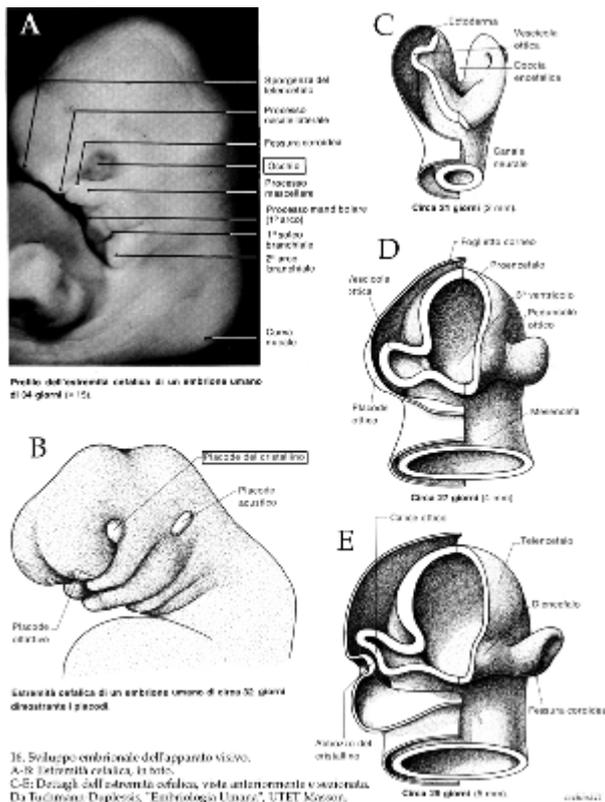


Fig 16

(Fig. 17B). Le fibre più centrali, le più precoci, formano il nucleo del cristallino e diventano molto presto trasparenti grazie alla comparsa di proteine particolari. La crescita del cristallino, per aggiunta di nuove fibre alla periferia del nucleo, continuerà fino all'età di 20 anni.

Nello stesso periodo in cui il cristallino comincia ad abbozzarsi, compaiono, a spese del materiale mesodermico che circondava la vescicola ottica secondaria, gli abbozzi di quelle che saranno le due tuniche esterne dell'occhio. Di queste, la coroide è analoga alla pia madre, mentre la sclera è analoga alla dura madre. Nello spazio interposto tra abbozzo vescicolare del cristallino e vescicola ottica secondaria, il suddetto materiale mesodermico partecipa attivamente alla formazione del corpo vitreo primario.

della chiusura completa della doccia encefalica, compare una evaginazione laterale: la vescicola ottica primaria, collegata col diencefalo tramite un peduncolo, il peduncolo ottico. La vescicola si accresce e si invagina, formando così il calice ottico, o vescicola ottica secondaria (Figg. 16E, 17C). Essendo costituito dalla invaginazione su sé stessa della parete neuroectodermica, il calice ottico è costituito da due foglietti: interno ed esterno. L'invaginazione interessa anche il peduncolo, determinandovi la fessura coroidea, attraverso la quale l'arteria ioloidea penetra nel peduncolo. A livello del calice ottico, fra i due foglietti resta uno spazio, detto spazio retinico, che comunica col 3° ventricolo tramite il peduncolo. Questo spazio, virtuale nell'adulto, spiega la possibilità del distacco della retina.

Nello stesso periodo in cui si forma la vescicola ottica primaria, si forma anche, davanti ad essa, un ispessimento del foglietto corneo (anch'esso di derivazione ectodermica e che darà origine al tegumento), il placode ottico (Figg. 16A, 16B, 16D). Rapidamente questa placca si deprime per originare una vescicola (Fig. 17A) che si isola dal foglietto corneo, distaccandosi e rimanendo costituita da un solo strato di cellule. Verso il 40° giorno, le cellule della parete posteriore della vescicola si moltiplicano ed emettono fibre verso le cellule della parete anteriore, colonizzando la cavità della vescicola stessa, dal dietro verso l'avanti

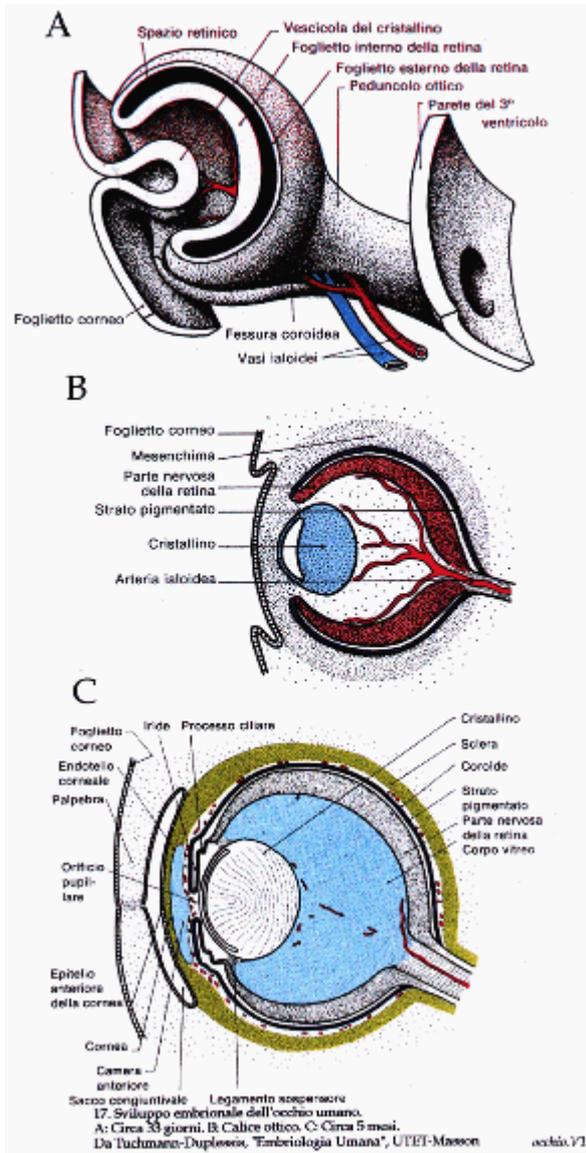


Fig. 17

esterna del tessuto mesodermico costituisce la sclerotica. Successivamente, tutto il bulbo oculare, infossandosi progressivamente nella cavità orbitaria, viene a formare un solco circolare che darà origine al fornice congiuntivale. Tale solco, approfondendosi sempre più, determina la formazione delle due pliche cutanee che formeranno le palpebre.

Nel frattempo, il foglietto esterno del calice resta semplice, ed origina lo strato pigmentato della retina, per la comparsa di granuli di pigmento in seno alle cellule epiteliali. Il foglietto interno, invece, dà origine allo strato nervoso della retina: si ispessisce e si differenzia in più strati cellulari, come le pareti delle vescicole cerebrali, che daranno origine al tessuto cerebrale. Questa differenziazione termina al 7° mese: da allora l'occhio è sensibile alla luce, anche se la fovea si differenzierà solo 4 mesi dopo la nascita.

Verso la 7a settimana, il peduncolo ottico si chiude, inglobando l'arteria ialoidea ed una parte di mesenchima, che verrà colonizzato dagli assoni delle cellule gangliari costituendo, così, il nervo ottico. Gli assoni procedono poi verso il diencefalo e, arrivati nel suo pavimento, subiscono una decussazione parziale che formerà il chiasma ottico, da dove le fibre raggiungeranno i loro bersagli sottocorticali. Nella sua evoluzione, intanto, il calice ottico tende a chiudersi anteriormente, al davanti del cristallino, delimitando un orifizio, che resterà come pupilla. A questo livello, i foglietti interno ed esterno della retina si riuniscono: il primo, che resta sottile e non subisce qui differenziazioni sensoriali, originerà lo strato interno dell'iride; il secondo darà origine all'epitelio pigmentato dell'iride. Dietro l'iride, i due foglietti retinici accollati presentano qualche plica sollevata dal mesenchima: i processi ciliari. Fra le pieghe ciliari ed il cristallino sono presenti alcune fibre lasse che si trasformeranno nel delicato legamento sospenditore del cristallino.

A spese del tessuto mesenchimale che avvolge il primitivo abbozzo dell'occhio vengono quindi a formarsi la coroide, l'iride ed il corpo ciliare. Questa tonaca vascolare, cui arriva sangue tramite l'arteria ialoidea, avvolge completamente il cristallino. In seguito, tale rivestimento scompare lentamente e, al posto dell'arteria ialoidea, permane il canale ialoideo. La porzione più

## **FISIOLOGIA**

### **TENSIONE ENDOCULARE**

Nell'interno del globo oculare esistono dei fluidi che si ricambiano completamente, ma il ricambio più cospicuo è quello dell'umor acqueo, le cui funzioni sono:

- a) ottica, costituendo una parte essenziale del sistema diottrico oculare;
- b) statica, consentendo, grazie alla propria pressione, il mantenimento della forma e del volume del globo oculare;
- c) trofica, intervenendo in modo determinante nel trofismo delle strutture avascolari dell'occhio (cornea, cristallino) e fornendo, fra l'altro, ossigeno e glucosio ed allontanando anidride carbonica ed acido lattico. Inoltre, fornisce aminoacidi e glucosio anche all'umor vitreo ed alla retina.

Formazione e circolazione dell'umor acqueo. La struttura oculare finalizzata alla produzione della maggior parte dell'umor acqueo (circa il 70%) è rappresentata dall'epitelio dei corpi ciliari. In condizioni normali, la quantità di umor acqueo prodotta è di circa 2,2 mm<sup>3</sup>/min, pari a circa 3 cm<sup>3</sup>/die. Si ritiene che l'umor acqueo contenuto nella camera anteriore si rinnovi completamente nel giro di 1-3 ore. La composizione dell'umor acqueo è simile a quella plasmatica, differendone però per la diversa concentrazione dei vari costituenti. La sua formazione è in gran parte dovuta all'attività filtrante e secernevole dell'epitelio ciliare. La filtrazione è regolata dal gradiente pressorio idrostatico ed osmotico che viene a crearsi a livello della parete capillare (ciliare), mentre la secrezione, attiva, è il frutto di processi che si attuano mediante lo scambio di ioni attraverso gli elementi cellulari dell'epitelio ciliare. Fra i due processi esiste un certo grado di interdipendenza. Il meccanismo passivo si attua prevalentemente tramite un processo di diffusione e di filtrazione. Quest'ultimo è reso possibile anzitutto da una singolare struttura dei capillari ciliari, da uno strato stromale finissimo e dal tipo di giunzioni (lasse) che uniscono fra loro le cellule epiteliali non pigmentate, consentendo il passaggio quasi esclusivo di acqua e di piccoli ioni. Il meccanismo attivo (secrezione) avviene attraverso un processo energetico mediato da un'intensa attività enzimatica (ATPasi, anidrase carbonica) e si attua secondo i seguenti momenti:

- ingresso di sodio nelle cellule non pigmentate, sia per diffusione che per scambio con idrogeno, ottenuto dalla reazione:  
$$\text{anidride carbonica} + \text{acqua} \Rightarrow \text{ione idrogeno} + \text{ione bicarbonato}$$
- trasporto attivo del sodio negli spazi intercellulari a livello prossimale dell'epitelio pigmentato, con creazione di un microgradiente osmotico;
- richiamo di acqua negli spazi intercellulari distali e quindi ingresso nella camera posteriore.

La produzione di umor acqueo non è costante nelle 24 ore, ma si riduce, fra l'altro in maniera notevole, nelle ore notturne. Tuttavia, anche durante la giornata il vol/min prodotto è condizionato da vari fattori sia locali (alterata permeabilità capillare, riduzione del flusso plasmatico capillare, alterazioni delle giunzioni intercellulari epiteliali) che generali (modificazioni della pressione arteriosa sistemica o della pressione osmotica del plasma).

Prodotto nella camera posteriore, l'umor acqueo raggiunge la camera anteriore attraverso il foro pupillare e lascia quest'ultima a livello dell'angolo della camera anteriore. Il deflusso si attua essenzialmente attraverso le maglie del trabecolato corneosclerale (cfr. Fig. 6) ed il sistema vene acquose-vene episclerali, ma un certo quantitativo di umor acqueo lascia la camera anteriore anche attraverso le cosiddette vie uveosclerali, penetrando attraverso gli spazi interstiziali del muscolo ciliare e, attraverso gli spazi sopraciliari e sopracoroidali, abbandonando la cavità oculare attraverso la sclera.

Regolazione del tono endoculare. Il meccanismo di regolazione più importante del tono endoculare è costituito dalla resistenza offerta dal trabecolato iridocorneale a farsi attraversare. Il deflusso di umor acqueo dalla camera anteriore al canale di Schlemm è un fenomeno pressione-dipendente, risultando dalla somma algebrica dei meccanismi che tendono ad aumentare la resistenza (compressione meccanica degli spazi inter-trabecolari e del canale di Schlemm) e di altri che invece la riducono (aumento di pori all'interno del canale di Schlemm e di invaginazioni nello strato endoteliale più profondo). Sebbene l'attività trabecolare sembri avvenire senza dispendio energetico, gli elementi cellulari ivi presenti contribuiscono indubbiamente

a regolare tale fenomeno. La tensione endoculare (mediamente di 16 mmHg, con una deviazione standard di 2,5 mmHg) è soggetta a variazioni di tipo circadiano, nell'ordine di 4 o 5 mmHg, con valori più elevati al mattino ed alla sera. La tensione endoculare è inoltre in qualche modo modulata dal sistema nervoso autonomo: il simpatico cervicale (come pure il blocco del sistema b-adrenergico) la diminuisce, probabilmente riducendo la produzione di umor acqueo; il parasimpatico (come pure il blocco del sistema a-adrenergico) ha effetto analogo, ma per un'azione migliorante la pervietà degli emuntori.

### **FLUSSO EMATICO RETINICO**

Poiché il consumo di ossigeno da parte della retina nervosa è costante e sia l'eccesso che il difetto di ossigeno sono altamente lesivi, la perfusione del letto vascolare retinico irrorato dall'arteria centrale della retina è soggetta ad un certo grado di autoregolazione del flusso ematico, basata su due sistemi diversi (Fig. 17/1). Questi sono in parte esterni all'occhio e sensibili alle variazioni della pressione ematica ed in parte interni all'occhio e sensibili alle variazioni delle pressioni parziali dell'ossigeno, dell'anidride carbonica ed al pH tissutale. Le risposte sono la vasocostrizione in caso di ipertensione arteriosa o di aumento della tensione di ossigeno o di alcalosi, la vasodilatazione in caso di ipotensione arteriosa o di aumento della tensione di anidride carbonica o di acidosi. Le possibilità di autoregolazione diminuiscono con l'età a causa dell'arteriosclerosi involutiva, a causa della quale la quota di fibrocellule contrattili delle arteriole diminuisce a vantaggio di quelle rigide.

Un esempio dell'importanza della pressione parziale dei gas ematici nel regolare il flusso ematico retinico viene da una condizione patologica nota come retinopatia dei prematuri (fibroplasia retrolenticolare). Si tratta di un'affezione, in genere bilaterale, che interessa i vasi retinici immaturi ed è stata, in passato, una delle maggiori cause di cecità nei neonati, fino a quando l'impiego di concentrazioni di ossigeno regolate sulla base dei livelli della sua pressione parziale nel sangue arterioso ha consentito di ridurre l'incidenza di retinopatie, senza peraltro incorrere nei rischi di ipossia e migliorando anche la prognosi delle sindromi respiratorie neonatali e la sopravvivenza dei neonati pretermine.

La vascolarizzazione della retina del feto inizia al IV mese ed i vasi progrediscono dal centro alla periferia raggiungendo il settore nasale verso l'VIII mese e quello temporale verso il IX. Nella retinopatia dei prematuri, l'evoluzione della vascolarizzazione retinica è alterata in quanto l'aumento forzato della PaO<sub>2</sub> porta a vasocostrizione arteriolare con conseguente obliterazione dei capillari neoformati o loro minore formazione, in particolare nella regione situata immediatamente dietro il fronte di proliferazione mesenchimale, normalmente più vascolarizzato. Il mesenchima cessa quindi di proliferare ed avanzare, formando un bordo tissutale, le arterie e le vene di questo bordo non drenano più nei capillari, ma nelle piccole anastomosi artero-venose che si formano in maggior quantità a spese dei pochi capillari formati, costituendo shunt che formano una massa spugnosa fatta da irregolari canalizzazioni. Le pareti di questi shunt sono inoltre abnormemente permeabili, trattandosi di endotelio immaturo ed incompleto. Il letto capillare dello shunt è largamente obliterato, e ciò provoca anomalie della pressione responsabili di dilatazioni e tortuosità, microaneurismi, canali collaterali e neovascolarizzazioni che comportano fenomeni essudativi ed emorragici vitreoretinici con possibili trazioni vitreali e distacco di retina. Questa è la fase attiva della malattia, che spesso regredisce spontaneamente, e la cui entità è funzione della precocità della iperossigenazione. Segue un'evoluzione verso la regressione, la cicatrizzazione o, più frequentemente, una combinazione fra le due.

La circolazione dell'arteria centrale della retina risente in qualche modo della circolazione endocranica per cui, esaurite le possibilità di autoregolazione, quando il circolo carotideo rallenta, quindi con aumento della pressione diastolica, i vasi retinici si dilatano; viceversa, una maggiore velocità del circolo carotideo, con diminuzione della pressione diastolica, provoca una riduzione di diametro dei vasi retinici. Naturalmente, le variazioni di pressione sistolica determinano effetti inversi.

A livello della coriocalpillare la circolazione ematica è assai veloce e la coroide risulta essere il tessuto di gran lunga più perfuso di tutto l'organismo. Il motivo di una così elevata velocità di circolo è attribuito alla necessità di smaltire il calore che la luce focalizzata accumula sulla retina. Tra la coriocalpillare e l'epitelio pigmentato è interposta una membrana anista assai povera di cellule (lamina di Bruch), per cui la barriera ematocellulare, cioè la regolatrice degli scambi fra sangue e tessuto retinico, a questo livello è costituita dall'epitelio pigmentato. Quando questa barriera non è in grado di svolgere le sue funzioni, i fluidi filtrati dai capillari permeano gli strati retinici provocando distacchi sierosi della retina. Il fenomeno è più frequente a livello della macula. La perfusione della coroide ha scarsa regolazione, ma risente del tono endoculare e, forse, dell'azione del sistema nervoso autonomo. L'influenza del tono endoculare può essere interpretata

come un meccanismo che possa, in parte, consentire alla coroide di evitarne brusche variazioni. I vasi della coroide, infatti, sono prevalentemente venosi (vene vorticosi) e la loro pressione è quindi relativamente bassa. Aumenti della pressione endoculare, quindi, potrebbero provocare uno "schiacciamento" della coroide, con conseguente riduzione del contenuto di sangue venoso e diminuzione del suo spessore. Ciò potrebbe consentire un certo aumento di volume del contenuto sclerale, compensando gli aumenti pressori e riducendone gli effetti lesivi sulle delicate strutture retiniche. Il meccanismo potrebbe essere efficace per rapide variazioni della pressione endoculare, ma non per variazioni mantenute nel tempo, specialmente in presenza di aumenti progressivi della pressione endoculare: in questi casi, infatti, il meccanismo "tampone" della coroide, una volta che questa avesse ridotto stabilmente il proprio volume, diverrebbe inefficace.

## MOTILITA' INTRINSECA DELL'OCCHIO

### RIFLESSI PUPILLARI

Poiché il sistema refrattivo dell'occhio non ha le medesime proprietà nei differenti gradi di illuminazione, l'occhio è munito di un diaframma, l'iride, le cui modificazioni di apertura possono variare l'intensità dell'illuminazione. L'apertura di tale diaframma è chiamata pupilla, e la sua ampiezza è regolata dall'azione di due muscoli, il costrittore (o sfintere) ed il dilatatore.

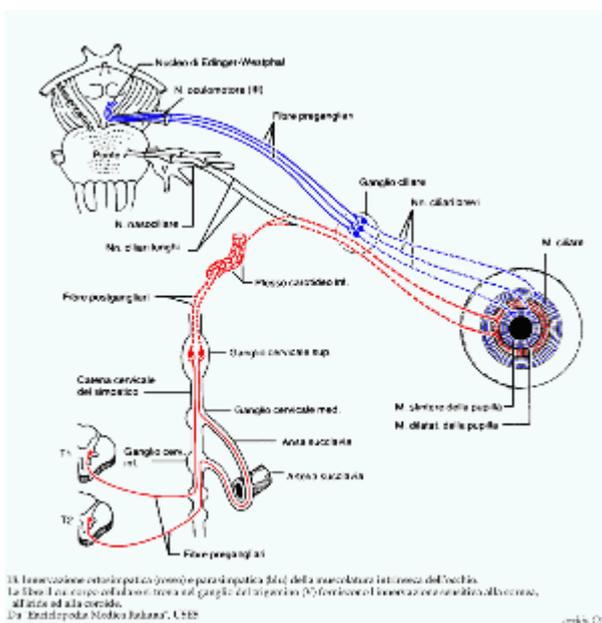


Fig. 18

Il muscolo costrittore della pupilla determina miosi ed è innervato esclusivamente dal parasimpatico (Figg. 12, 18). La miosi si attua attraverso il seguente arco riflesso, la cui parte efferente è schematizzata nella Fig. 18:

retina nervo ottico nucleo pretettale nucleo di Edinger-Westphal fibre pregangliari nel nervo oculomotore (III) sinapsi nel ganglio ciliare fibre postgangliari (nervi ciliari brevi) muscolo costrittore. Il riflesso fotomotore consensuale (restrizione della pupilla dell'occhio non illuminato in seguito all'illuminazione dell'altro occhio) è il risultato dell'incrocciamento di alcune fibre del nervo ottico nel chiasma ottico e del fatto che, comunque, queste raggiungono bilateralmente i nuclei pretettali. Il muscolo dilatatore della pupilla determina midriasi ed è innervato dall'ortosimpatico. La midriasi si attua secondo il seguente arco riflesso, la cui parte efferente è schematizzata nella Fig. 18:

retina nervo ottico reticolare mesencefalica centro ciliospinale di Budge nel midollo spinale toracico (corna grigie laterali) fibre simpatiche pregangliari catena simpatica laterovertebrale sinapsi nel ganglio cervicale superiore fibre postgangliari che attraversano i plessi carotidei e cavernoso (a) alcune fibre nel nervo oftalmico (V) ed i suoi nervi ciliari lunghi; (b) altre fibre attraversano il ganglio ciliare e prendono la via dei nervi ciliari brevi muscolo dilatatore.

Probabilmente alcune fibre ortosimpatiche dei nervi ciliari brevi si portano, anziché al muscolo dilatatore della pupilla, al muscolo tarsale superiore (muscolo liscio) o, meno verosimilmente, all'elevatore della palpebra superiore (muscolo striato), promuovendo un leggero allargamento della rima palpebrale in concomitanza con la midriasi.

Adrenalina, efedrina, anfetamina e cocaina determinano midriasi per azione simpatico-mimetica; atropina, omatropina e scopolamina determinano midriasi per azione parasimpatico-litica; pilocarpina, metacoina e muscarina determinano miosi per azione parasimpatico-mimetica.

Le funzioni del diaframma pupillare sono essenzialmente le seguenti:

- 1) Regolazione della quantità di luce incidente sulla retina. L'entità dell'illuminazione retinica non è definita dalle caratteristiche fotometriche della superficie che viene osservata, poiché la quantità di luce incidente sulla retina dipende dall'ampiezza della pupilla. Sono state proposte diverse unità

fotometriche che tengono in considerazione l'influenza del diametro pupillare (unità di Koenig, fotone), ma nessuna di esse esprime del tutto correttamente l'illuminazione retinica, perché l'efficacia dei raggi luminosi diminuisce quando essi attraversano parti eccentriche della pupilla (effetto Stiles-Crawford). È necessario quindi, per effettuare misure precise, l'uso della cosiddetta pupilla artificiale, cioè un foro stenopeico del diametro di 2,5 mm.

- 2) Regolazione della profondità focale dell'occhio. Per profondità focale si intende la distanza alla quale un oggetto può essere posto producendo ancora un'immagine chiara sulla retina. Questa distanza diminuisce con l'aumentare dell'apertura del sistema ottico. Ad esempio, con una pupilla del diametro di 3 mm e l'occhio a fuoco per 24 m, sono a fuoco oggetti dall'infinito fino a 12 m. Ma se l'occhio lavora ad una distanza di 25 cm, la profondità focale, a parità di diametro pupillare, è di solo 1,1 cm. Nell'accomodazione per la vista da vicino, però, la pupilla si contrae e la profondità di campo aumenta. La miosi ha quindi, in questo caso, un effetto favorevole, pur riducendo la quantità di luce che entra nell'occhio.
- 3) Riduzione dell'aberrazione sferica e cromatica. Secondo il teorema di Gauss, per la massima efficienza il sistema ottico deve essere limitato da un'apertura molto piccola, cosicché i raggi luminosi siano ristretti solo ad una regione assiale e l'ampiezza dei cerchi di diffusione sia la minore possibile. Teoricamente, se la pupilla fosse puntiforme, entrerebbe solo un raggio e si formerebbe sulla retina un unico disco di diffrazione. Negli strumenti ottici, un'apertura di  $10^\circ$  è considerata compatibile con una buona efficienza, ma nell'occhio, una pupilla di 4 mm corrisponde ad un'apertura di  $20^\circ$ .

## **ACCOMODAZIONE**

L'accomodazione è la proprietà di variare il potere refrattivo del cristallino. Ne è responsabile, come già riferito, il muscolo ciliare, e più propriamente le sue fibre circolari ad innervazione colinergica. Per effetto della loro contrazione, la zonula ciliare si rilascia ed il cristallino tende ad assumere una forma più sferica, con aumento della curvatura della faccia anteriore (quella della faccia posteriore rimane pressoché invariata), con conseguente aumento del potere refrattivo del cristallino, che provoca la anteriorizzazione del punto di messa a fuoco delle immagini sulla retina. La variazione del cristallino è uguale su tutti i meridiani ed avviene sempre consensualmente in entrambi gli occhi. Mediante l'accomodazione è possibile quindi mettere a fuoco sulla retina immagini che si formano su piani anteriori o posteriori ad essa. In condizioni di emmetropia, allo stato di riposo accomodativo, il sistema diottrico focalizza sulla retina le immagini degli oggetti posti all'infinito (punto remoto); avvicinando gli oggetti, le loro immagini si formano su piani posteriori alla retina, sulla quale si formano così cerchi di diffusione con deterioramento della visione. L'apparato accomodativo, però, riporta a fuoco le immagini sulla retina aumentando la refrazione del sistema diottrico, il che avviene fino ad un preciso limite (punto prossimo), oltre il quale il compenso non è più possibile.

L'accomodazione non costituisce che un elemento di un complesso riflesso (riflesso della vicinanza), del quale fanno parte due altri fenomeni che nell'individuo normale avvengono pure bilateralmente e consensualmente: convergenza e miosi. Essi sono diretti, come l'accomodazione, ad ottenere la percezione chiara degli oggetti vicini: il primo portando gli assi visivi dei due occhi sul punto di fissazione, il secondo eliminando l'eccesso di aberrazione sferica ed aumentando la profondità di campo. Questi tre movimenti sono tutti controllati da fibre del nervo oculomotore (III). Solo in condizioni artificiali (uso di prismi o lenti) o patologiche (alterazione dei riflessi pupillari, strabismo), si può avere dissociazione dei tre fenomeni.

## **MOTILITA' ESTRINSECA DELL'OCCHIO**

I muscoli estrinseci dell'occhio sono muscoli striati che si diversificano notevolmente da quelli delle restanti parti del corpo sia perché posseggono un'innervazione molto più ricca (sono quelli dotati delle più piccole unità motorie), sia per il fatto che le fibre che li costituiscono presentano maggiori variazioni morfologiche ed istochimiche, la cui conoscenza riveste importanza pratica per la diagnosi bioptica di varie miopatie.

Sono stati distinti tre tipi di fibre muscolari: spesse (diametro da 10 a 38  $\mu$ m, provviste, in genere, di 2-3 nuclei) presenti soprattutto alle estremità dei muscoli e provviste di terminazioni nervose multiple, sottili (diametro da 13 a 30  $\mu$ m, costituite da miofibrille molto sottili, organizzate in lamine), poco rappresentate in tutte le porzioni dei muscoli e provviste di un'unica terminazione nervosa e granulari (diametro da 13 a 38  $\mu$ m, con miofibrille dalla morfologia irregolare, organizzate quasi a formare una rete), prevalenti nelle porzioni centrali dei muscoli e provviste di un'unica terminazione nervosa. Dal punto di vista metabolico, le fibre spesse presentano un elevato contenuto di enzimi correlati al metabolismo ossidativo e glicolitico, come pure un'elevata presenza di ATPasi alcalina; quelle sottili presentano una moderata reattività per gli

enzimi ossidativi e glicolitici ed un elevato contenuto di ATPasi acida; le fibre granulari presentano un elevato contenuto di a-glicerofosfatodeidrogenasi ed ATPasi alcalina.

Azioni dei muscoli estrinseci dell'occhio (Fig. 18/1).

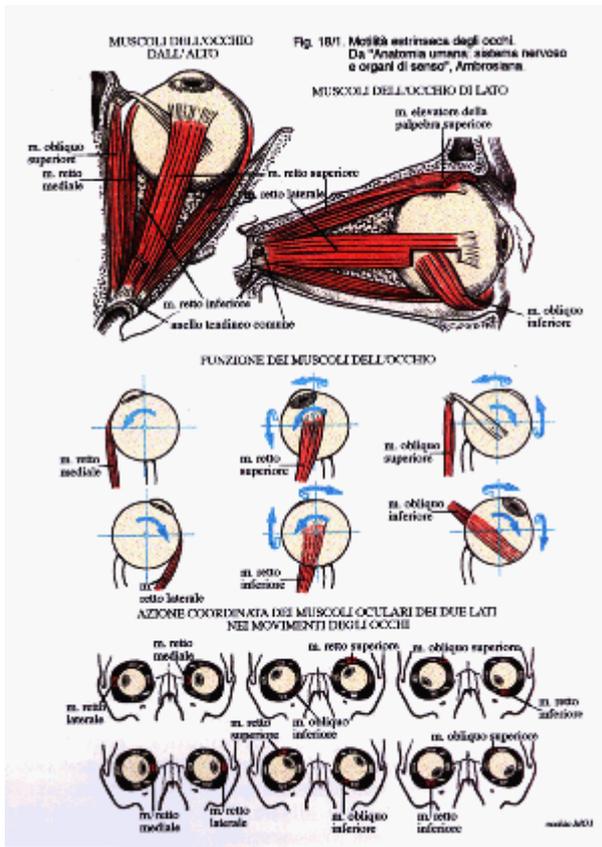


Fig. 18/1

I muscoli retti, avendo il punto fisso sul fondo dell'orbita e l'inserzione sul globo, portano quest'ultimo in dietro, mentre gli obliqui, avendo l'inserzione sulla parte anteriore dell'orbita (l'obliquo superiore per via della riflessione nella troclea), portano il globo oculare in avanti. Nel gioco reciproco del tono muscolare, quindi, i due gruppi sono antagonisti, cioè i retti sono retrattori e gli obliqui protrattori: l'occhio sta in equilibrio tra le due forze.

Ognuno dei quattro movimenti fondamentali del globo oculare (abduzione, adduzione, elevazione ed abbassamento) può essere determinato dall'azione di più di un muscolo, come già riferito nella sezione di Anatomia e come riportato nella Tabella 5.

Si ammette, quindi, che il retto mediale ed il retto laterale siano antagonisti, come pure il superiore e l'inferiore per i movimenti di elevazione, abbassamento e rotazione, pur essendo entrambi adduttori; che gli obliqui superiore ed inferiore siano antagonisti per la rotazione, l'elevazione e l'abbassamento, pur essendo entrambi abduzioni.

Tabella 5, movimenti fondamentali dell'occhio e muscoli responsabili

movimento	muscoli responsabili
adduzione	retto mediale, retto superiore, retto inferiore
abduzione	retto laterale, obliquo superiore, obliquo inferiore
elevazione	retto superiore, obliquo inferiore
abbassamento	retto inferiore, obliquo superiore

### MOVIMENTI OCULARI

La bilaterale integrazione delle attività oculomotorie fa sì che i due occhi costituiscano una singola unità funzionale e realizzino insieme una sorta di occhio ciclopico, capace di provvedere alla visione unica e stereoscopica degli oggetti. I movimenti dei due occhi possono essere uguali (orizzontali, verticali, di torsione sull'asse antero-posteriore) od opposti (convergenza, divergenza), dovendo soddisfare molteplici esigenze, quali:

- 1) mantenere stabile l'asse visivo,
- 2) rintracciare, inseguire e fissare gli oggetti che entrano nel campo visivo,
- 3) consentire una visione unica e stereoscopica,
- 4) permettere una esplorazione attenta dell'ambiente.

Questi obiettivi vengono raggiunti mediante un complesso meccanismo coordinativo che, integrando le attivazioni e le inibizioni originate dai labirinti, dalle articolazioni e dai muscoli del collo, dalla retina, specificatamente dalla fovea, e dalle terminazioni sensoriali in genere, correla i movimenti oculari fra di loro e con le restanti attività motorie somatiche.

I sistemi neuronali di controllo che mantengono la fovea su un bersaglio visivo sono cinque:

- i movimenti vestibolo-oculari, che mantengono stabili le immagini sulla retina durante i movimenti fasici del capo;
- i movimenti optocinetici, che mantengono stabili le immagini sulla retina durante i movimenti rotatori prolungati del capo;
- i movimenti saccadici, che portano rapidamente la fovea verso un bersaglio visivo posto più perifericamente;
- i movimenti di inseguimento, che mantengono fissa sulla retina l'immagine di un oggetto in movimento;
- i movimenti di vergenza, che fanno sì che l'immagine di un oggetto più lontano o più vicino si proietti sempre su entrambe le fovee.

I primi quattro movimenti sono coniugati, nel senso che ciascun occhio compie un movimento della stessa ampiezza e nella stessa direzione, il quinto movimento è disgiuntivo: gli occhi si muovono in direzioni diverse ed anche le ampiezze possono essere diverse.

I movimenti vestibolo-oculari, o riflessi vestibolo-oculari o nistagmo vestibolare sono causati dalla rotazione del capo, e quindi dalla attivazione dei canali semicircolari, in una data direzione e caratterizzati dalla rotazione degli occhi in direzione opposta (fase lenta), seguita da un brusco riallineamento (fase rapida) quando la direzione dello sguardo raggiunge l'estremità dell'orbita. Il movimento oculare si mantiene, alternando fasi lente e rapide, per tutto il tempo della rotazione del capo, determinando un movimento oscillatorio ritmico degli occhi, detto nistagmo. Al buio, il nistagmo non continua indefinitamente, in quanto i canali semicircolari si adattano alla rotazione continua. Oltre che con la rotazione del capo, il nistagmo vestibolare può essere evocato a testa ferma immergendo acqua calda (o fredda) nell'orecchio, in quanto la differenza di temperatura che così si instaura genera moti convettivi dell'endolinfa contenuta nei canali semicircolari, che si attivano come in seguito alla stimolazione fisiologica.

La risposta del riflesso vestibolo-oculare (nistagmo vestibolare) viene coordinata da formazioni situate nel tronco dell'encefalo, fra cui primariamente i nuclei vestibolari, che ricevono dai canali semicircolari informazioni precise sulla velocità e direzione della rotazione della testa. Altre strutture troncoencefaliche coordinano le risposte oculari sui piani orizzontale e verticale e mantengono lo sguardo fermo fra un movimento ed il successivo; al di fuori del tronco dell'encefalo, altre strutture, fra cui il cervelletto, modulano la risposta vestibolo-oculare.

I movimenti optocinetici, o riflessi optocinetici o nistagmo optocinetico sono caratterizzati dallo stesso andamento oscillatorio degli occhi che caratterizza il nistagmo vestibolare, ma sono dovuti ai movimenti di tutte (o gran parte) le immagini visive sulla retina, come si verifica quando si ruota il capo, compensando, così, le imprecisioni del nistagmo vestibolare. Si può far insorgere un riflesso optocinetico ponendo un soggetto all'interno di un cilindro a strisce bianche e nere verticali. Quando il cilindro ruota, si manifesta un nistagmo optocinetico, che è simile al nistagmo vestibolare che si svilupperebbe se la sedia sulla quale il soggetto è seduto venisse fatta ruotare in direzione opposta, ed il soggetto prova la sensazione di essere lui stesso a ruotare.

La risposta del riflesso optocinetico dipende da strutture sia corticali che sottocorticali; fra queste ultime sono comprese anche i nuclei vestibolari che, tramite il pretetto, ricevono informazioni dalla retina. La componente corticale comprende l'area visiva primaria, cui, a questo scopo, arrivano fibre dagli strati magnocellulari del nucleo genicolato laterale, ed altre aree visive corticali.

I movimenti saccadici assomigliano alla fase rapida del nistagmo. Se, mentre si guarda un bersaglio visivo, l'immagine di questo si sposta rapidamente sulla fovea, gli occhi conservano la posizione che avevano per circa 200 msec e poi compiono un movimento rapido, saccadico, per riportare l'immagine del bersaglio sulla fovea. Analogamente, si compiono movimenti oculari saccadici, volontari ma spesso non coscienti, quando si esplora lo spazio circostante, per quanto ristretto esso sia. I movimenti saccadici sono molto stereotipati;

hanno un andamento standardizzato, caratterizzato da un incremento ed un successivo decremento regolari della velocità di rotazione del globo oculare, che può raggiungere i 900 °/sec ( $1^\circ = 1 \text{ cm}$  a 57 cm di distanza dall'occhio). È possibile modificare volontariamente l'ampiezza e la direzione dei movimenti saccadici, ma non la loro velocità. Questa è tale, e la durata del movimento così breve (poche decine di msec; se ne compiono in media 3 al secondo), che le informazioni visive non fanno in tempo a modificarne il decorso una volta che sono iniziati; le eventuali correzioni vengono quindi operate con ulteriori piccoli movimenti saccadici che seguono quello primario.

I movimenti saccadici orizzontali vengono generati a livello della formazione reticolare del ponte, mentre quelli verticali dalla formazione reticolare del mesencefalo. Il cervelletto è anch'esso coinvolto, probabilmente per la modulazione basata sull'esperienza. Anche il collicolo superiore, che riceve fibre retiniche dirette, svolge un ruolo di rilievo nel controllo dei movimenti saccadici. L'azione collicolare può essere controllata dai campi oculari frontali (area 8 della corteccia cerebrale), che, a loro volta, possono influenzare i movimenti saccadici anche indipendentemente dal collicolo superiore.

I movimenti lenti o di inseguimento provocano il movimento degli occhi per mantenere sulla fovea l'immagine di un particolare bersaglio visivo che si muove nello spazio. Si tratta di movimenti volontari, per la cui esecuzione è necessaria la presenza di uno stimolo in movimento. Non è possibile eseguire un movimento lento di inseguimento in risposta ad un comando di natura esclusivamente verbale, senza la presenza di un bersaglio visivo in movimento; a differenza del nistagmo e dei movimenti saccadici, per effettuare questi movimenti è necessario prestare attenzione al bersaglio in movimento. La velocità massima è ritenuta essere di 100 °/sec, ma probabilmente questo valore è sovrastimato, ed uno più realistico potrebbe essere di 40 °/sec. Per l'esecuzione dei movimenti lenti di inseguimento è necessaria l'integrità della corteccia cerebrale (corteccia striata, regioni parietali e temporali), del cervelletto e del ponte.

I movimenti di vergenza sono movimenti disgiuntivi (a differenza di tutti i precedenti che sono coniugati), in quanto gli occhi si muovono con ampiezze e direzioni diverse l'uno dall'altro, per consentire la fissazione di oggetti posti a differenti distanze dall'osservatore (più lontani o più vicini rispetto all'oggetto appena fissato) o in movimento sul piano sagittale. Se l'oggetto si avvicina, si hanno movimenti di convergenza, se si allontana di divergenza.

I movimenti di vergenza sono organizzati a livello del mesencefalo.

### **ELETTROCULOGRAFIA (EOG)**

L'elettro-oculografia è una registrazione grafica (su carta, tramite penne scriventi, su oscilloscopio o mediante un computer) dei movimenti del bulbo oculare. Non deriva direttamente l'attività della muscolatura estrinseca dell'occhio, ma ne dà informazioni indirette, essendo basata sulla registrazione ed amplificazione delle variazioni del campo elettrico periorbitario determinate dagli spostamenti del globo oculare, che si configura come un bipolo con cornea positiva e retina negativa, dove la differenza di potenziale fra le due estremità è di circa 0,5 mV. La differenza di potenziale è dovuta all'attività elettrica della retina, e la sua entità è quindi diversa a seconda che la registrazione venga fatta con l'occhio illuminato o meno. Possono essere registrati sia i movimenti oculari orizzontali che quelli verticali, ma non quelli di torsione sull'asse antero-posteriore, in quanto questi non modificano l'orientamento del bipolo e non determinano quindi differenze di potenziale sugli elettrodi di derivazione. Questi possono essere in numero variabile: 2 o 4, o il doppio se si desidera registrare i movimenti di entrambi gli occhi. Gli elettrodi vengono messi intorno all'occhio: uno superiore ed uno inferiore, per registrare i movimenti verticali; uno esterno ed uno interno, per registrare i movimenti orizzontali. Gli elettrodi di registrazione sono preferibilmente di argento, a piastra, da applicarsi sulla superficie pulita e sgrassata della cute per il tramite di una pasta conduttrice.

Per lo studio dei movimenti oculari verso l'alto, si deve tener presente che, usando le convenzionali derivazioni bipolari ora descritte, si registra un artefatto, dovuto alla attività elettromiografica relativa allo spostamento del sopracciglio, che si aggiunge al tracciato EOG potendo rendere praticamente impossibile una corretta attribuzione della risposta all'attività muscolare responsabile. Per eliminare l'artefatto, si deve ricorrere ad una derivazione monopolare: l'elettrodo derivante viene situato al di sotto dell'orbita, nell'usuale posizione intermedia fra canto esterno ed interno, mentre l'elettrodo indifferente può essere sistemato nel mento, avendo cura di posizionarlo lungo la retta verticale che passa per il centro dell'orbita, la pupilla e l'elettrodo derivante, così da non registrare, contemporaneamente, anche eventuali spostamenti orizzontali del globo oculare.

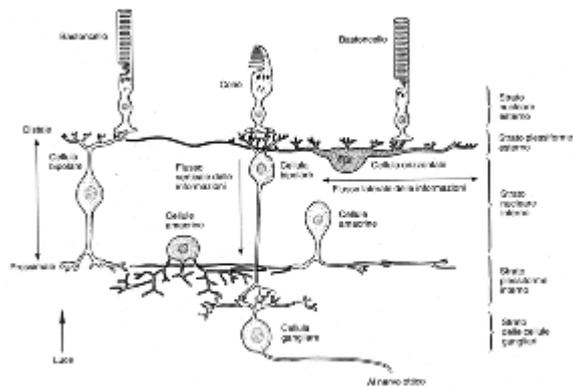


Tabella 6, differenze fra coni e bastoncelli e loro sistemi neurali

	CONI	BASTONCELLI
Sensibilità	bassa:poco pigmento, poca amplificazione, specializzati per la visione diurna ofotopica	elevata:molto pigmento, molta amplificazione, specializzati per la visione notturna oscotopica
Risoluzione temporale	elevata (fino a 55 Hz)	bassa (fino a 12Hz)
Acuità visiva	elevata: particolarmente concentrati nella fovea, vie retiniche poco convergenti	bassa: assenti nella fovea, vie retiniche molto convergenti
Colori	Cromatici: tre tipi di coni, ciascuno con un diverso pigmento	Acromatici: tutti con un solo tipo di pigmento

I meccanismi della fototrasduzione comportano una serie di eventi biochimici a cascata nel segmento esterno dei fotorecettori, schematizzati nella [Fig. 20C](#). Essenzialmente, la fototrasduzione comporta la chiusura di canali al Na<sup>+</sup>, che al buio sono normalmente aperti grazie agli elevati livelli intracellulari di GMPc (guanosiin-monofosfato ciclico). La luce, infatti, viene assorbita dalle molecole di fotopigmento (rodopsina, nei bastoncelli, [Fig. 20D](#)) che, attivate, stimolano una proteina-G (transducina, nei bastoncelli) che attiva, a sua volta, una GMPc-fosfodiesterasi. Questo enzima catalizza la degradazione del GMPc a 5'-GMP, provocando la riduzione della concentrazione intracellulare del GMPc e quindi la chiusura dei canali del Na<sup>+</sup>, determinando l'iperpolarizzazione dei fotorecettori, che rappresenta quindi la risposta di questi alla stimolazione luminosa. La concentrazione del GMPc nel segmento esterno dei fotorecettori non è regolata soltanto dalla luce, ma anche dalla concentrazione intracellulare del calcio. La modulazione esercitata dai Ca<sup>2+</sup> sui livelli di GMPc è importante per i processi di adattamento alla luce, che si verificano quando si passa da un ambiente oscuro ad uno molto illuminato. In questa circostanza, all'inizio la luce ha un effetto accecante, ma, dopo qualche decina di secondi, l'occhio si adatta alla nuova situazione. Il fenomeno dipende da una serie di fattori, come, ad esempio, la contrazione della pupilla, ma le modifiche principali che esso comporta sono a carico dei fotorecettori. Una luce molto vivace fa chiudere tutti i canali GMPc-dipendenti, iperpolarizzando massimalmente i coni, che non sono quindi più in grado di rispondere ad ulteriori variazioni del flusso luminoso. Lentamente, però, i coni si depolarizzano di nuovo, a parità di flusso luminoso, tornando ad essere sensibili alle sue variazioni, e l'elevata luminosità di fondo non risulta più accecante. In tutto questo, i Ca<sup>2+</sup> svolgono un ruolo importante, in quanto normalmente inibiscono la guanilato ciclasi, l'enzima che produce il GMPc. Quando i canali per il Na<sup>+</sup> sono chiusi, i Ca<sup>2+</sup> che normalmente li attraversano entrando nella cellula si trovano sbarrata la via di ingresso, la loro concentrazione intracellulare si riduce (il processo attivo che li pompa fuori dalla cellula non viene alterato) e si riduce quindi anche l'inibizione che essi esercitano sulla guanilato ciclasi. Viene quindi sintetizzato più GMPc ed i canali per il Na<sup>+</sup> tornano ad aprirsi.

La retina modifica ed elabora i segnali evocati dalla luce nei fotorecettori prima di inviarli al sistema nervoso centrale. I neuroni d'uscita della retina sono le cellule gangliari, i cui assoni formano il nervo ottico e raggiungono il corpo genicolato laterale, il collicolo superiore ed altri nuclei del tronco dell'encefalo. A differenza dei fotorecettori, che rispondono alla luce con modificazioni graduali del loro potenziale di membrana, le cellule gangliari trasmettono le loro informazioni sotto forma di scariche di potenziali d'azione. I segnali dei fotorecettori vengono trasmessi alle cellule gangliari tramite tre tipi di interneuroni: le cellule bipolari, le cellule orizzontali e le cellule amacrine ([Fig. 21](#)). Queste cellule sommano anche i segnali provenienti da diversi fotorecettori.



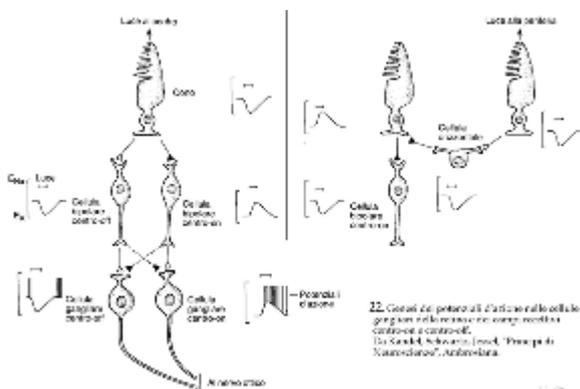
21. Cellule retiniche responsabili della codificazione visiva.  
Da Kandel, Schwartz, Jessell, "Principi di Neuroscienze", Ambrosiana.

active:R3

Fig. 21

movimento, mentre altre mettono invece in rilievo i dettagli ed il colore degli oggetti presenti nella scena visiva.

Mentre l'informazione visiva viene trasferita dai fotorecettori alle cellule gangliari, essa viene anche separata in due vie parallele, dette rispettivamente via centro-on e via centro-off. Le cellule gangliari centro-on vengono eccitate quando la luce stimola il centro dei loro campi recettivi e inibite quando ne viene stimolata la periferia; le cellule gangliari centro-off presentano risposte opposte (Fig. 22). Queste trasformazioni dell'informazione visiva fanno sì che i centri superiori possano mettere in evidenza piccole differenze e rapide variazioni di luminosità. Esistono poi cellule gangliari che sono specializzate nella elaborazione di altre caratteristiche delle immagini visive. Alcune sono deputate a trasmettere informazioni relative alle caratteristiche generali delle immagini visive ed al loro



22. Campi del potenziale d'azione nelle cellule gangliari nella retina in diverse condizioni di stimolazione.  
Da Kandel, Schwartz, Jessell, "Principi di Neuroscienze", Ambrosiana.

active:R3

Fig. 22

diverse caratteristiche degli stimoli visivi in vie distinte poste in parallelo e le modificazioni delle risposte mediante connessioni inibitorie laterali sono principi cardine, mantenuti e sviluppati ad ogni livello successivo del sistema visivo.

Le diverse risposte delle cellule gangliari sono espressione dei differenti tipi di contatti sinaptici presenti nella retina. Anche le cellule bipolari, come le cellule gangliari, si possono distinguere in centro-on e centro-off (cfr. Fig. 22). Il neurotrasmettitore liberato dai fotorecettori eccita le cellule bipolari di un tipo ed inibisce quelle dell'altro. Ciascun fotorecettore ha contatti sinaptici con cellule bipolari di entrambi i tipi. I recettori situati nel centro del campo recettivo di una cellula gangliare fanno sinapsi con cellule bipolari che entrano in diretto contatto con la cellula gangliare stessa. Gli stimoli provenienti dai coni localizzati alla periferia dei campi recettivi vengono invece convogliati lungo vie collaterali che passano attraverso le cellule orizzontali e le cellule amacrine. La separazione delle

## ELETTRORETINOGRAFIA (ERG)

L'elettroretinografia è la registrazione del potenziale elettrico composto prodotto dalla retina in risposta alla stimolazione visiva. Il potenziale, di pochi mV, si manifesta ai due lati opposti della retina, e viene generalmente registrato applicando un elettrodo attivo all'occhio, mediante un'opportuna lente a contatto corneale, ed uno indifferente a sufficiente distanza (orecchio o fronte). Per la stimolazione luminosa, vengono generalmente utilizzati flash di elevata intensità e breve durata (stroboscopici), ovvero alternanza di bande chiare e scure.

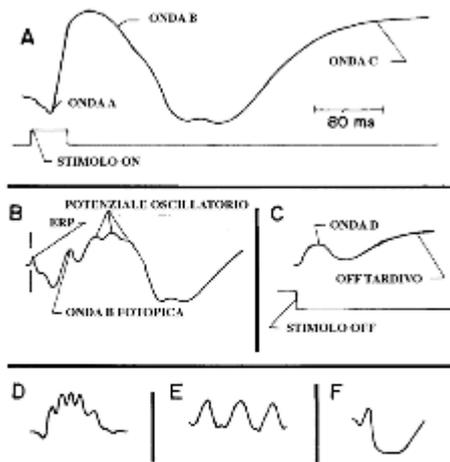


Fig. 22/1. Tipici tracciati elettroretinografici.  
 A: risposta scotopica ad una breve illuminazione di un occhio adattato al buio.  
 B: potenziale precoce di risposta (ERP), normalmente non visibile perché si presenta solo con elevate intensità di stimolazione. I potenziali oscillatori sono sovrapposti alla componente scotopica dell'onda B.  
 C: l'onda D della risposta off compare alla cessazione dello stimolo e può essere seguita da una serie di onde lente.  
 D: ERG di un occhio prevalentemente fotopico (tanu frog) con evidenti potenziali oscillatori.  
 E: risposta fotopica ad uno stimolo intermittente.  
 F: risposta ad un pattern alternante.  
 Da "Encyclopedia of Neuroscience", Birkhauser.

### Fig 22/1

localizzati a profondità diverse all'interno dello strato delle cellule bipolari. L'onda c, anch'essa ampia, rivolta verso l'alto e di durata più lunga delle precedenti, origina dalle cellule dello strato pigmentato della retina.

Adattando l'occhio ad appropriati livelli di luminosità e manipolando adeguatamente la stimolazione luminosa, è possibile separare le componenti scotopiche e fotopiche dell'elettroretinogramma, dovute rispettivamente all'attività dei coni e dei bastoncelli.

Il tracciato tipico è rappresentato da un'onda multifasica (Fig. 22/1), la cui forma dipende dal contributo di diversi componenti retinici, che può essere più o meno prominente. Le principali componenti del tracciato sono rappresentate da onde chiamate a, b e c; allo spegnimento dello stimolo può essere associata un'ulteriore onda, la d. La componente più precoce insorge virtualmente senza latenza in concomitanza con la isomerizzazione dei fotopigmenti nella parte distale dei recettori, ed è chiamata, quindi, potenziale precoce di recettore (ERP, early receptor potential). Questa componente è molto piccola ed è possibile registrarla solo con stimoli molto intensi. Segue l'onda a, piccola, di breve durata e rivolta verso il basso, il cui fronte iniziale dipende dall'attivazione della parte prossimale dei recettori. L'onda b, ampia e rivolta verso l'alto, si ritiene venga prodotta prevalentemente dalle cellule di Muller, che attraversano a tutto spessore la retina. Le cellule di Muller producono i loro segnali in risposta alla liberazione degli ioni potassio, principalmente negli strati plessiformi interno ed esterno, in risposta alla stimolazione visiva. I picchi di questi potenziali sono stati

## VIE VISIVE CENTRALI

Oltre alla qualità centro-on e centro-off, le cellule gangliari della retina vengono distinte, per quanto riguarda altre caratteristiche anatomico-funzionali, in cellule X, Y e W. Le cellule X, corrispondenti al tipo anatomico b, hanno corpi cellulari di piccole dimensioni e piccoli campi dendritici. Piccoli sono pure i campi recettivi e lenta la velocità di conduzione dei loro assoni. Queste cellule vengono considerate l'origine di un sistema deputato alla alta risoluzione dei dettagli.

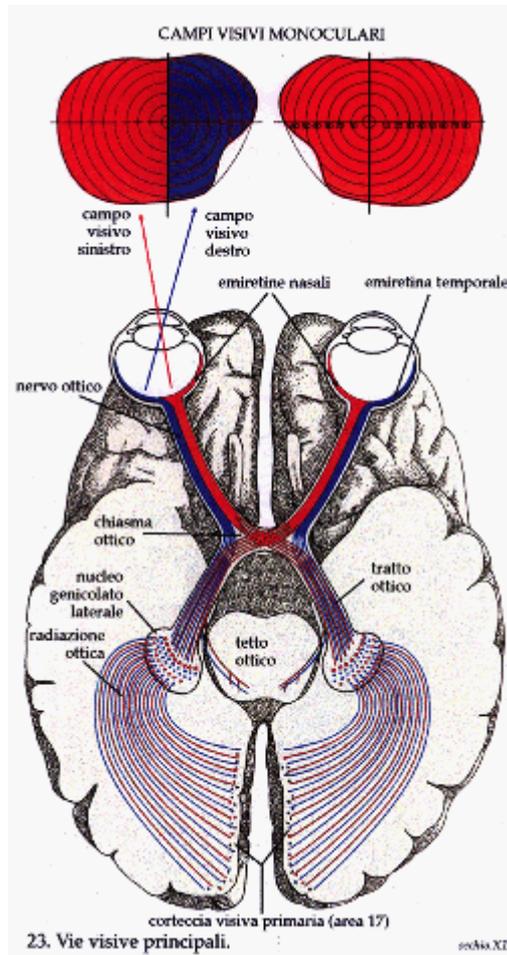


Fig. 23.

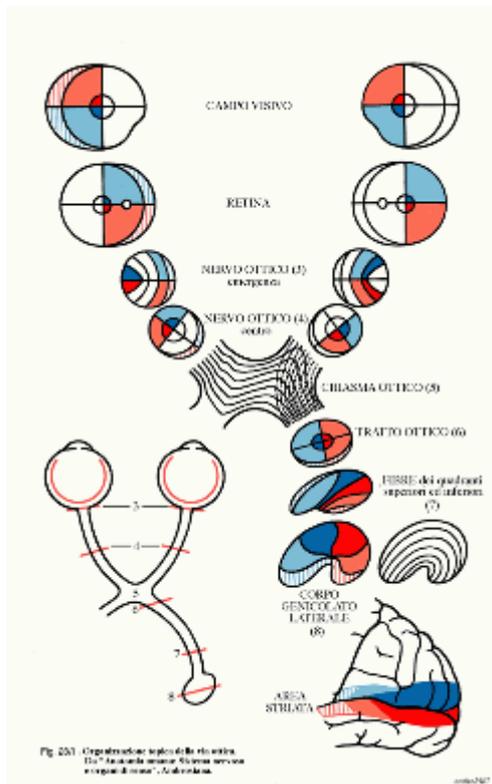


Fig. 23/1.

primati. Inoltre, molte cellule gangliari, dette ad antagonismo spettrale, sono caratterizzate da campi recettivi con zone antagoniste per differenti lunghezze d'onda. Alcune per esempio sono eccitate da una luce rossa presentata sul centro del campo recettivo e inibite se la periferia del campo è illuminata da luce verde. Altre si comportano in maniera reciproca. Altre ancora rispondono in maniera analoga ma per le coppie di colori giallo-blu.

La funzione principale della retina del primate sembra dunque quella della codificazione del campo visivo in campi recettivi antagonisti.

Il flusso di informazioni, così parzialmente elaborato dalla retina, viene convogliato ai centri nervosi superiori (Fig. 23).

Le cellule Y, corrispondenti al tipo morfologico a, hanno i corpi cellulari più grandi e ampie arborizzazioni dendritiche, con assoni a rapida velocità di conduzione. Questi neuroni, che rispondono solo a stimoli di grandi dimensioni e che si muovono ad alte velocità, vengono ritenuti gli elementi di origine del sistema devoluto all'analisi del movimento degli oggetti.

Le cellule W, corrispondenti al tipo morfologico g, hanno caratteristiche intermedie fra le precedenti (piccolo corpo ed estesa arborizzazione), ma la loro presenza, dimostrata nel gatto, non è stata confermata nei

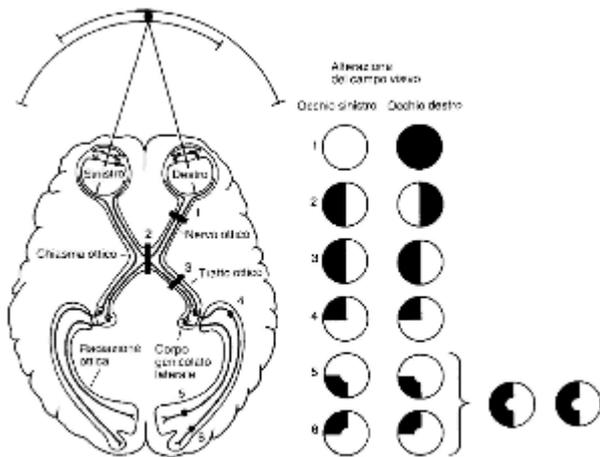


Fig. 23/2 Effetti sui campi visivi monoculari (a destra) di lesioni lungo la via visiva (a sinistra). Da "Principi di Neuroscienze" Ambrosiana.

Fig. 23/2

(tetto ottico) nucleo genicolato laterale, pulvinar, reticolare troncoencefalica ed ipotalamo. Solo delle prime tre strutture verrà detto nel seguito.

### VIA RETINO-PRETETTILE

Se si indirizza un fascio di luce in un solo occhio, si ottiene sia la costrizione della pupilla dello stesso occhio (risposta diretta), che quella della pupilla dell'altro occhio (risposta consensuale). I riflessi pupillari alla luce sono mediati dai neuroni gangliari della retina che rispondono alle variazioni della luminosità globale. Queste cellule gangliari proiettano alla regione pretettale, localizzata appena rostralmente al collicolo superiore. Le cellule dell'area pretettale proiettano bilateralmente ai neuroni pregangliari parasimpatici del nucleo di Edinger-Westphal (o nucleo oculomotore accessorio), che sono situati in una zona immediatamente adiacente a quella dei motoneuroni somatici del nervo oculomotore. Gli assoni delle cellule pregangliari, seguendo il nervo oculomotore, prendono contatto sinaptico nel ganglio ciliare, da dove originano le fibre postgangliari che si portano alla muscolatura dello sfintere dell'iride (cfr. Figg. 12 e 18). Il riflesso pupillare ha notevole interesse clinico, in quanto, a seconda o meno della presenza della risposta consensuale di un occhio e dell'altro, si può inferire se la branca afferente (nervo ottico) o quella efferente (nervo oculomotore) di un lato o dell'altro siano danneggiate o meno.

### VIA RETINO-TETTILE

Una parte delle fibre del nervo ottico si porta anche al collicolo superiore (Fig. 23).

Il collicolo superiore coordina le informazioni visive, somatiche ed uditive orientando i movimenti del capo e degli occhi verso la sorgente di uno stimolo. Nei sette strati che costituiscono il collicolo superiore, infatti, sono rappresentate tre mappe sensitive: una visiva, una somestesica della superficie corporea ed una della localizzazione spaziale dei suoni, più una mappa motoria. La rappresentazione spaziale delle strutture periferiche, in ciascuna mappa sensoriale, è allineata con quella delle altre mappe. Per esempio, i neuroni della mappa visiva, superficiale, che ricevono informazioni dal campo visivo temporale contralaterale, sono localizzati esattamente al di sopra dei neuroni della mappa uditiva, più profonda, che ricevono informazioni dalla corrispondente regione contralaterale dello spazio uditivo; analogamente, i neuroni della regione corrispondente della mappa somatica, in registro con i precedenti, ricevono informazioni dalla parte contralaterale del corpo. In tal modo, le informazioni relative alla localizzazione di uno stimolo, rispetto a una particolare regione del corpo, vanno a confluire nella stessa zona del collicolo superiore. Le tre mappe sensoriali sono infine connesse con una mappa motoria localizzata negli strati più profondi del collicolo superiore, cosicché il collicolo è in grado di utilizzare le informazioni sensitive per controllare i movimenti oculari saccadici dell'occhio, che orientano lo sguardo verso lo stimolo, di qualsiasi natura esso sia. Questa funzione è svolta dal collicolo superiore in collaborazione con i campi oculari frontali della corteccia cerebrale (area 8), che ne rappresentano una sorta di encefalizzazione. Il collicolo superiore proietta alle zone del tronco dell'encefalo che controllano i movimenti oculari, al midollo spinale per i movimenti del capo e del collo ed al cervelletto, per realizzare una migliore coordinazione dei movimenti degli occhi e della testa.

La conoscenza dell'origine nasale o temporale, destra o sinistra, delle fibre del nervo ottico, nel chiasma, nel tratto ottico e nella corteccia cerebrale riveste importanza clinica quando si voglia risalire alla sede di una lesione cerebrale sulla base delle anomalie riscontrate nel campo visivo del soggetto (Figg. 23/1, 23/2).

Ciascuna retina trasmette il prodotto della propria elaborazione tramite un canale fisicamente costituito da un fascetto di un milione e 200.000 fibre mieliniche, il nervo ottico, organizzate in modo da mantenere la contiguità di punti vicini sulla retina. Dopo circa 4 cm, queste fibre raggiungono il chiasma, dove avviene l'incrocciamento delle fibre provenienti dalla metà nasale di ciascuna retina. Passato il chiasma, l'informazione visiva viaggia nei tratti ottici, ciascuno dei quali conduce l'immagine proveniente dall'emisfero visivo contralaterale e la distribuisce ad almeno 6 diverse stazioni sottocorticali: nuclei pretettali, collicolo superiore

## VIA RETINO-GENICOLO-CORTICALE ED AREE CORTICALI VISIVE

Nel nucleo genicolato laterale si mantiene ancora un alto grado di retinotopia. La parte centrale del campo visivo è rappresentata posteriormente e centralmente, la parte periferica anteriormente, la metà inferiore

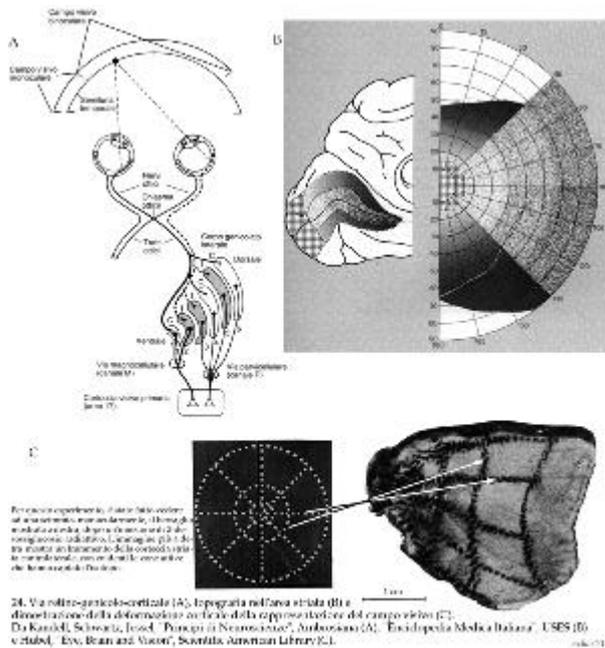


Figura 24

medialmente e dorsalmente, la metà superiore lateralmente e ventralmente. Oltre ad un preciso ordine retinotopico, nel genicolato laterale si trovano ancora anatomicamente separate alcune caratteristiche dell'informazione visiva, quali l'occhio da cui proviene l'impulso, nonché il tipo di cellula gangliare che gli ha dato origine. Delle 6 lamine cellulari sovrapposte, di cui è costituito il genicolato laterale (Fig. 24A), le lamine 1, 4 e 6 ricevono dalla retina nasale contralaterale e le lamine 2, 3 e 5 accolgono le fibre della retina temporale ipsilaterale, cosicché le due metà corrispondenti della retina di entrambi gli occhi sono sovrapposte in ordine quasi alternato nei vari strati, in maniera organizzata topograficamente. Di conseguenza, ciascuna lamina contiene una rappresentazione dell'emicampo visivo contralaterale in registro con le lamine contigue. Oltre a ciò, i due diversi tipi di cellule gangliari X e Y mandano le loro terminazioni preferenzialmente su lamine diverse del genicolato. Le Y terminano in gran parte nelle lamine 1 e 2, caratterizzate da cellule più grandi e dette perciò magnocellulari, le X sulle lamine da 3 a 6, dette parvocellulari per le dimensioni più piccole dei neuroni.

In aggiunta a questo, prove sperimentali suggeriscono che delle cellule ad antagonismo spettrale sensibili al rosso e al verde, le centro-on terminano prevalentemente negli strati 5 e 6, le centro-off contribuiscono soprattutto alle lamine 3 e 4. In sintesi, la sequenza della segregazione qualitativa degli stimoli nelle lamine del genicolato è la seguente:

lamina 1, magnocellulare: cellule Y, contralaterali;

lamina 2, magnocellulare: cellule Y, ipsilaterali;

lamina 3, parvocellulare: cellule X, centro-off, ipsilaterali;

lamina 4, parvocellulare: cellule X, centro-off, contralaterali;

lamina 5, parvocellulare: cellule X, centro-on, ipsilaterali;

lamina 6, parvocellulare: cellule X, centro-on, contralaterali.

Sul piano funzionale, i campi recettivi dei neuroni del genicolato sono molto simili a quelli delle cellule gangliari della retina, prevalentemente costituiti da zone antagoniste concentriche. Per questo, fra l'altro, il genicolato laterale è stato per molto tempo considerato un semplice nucleo di ritrasmissione della via retino-striata. Tuttavia, considerazioni anatomiche derivanti dalle afferenze che questo nucleo riceve sia dalla formazione reticolare e da nuclei talamici associativi, sia, in via discendente, dalla stessa corteccia visiva, insieme a considerazioni fisiologiche derivanti dalla conoscenza della sua microcircuitura, suggeriscono che esso sia un nucleo di integrazione del messaggio visivo. La sua probabile funzione sembrerebbe legata alla analisi del contrasto, a una qualche selezione attenta degli stimoli visivi, ovvero provvederebbe a regolare l'entità, e forse la temporizzazione, del flusso di informazioni verso la corteccia striata. La quasi totalità delle fibre provenienti dai neuroni del corpo genicolato terminano nella corteccia striata, l'area 17 di Brodmann, che nell'uomo si trova lungo i bordi della scissura calcarina. Le proiezioni genicolato-striate sono ancora organizzate secondo l'ordine retinotopico (Fig. 24B). Sull'area 17 di ciascun emisfero si trova rappresentato l'emicampo visivo contralaterale in maniera tale che se la scissura calcarina venisse

distesa, la corteccia striata apparirebbe come un settore circolare sul quale possono essere riportate le coordinate dell'emicampo visivo. La parte foveale e perifoveale è rappresentata in corrispondenza del polo occipitale, i settori periferici inferiori del campo visivo sulla superficie superiore del solco, i settori superiori sulla superficie inferiore. Se si suddivide idealmente il campo visivo in piccole parti uguali, ciascuna di esse viene rappresentata su una superficie corticale tanto più ampia quanto più è vicina alla fovea. L'inverso ovviamente avviene se si considera la rappresentazione corticale, nel senso che se la corteccia viene suddivisa idealmente in parti uguali, a ciascuna di esse corrisponderà una porzione di campo visivo tanto più grande quanto più lontano esso sarà dalla fovea. La rappresentazione distorta del campo visivo sulla corteccia striata (Fig. 24C) è un'espressione della diversa densità recettoriale e del diverso grado di convergenza dei recettori sulle cellule gangliari, fra centro e periferia della retina. Nella retina centrale, infatti, la densità recettoriale è più elevata ed il grado di convergenza sulle cellule gangliari è inferiore. Ciò fa sì che, a parità di estensione, la retina centrale sia dotata di un maggior numero di cellule gangliari rispetto alla retina periferica. Ciò si mantiene nel nervo ottico e lungo le vie visive e trova la sua manifestazione più eclatante a livello corticale, dove la rappresentazione delle parti centrali del campo visivo occupa una superficie proporzionalmente molto più grande di quella delle parti periferiche. Grazie a questo meccanismo, ed alle minor dimensioni dei campi recettivi centrali rispetto a quelli periferici, l'analisi del campo visivo centrale (fovea e parafovea) è più fine e complessa di quella a cui è soggetto il campo visivo periferico.

### Organizzazione laminare della corteccia visiva primaria

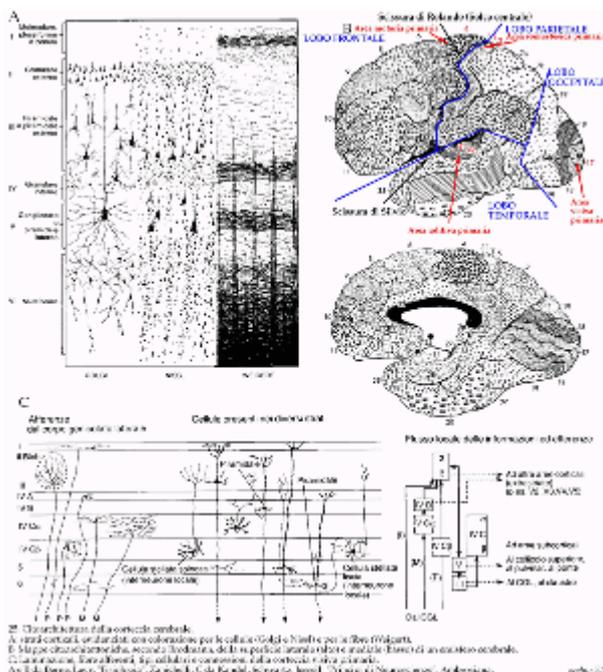


Fig. 25

Dal punto di vista istologico, la sostanza grigia che riveste gli emisferi cerebrali (corteccia cerebrale) è apparentemente uniforme, essendo costanti sia il suo spessore che i tipi cellulari che la compongono. Dal punto di vista quantitativo, però, si osservano, al microscopio, importanti variazioni, tali da poterla suddividere in aree distinte, dove alla differenziazione anatomica corrisponde puntualmente una diversità funzionale. Il principio fondamentale di tale suddivisione sta nel fatto che i neuroni corticali si distribuiscono in 6 strati, o lamine, sovrapposti e paralleli alla superficie cerebrale, che si diversificano fra loro per i tipi cellulari che vi prevalgono e per la maggiore o minore densità di fibre che vi si trovano (Fig. 25A).

Dalla superficie piale, esterna, verso la sostanza bianca, interna, si riconoscono:

1° strato, o molecolare o plessiforme: è il più superficiale, molto sottile, costituito da poche cellule e da una prevalenza di fibre tangenziali;

2° strato, o granulare esterno: costituito in prevalenza da piccole cellule piramidali;

3° strato, o piramidale esterno: costituito prevalentemente da cellule piramidali;

4° strato, o granulare interno: costituito prevalentemente da piccole cellule a corpo arrotondato, multipolari e con assone corto. Nell'area visiva primaria contiene una evidente striatura (stria di Gennari), che lo divide in approssimativamente in due, dovuta alle fibre afferenti dal nucleo genicolato laterale, per la quale quest'area è nota anche come area striata; è inoltre molto esteso ed è stato suddiviso in tre sottolamine, 4A, 4B e 4C, quest'ultima a sua volta suddivisa in 4Ca e 4Cb;

5° strato, o piramidale interno, costituito prevalentemente da cellule piramidali;

6° strato, o fusiforme: è il più profondo, costituito prevalentemente da grosse cellule prive di identità morfologica, prevalentemente uniformi.

Da un punto di vista operativo, le 6 lamine corticali possono essere raggruppate in 3 zone, funzionalmente diverse: strati sopragranulari, strato granulare e strati infragranulari, con riferimento al 4° strato. Gli strati

sopragranulari sono deputati prevalentemente alle connessioni cortico-corticali: il 3° strato è prevalentemente efferente, il 2° prevalentemente afferente. Lo strato granulare è lo strato che riceve fibre da strutture sottocorticali, prevalentemente i nuclei del talamo e, per questo motivo, è molto sviluppato in tutte le aree sensitive primarie. Gli strati infragranulari sono prevalentemente efferenti, e gli assoni che vi si originano si portano a strutture diverse dalla corteccia cerebrale; sono massimamente sviluppati nelle aree motorie.

Come già riferito, i 6 strati, pur essendo sempre presenti in quasi tutto il mantello corticale (hanno struttura diversa parti relativamente piccole, di diversa origine filogenetica), hanno uno spessore relativo diverso, a spese l'uno dell'altro. Il diverso spessore dei singoli strati è alla base della classificazione citoarchitettonica di Brodmann, fatta agli inizi del secolo e tutt'ora largamente utilizzata ([Fig. 25B](#)). Questo neurologo tedesco, sezionando consecutivamente tutta la corteccia cerebrale, assegnava un numero progressivo ad una zona corticale ogni qual volta lo spessore di uno o più strati cambiava sensibilmente. In tal modo, l'area visiva primaria ha preso il numero 17 e le aree visive che la circondano in modo quasi concentrico, dette associative, 18 e 19. L'area visiva primaria, detta anche V1, è situata nel lobo occipitale, sui due bordi della scissura calcarina, un solco situato su un piano quasi orizzontale, meglio visibile sulla superficie mediale degli emisferi; nei primati è riconoscibile, in sezione, ad occhio nudo, per l'evidente stria di Gennari che divide in due il 4° strato. E' l'area corticale a più elevato contenuto cellulare e la sua laminazione è schematizzata nella [Fig. 25C](#). Dei neuroni che compongono l'area striata, circa il 90% ha le superfici dei dendriti e degli assoni ricche di spine sinaptiche e un'azione prevalentemente eccitatoria, la restante parte ha superfici lisce ed azione prevalentemente inibitoria. Mentre questi ultimi presentano una notevole multiformità morfologica, quelli ricchi di spine dendritiche si presentano soprattutto in due grosse categorie anatomiche: i neuroni stellati e quelli piramidali. Le cellule stellate si trovano principalmente nella lamina 4, mentre le piramidali si trovano distribuite in tutte le altre lamine.

Le fibre provenienti rispettivamente dalle zone parvocellulari e magnocellulari del genicolato laterale arrivano in zone di terminazione separate, l'input dalle lamine parvocellulari si distribuisce alle lamine 4Cb e 4A, con un contributo modesto alla parte superiore dello strato 6. Le fibre provenienti dallo strato magnocellulare si distribuiscono principalmente alla lamina 4Ca, con sparse proiezioni alla parte inferiore della lamina 6. Le successive connessioni tra i vari strati di corteccia, apparentemente casuali, sono più ordinate di quanto non appaia a prima vista. Gli strati 4 e 6, che fanno da strati recettivi, oltre ad essere interconnessi tra di essi e con le porzioni di genicolato laterale dalle quali ricevono le afferenze, mandano i loro assoni agli strati sopra e sotto granulari, che si comportano da strati di più alta integrazione. Così se si considera il flusso di impulsi del sistema X-parvocellulare, si vede che gli strati 4 e 6 inviano i loro assoni alle lamine 2-3 e 5A. Lo strato 5A poi, che riceve terminazioni, in piccola quantità, anche dal 4Ca, manda anch'esso i suoi assoni agli strati 2-3, i quali ricevono afferenze anche dal pulvinar.

Dalle lamine 2-3 i segnali vengono convogliati alle aree peristriate 18 e 19, nonché, tramite la sottolamina 5B, al collicolo superiore e al pulvinar.

Le afferenze provenienti dal sistema Y-magnocellulare, dalle sottolamine 4Ca e dalla parte profonda della lamina 6 convergono sulla sottolamina 4B, i cui assoni efferenti terminano nelle aree visive del solco temporale superiore (STS), principalmente nell'area V5 (o MT), considerata come probabile sede dell'analisi del movimento degli oggetti nello spazio. Tale area, la quale riceve afferenze anche dalla parte bassa della lamina 6, è connessa reciprocamente con la sottolamina 4B.

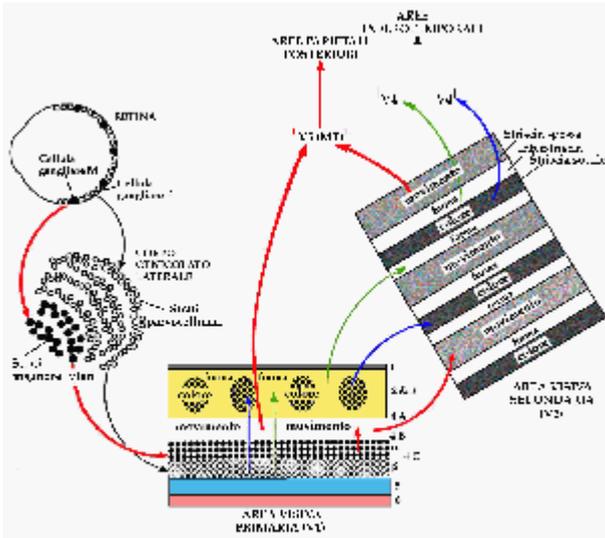


Fig. 25/1. Rappresentazione schematica delle vie visive da retina all'area visiva primaria e alle aree visive superiori. In alto a sinistra, la retina; in alto a destra, l'area visiva primaria; in basso, l'area visiva superiore. Le frecce indicano le direzioni delle proiezioni. (Modificato da L. Montemini e G. Basso, 1988)

Fig. 25/1

La presenza di spigoli, ecc.: è il caso delle cellule ipercomplesse.

La distribuzione di questi gruppi funzionali è disuniforme nei vari strati: la considerazione anatomico-fisiologica che se ne ricava è che lungo lo spessore della corteccia avvengono delle modificazioni delle caratteristiche funzionali dei campi recettivi dei neuroni e che queste caratteristiche vengano determinate dalle connessioni intrinseche tra le varie lamine.

**Organizzazione colonnare dell'area visiva primaria.**

Alla riferita organizzazione verticale si aggiunge una ordinata organizzazione orizzontale. Durante una penetrazione perpendicolare alla superficie corticale, un microelettrodo registra l'attività di neuroni con uguale dominanza oculare (la caratteristica di uno stesso neurone di dare risposte eccitatorie maggiori alla stimolazione di un occhio rispetto all'altro). In penetrazioni oblique, invece, la dominanza oculare di neuroni o gruppi di neuroni successivi si alterna tra occhio destro e sinistro. Si è immaginato, quindi, che la proprietà della dominanza oculare fosse organizzata in colonne, o cilindretti di corteccia, del diametro di circa mezzo millimetro. Tutti i neuroni di una colonna avrebbero il campo recettivo nella stessa posizione dello spazio e risponderebbero in modo diverso solo alle diverse caratteristiche di uno stimolo visivo che vi fosse presentato dentro. La teoria delle colonne, che ha visto nell'organizzazione della corteccia visiva le migliori conferme, è di fatto estesa a tutta la corteccia cerebrale.

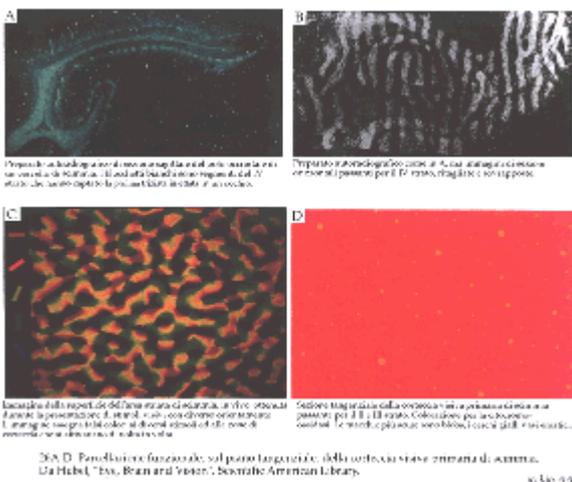


Fig. 26

rispetto a quelli vicini. In altri termini, neuroni incolonnati verticalmente nello spessore della corteccia striata

Il suesposto schema porta a due considerazioni (Fig. 25/1):

- 1) le afferenze corticali di tipo X-parvocellulare e Y-magnocellulare tendono a mantenersi separate, seppure interagiscano in qualche punto;
  - 2) all'interno di ciascuno dei due sistemi esiste un alto grado di interazione tra i vari strati corticali e tra gli strati corticali e altre aree o nuclei del sistema visivo.
- La controparte funzionale di questa organizzazione risiede nella struttura dei campi recettivi delle cellule della corteccia striata, che hanno di solito forma allungata, spesso con un orientamento preferito dell'asse maggiore. Possono essere costituiti da zone antagoniste contigue, dimostrabili con la stimolazione stazionaria di porzioni più piccole del campo stesso, come nel caso delle cellule semplici, oppure i neuroni possono dare risposte imprevedibili a tale stimolazione distrettuale del loro campo recettivo ed essere eccitati solo da stimoli in movimento, come nel caso delle cellule complesse. Infine, altri neuroni possono essere specificamente sensibili a caratteristiche ancora più complesse dello stimolo, quali la lunghezza di esso o la

condividono lo stesso caratteristico orientamento del campo recettivo, e tutti gli orientamenti sono rappresentati ciclicamente nel giro di un certo numero di colonne contigue. La tecnica anatomo-metabolica del 2-desossiglucosio e tecniche ancora più avanzate di colorazione in vivo hanno mostrato che le zone di corteccia più attive per stimoli con uno stesso orientamento formano anch'esse lamine perpendicolari alla superficie corticale, variamente distribuite ed interdigitate ([Fig. 26C](#)).

La colorazione della corteccia con il metodo per la citocromo-ossidasi, un enzima metabolico dei mitocondri la cui concentrazione varia in dipendenza dell'attività di alcuni neuroni, ha mostrato l'esistenza di un ulteriore sistema anatomo-funzionale nella corteccia visiva, diverso da quelli descritti prima. Gruppi di neuroni colorati con questo metodo formano "macchie" (blobs) di corteccia che interessano gli strati 2 - 3 e 5 - 6, disposte in ordine regolare sulla superficie corticale a intervalli di circa mezzo millimetro, e centrate sulle lamine di dominanza oculare ([Fig. 26D](#)). I neuroni di queste particolari zone hanno campi recettivi privi di orientamento specifico, sono organizzati secondo il modello centro-periferia e molti di essi sono attivati in maniera specifica da contrasti di colore. Inoltre, le proiezioni intracorticali, all'interno della stessa area, di tali zone ricche di citocromo-ossidasi sono più frequentemente dirette ad altre zone analoghe, rispetto a quelle delle zone circostanti, povere di citocromo-ossidasi (interblobs).

Questa organizzazione morfo-funzionale dell'area striata porta a un modello di funzionamento della corteccia visiva che vede come modulo elementare l'ipercolonna, un "cubetto" di corteccia delle dimensioni di circa 500 micron di lato, contenente circa 250.000 neuroni, nel quale si trovano due lamine di dominanza oculare (ipsilaterale e contralaterale), che incrociano trasversalmente una serie di lamine di orientamento, comprendenti un intero ciclo di 180°, e un certo numero di zone ricche di citocromo-ossidasi. Si ipotizza che in questo modulo una piccola porzione di spazio visivo venga "analizzata" in alcune delle possibili qualità dell'immagine visiva. Per esempio, il contrasto luminoso e quindi il rilevamento dei contorni può essere codificato lungo la direzione verticale, in virtù dei vari tipi di campi recettivi distribuiti lungo lo spessore della corteccia. Le caratteristiche topografiche, posizione nell'ipercampo e tridimensionalità, possono essere analizzate in una delle direzioni orizzontali, in virtù del leggero spostamento spaziale dei campi recettivi, che si registra lungo questa direzione, in ciascuna colonna di dominanza oculare. L'orientamento può essere rappresentato anch'esso lungo il piano orizzontale, a carico delle colonne specifiche per questa qualità. Il contrasto cromatico può trovar sede nelle zone ricche di citocromo-ossidasi. Il tutto forma una matrice multidimensionale di neuroni e connessioni che agisce come unità funzionale. Dall'interazione dei singoli gruppi di elementi di questa matrice che vengono attivati dagli stimoli con le loro caratteristiche di contrasto, posizione, orientamento e colore, si formerebbero dei nuclei di attività che sarebbero responsabili dell'estrazione dell'informazione visiva dal flusso di luce riflesso da ciascuna regione dello spazio visivo.

Le ipercolonne sarebbero poi connesse tra di loro in senso orizzontale, formando un livello superiore di integrazione, sempre più grande.

### **ELABORAZIONE DELL'INFORMAZIONE VISIVA OLTRE L'AREA STRIATA**

Un ulteriore livello di analisi è quello che avviene molto probabilmente nelle altre aree visive "non striate". Brodmann, nel 1909, distingueva 3 aree visive, la 17, la 18 e la 19. Oggi, nel macaco, sono state trovate una ventina di aree corticali facenti parte del sistema visivo e distribuite a ricoprire la quasi totalità dei lobi occipitale, parietale e temporale. Tutte queste zone, per dare risposte elettrofisiologiche specifiche a stimoli visivi, per essere connesse anatomicamente direttamente o indirettamente con l'area visiva primaria e/o con nuclei visivi sottocorticali, per avere una più o meno completa rappresentazione retinotopica, sono considerate aree corticali visive individuali. Esse mostrano alcuni comuni principi organizzativi:

- 1) le connessioni tra di esse e con altri centri visivi sono generalmente reciproche;
- 2) le terminazioni degli assoni afferenti e i corpi cellulari dei neuroni efferenti, hanno una caratteristica distribuzione tra le varie lamine corticali.

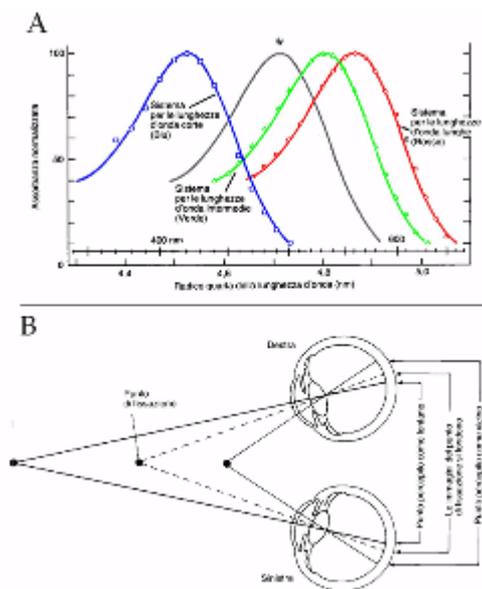
Tuttavia, le caratteristiche funzionali dei neuroni di tali aree, almeno di quelle meglio conosciute, sembrano essere diverse tra di esse e diverse da quelle della corteccia visiva primaria. I neuroni dell'area V5, ad esempio, sembrano specificamente sensibili alla direzione e alla velocità degli stimoli luminosi, indipendentemente dalla loro forma e dal loro colore, quelli della V4 sarebbero correlati con alcune

caratteristiche cromatiche, quelle della V2 alla capacità di ricostruire bordi nascosti, quelli della IT a stimoli dalle forme più complesse (mano, facce). Di altre non si sa ancora che poco.

Il modello funzionale suggerito è quello che ciascuna area sia specializzata nell'analisi di una o più qualità dello stimolo visivo. Resta dibattuta la questione se tale analisi avvenga in maniera gerarchicamente organizzata, nel senso che ciascuna area si troverebbe inserita in un circuito in serie, nel quale elaborerebbe il prodotto delle aree gerarchicamente inferiori, o se ciascuna di esse lavori in parallelo, analizzando, separatamente dalle altre, una o più qualità dello stimolo e ridistribuendo il risultato di tale elaborazione, con un processo detto di integrazione a più livelli ("multistage integration"). La variazione graduale di alcune caratteristiche funzionalmente significative, quale l'incremento delle dimensioni dei campi recettivi, man mano che ci si sposta dalla V1 all'area 8, sede dei campi oculari frontali, lascerebbe pensare ad una organizzazione gerarchica; d'altro canto, le fitte e reciproche interconnessioni tra quasi tutte le aree, che diventano ancora più intricate se si considerano le connessioni reciproche con i centri sottocorticali, suggerirebbero un funzionamento in parallelo. In realtà, le informazioni oggi disponibili sono ancora frammentarie e insufficienti per suffragare una qualunque ipotesi sulle eventuali specializzazioni funzionali di queste aree e sui loro possibili meccanismi d'azione nella sintesi percettiva del campo visivo.

## VISIONE DEI COLORI

L'occhio umano è sensibile alle onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda fra 400 e 700 nm (Fig. 27), che quindi compongono la "luce" visibile. In questo ambito, lunghezze d'onda diverse vengono interpretate come colori diversi, con una lenta variazione dal blu, al verde, al rosso, man mano che la lunghezza d'onda aumenta. Le persone che hanno una visione normale dei colori sono in grado di riconoscere miscele di radiazioni luminose di qualsiasi lunghezza d'onda, combinando in tre proporzioni opportune tre colori primari: il blu, il verde ed il rosso. Questa proprietà della visione dei colori, detta tricromia, dipende dalla presenza nella retina di tre tipi distinti di coni, ognuno dei quali possiede un pigmento visivo diverso. I tre pigmenti visivi si differenziano per la loro parte proteica e non per il cromoforo, che è sempre il retinale. La diversa conformazione proteica (cfr. Fig. 20D) "filtra" la luce differenzialmente, facendo sì che solo certe lunghezze d'onda e non altre possano essere assorbite dal cromoforo, innestando così la catena della fototrasduzione. Ciascuno dei tre pigmenti ha uno spettro di assorbimento particolare, anche se ampiamente sovrapposto a quello degli altri tipi. Un tipo di pigmento è particolarmente sensibile alle lunghezze d'onda più corte dello spettro visibile e contribuisce notevolmente alla percezione del blu (viene anche chiamato pigmento C, per onde corte, o B per blu). Un altro tipo di pigmento è particolarmente sensibile alle lunghezze d'onda medie e contribuisce notevolmente alla percezione del verde (viene detto M o V).



28. A: spettri di assorbimento dei tre tipi di coni e dei bastoncelli (astinisci) nella retina umana. B: meccanismo della stereopsi primaria. Da Kandel, Schwartz, Jessell, *Principi di Neuroscienze*, Ambrosiana.

Fig. 28

Il riconoscimento dei colori richiede la presenza di almeno due tipi di fotorecettori con sensibilità spettrale diversa. Un sistema di questo tipo, detto divariante, è in grado di fornire due valori diversi di luminosità per ciascun oggetto: paragonando i due valori, il sistema nervoso riesce a distinguere i colori. Se, ad esempio, un oggetto riflette prevalentemente la luce di lunghezza d'onda elevata, la risposta

Il terzo pigmento assorbe preferenzialmente le lunghezze d'onda più lunghe ed è soprattutto responsabile della percezione del rosso (viene detto L o R) (Fig. 28A).

Alcuni soggetti portatori di difetti genetici possiedono soltanto due pigmenti (dicromatopsia), mentre altri ne hanno soltanto uno (monocromatopsia); in quest'ultimo caso, la interpretazione dei colori è impossibile, e la visione è simile a quella delle persone normali, ma in condizione di scarsa illuminazione, quando la visione si basa esclusivamente sull'attività dei bastoncelli. I singoli coni non sono in grado di trasmettere informazioni relative alla lunghezza d'onda degli stimoli luminosi. Quando un cono assorbe un fotone, la risposta elettrica che ne deriva è sempre la stessa, quale che sia la lunghezza d'onda del fotone. Ciò è dovuto al fatto che l'assorbimento della luce dà inizio alla isomerizzazione del cromoforo, il retinale, e questo cambio di conformazione, di tipo tutto-o-nulla, della molecola del retinale e la successiva catena di eventi che mette capo alla trasduzione dello stimolo luminoso, sono esattamente gli stessi, indipendentemente dalla lunghezza d'onda del fotone (cfr. Fig. 20C).

Il riconoscimento dei colori richiede la presenza di almeno due tipi di fotorecettori con sensibilità spettrale diversa. Un sistema di questo tipo, detto divariante, è in grado di fornire due valori

del sistema di coni sensibile alle lunghezze d'onda più lunghe darà una risposta maggiore di quella dell'altro sistema ed i centri superiori interpreteranno questo messaggio suggerendo che l'oggetto osservato sia giallo o rosso. Se, invece, l'oggetto riflette in particolar modo le lunghezze d'onda più corte, la risposta del sistema di coni maggiormente sensibile alle lunghezze d'onda più brevi sarà maggiore, e l'oggetto sarà visto come blu o verde. Se poi l'oggetto riflettesse in egual misura sia le lunghezze d'onda lunghe che quelle corte, l'oggetto sarebbe visto come bianco, grigio o nero a seconda della luminosità del suo sfondo. A livello della fovea, il sistema sensibile alle lunghezze d'onda corte non esiste, perciò qui la visione dei colori è divariante. Intorno alla fovea, il sistema diventa trivariante. La visione dei colori, quindi ed evidentemente, non viene impiegata per distinguere i fini dettagli spaziali delle immagini.

La teoria tricromatica attribuisce la visione dei colori all'attività dei tre tipi principali di coni, ma non spiega, di per sé, tre importanti aspetti della percezione dei colori, che sono l'opponenza cromatica, il contrasto simultaneo e la costanza dei colori.

La teoria della opponenza cromatica prevede che i tre colori primari si distribuiscano in tre coppie di colori antagoniste (ed opposte): rosso-verde, giallo-blu e bianco-nero. Le tre coppie di colori sono effettivamente rappresentate, nella retina e nelle successive vie visive, da neuroni eccitati da un colore della coppia ed inibiti dall'altro. Ciò spiega come certe combinazioni di colori tendano a cancellarsi l'un l'altro, in modo tale che certi abbinamenti non possano mai venir percepiti; non esistono, infatti, il verde-rossastro od il giallo-bluastro, mentre sono invece percepibili il rosso-bluastro (magenta), il giallo-rossastro (arancio) o il verde-bluastro (viola). La luce rossa e quella verde possono venir mescolate in modo tale che ogni traccia del rosso e del verde scompaiano e si percepisca un giallo puro; analogamente si può fare col giallo ed il blu, ed avere una percezione di bianco puro.

Il fenomeno del contrasto cromatico simultaneo si osserva a livello dei margini della sagoma di un oggetto, piuttosto che al suo interno, come nell'opponenza cromatica. Un oggetto grigio, ad esempio, visto su uno sfondo rosso acquista una sfumatura di verde; se invece è visto su uno sfondo verde, acquista una sfumatura di rosso. In queste condizioni, i colori delle tre coppie rosso-verde, giallo-blu e bianco-nero si facilitano reciprocamente, anziché antagonizzarsi. A livello della corteccia visiva sono stati trovati neuroni le cui risposte alla stimolazione cromatica mimano l'esperienza percettiva del contrasto simultaneo. La costanza dei colori è la terza proprietà importante della visione cromatica. La miscela di lunghezze d'onda che viene riflessa dagli oggetti non è determinata soltanto dalla loro riflettanza, ma anche dalla natura delle lunghezze d'onda della luce che li illumina. Quando la composizione della luce incidente varia, i meccanismi che presiedono alla visione dei colori compensano queste variazioni, cosicché il colore degli oggetti sembra sempre lo stesso. Per esempio, un limone è giallo sia alla luce del sole, che è biancastra, che alla luce di una lampada a filamento di tungsteno, che è rossastra, o alla luce fluorescente, che è bluastro. Questa proprietà della visione dei colori è detta costanza dei colori, e dipende in gran parte dall'analisi che il sistema visivo opera nei confronti non solo di un oggetto, ma anche del suo sfondo, o comunque di ciò che lo circonda. A parità di illuminazione, infatti, sfondi di diverso colore possono conferire ad uno stesso oggetto sfumature cromatiche diverse.

Nella retina e nel nucleo genicolato laterale i colori sono codificati da cellule ad opponenza cromatica semplice. Nella corteccia cerebrale, l'informazione relativa ai colori viene elaborata nei blob, dove le caratteristiche di scarica dei singoli neuroni possono spiegare sia l'antagonismo fra i colori che il loro contrasto e la loro costanza.

Le informazioni relative ai colori vengono elaborate in una via nervosa particolare, separata da quelle che riguardano le forme ed il movimento. Le informazioni sui colori vengono analizzate dal sistema parvicellulare-blob, che si estende dal genicolato laterale fino all'area corticale V4, il cui analogo, nell'uomo, si troverebbe nei giri linguale e fusiforme, anteriormente e ventralmente rispetto alla scissura calcarina.

## **STEREOPSI**

Uno dei principali compiti del sistema visivo, essenziali per l'interazione dell'individuo con l'ambiente, è quello di conferire alle immagini visive bidimensionali una valenza tridimensionale. Si ritiene che il passaggio dalla visione a due dimensioni a quella tridimensionale si basi su due tipi di elementi di valutazione: elementi stereoscopici basati sulla binocularità ed elementi monoculari relativi alla profondità di campo. La visione stereoscopica si basa sul confronto delle immagini retiniche dei due occhi, ed è efficace fino ad una distanza di circa 30 metri, oltre la quale le immagini retiniche dei due occhi sono praticamente identiche. Quando si fissa un oggetto, l'immagine del punto di fissazione va a cadere, in ciascun occhio, sulla fovea,

grazie ai movimenti di vergenza. Siccome, però, gli occhi distano circa 6 cm l'uno dall'altro, ogni oggetto che sia più vicino o più lontano rispetto al punto di fissazione proietta la propria immagine ad una certa distanza dalla fovea. In particolare, gli oggetti più vicini proiettano la propria immagine su punti della retina più distanti in senso orizzontale; gli oggetti più lontani la proiettano su punti della retina più vicini ([Fig. 28B](#)). In altri termini, tanto più un oggetto è vicino all'osservatore, rispetto ad un punto di fissazione più lontano, tanto più le sue immagini si formeranno, su ogni occhio, esternamente rispetto alla fovea. La distanza fra immagini del punto fissato ed immagini dell'altro punto prende il nome di disparità retinica. Questo fenomeno è apprezzabile anche soggettivamente. Se si fissa un oggetto posto ad una certa distanza (1-2 metri, ad esempio), tutte le immagini degli oggetti più vicini e più lontani rispetto a quello fissato appaiono sdoppiate. Il sistema visivo è in grado di calcolare tale disparità e di assegnare, quindi, un senso di maggiore o minore profondità agli oggetti dello spazio visivo.

La visione stereoscopica non origina nella retina o nel corpo genicolato laterale, ma si forma a livello della corteccia striata, o a livelli ancora più elevati, dove vengono combinati i segnali provenienti dai due occhi. L'esistenza di neuroni sensibili alla disparità retinica è stata messa in evidenza un po' in tutta la via magnocellulare: in V1, nelle strisce spesse di V2 (evidenziabili, al posto dei blobs, con le reazioni per la citocromossidasi) ed in V5 (MT).

Quanto finora descritto prende il nome di stereopsi primaria, mentre per stereopsi secondaria si intende un insieme di meccanismi che, per via monoculare, sono in grado comunque di dare informazioni sulla profondità degli oggetti nello spazio visivo. La stereopsi secondaria è operativa, da sola, oltre i 30 metri di distanza dall'osservatore, in quanto oltre questa distanza si diventa praticamente monoculari (le immagini retiniche dei due occhi sono essenzialmente identiche), ed in associazione con la stereopsi primaria a distanze inferiori. Gli elementi monoculari di valutazione della profondità di campo, sono essenzialmente cinque, e sono gli stessi utilizzati per valutare la profondità in un'immagine bidimensionale, come una cartolina, un disegno od una ripresa cinematografica o televisiva:

- familiarità con l'oggetto. Se si conoscono le dimensioni di un oggetto, se ne può valutare la distanza;
- interposizione. Se un'immagine è parzialmente coperta da un'altra, la seconda è più vicina della prima;
- prospettiva lineare. Le linee parallele, come quelle dei binari, tendono a convergere con la distanza; tanto maggiore è la convergenza, tanto maggiore è la distanza degli oggetti nella regione della convergenza stessa;
- distribuzione delle ombre e della illuminazione. Le macchie di colore più luminose tendono ad essere viste come più vicine (effetto "chiaroscuro" dei pittori);
- movimento di parallasse. Se si muove la testa o il corpo da una parte all'altra, le immagini degli oggetti presenti nel campo visivo si muovono sulla retina. Gli oggetti più vicini sembrano muoversi più velocemente ed in senso inverso ai nostri movimenti, gli oggetti più lontani sembrano muoversi più lentamente.

## APPROFONDIMENTI

### UMORE ACQUEO: PRODUZIONE E DEFLUSSO

#### ANATOMIA DELLA ZONA DI PRODUZIONE DELL'UMORE ACQUEO

La zona di produzione dell'umor acqueo è costituita dai processi ciliari. Sono circa 70, costituiti da creste lamellari inserite nella faccia interna del corpo ciliare. Nella struttura dei processi ciliari si distingue l'epitelio e lo stroma.

#### Epitelio Ciliare

È suddiviso in due strati monocellulari (interno ed esterno) affrontati reciprocamente per la parte apicale. Si comporta come un'unità funzionale e viene chiamato sincizio epiteliale ciliare.

*Strato interno o epitelio non pigmentato.* Contiguo alla camera posteriore, dalla quale lo divide una membrana basale (membrana limitante interna), è costituito da cellule chiare. Tali cellule presentano un nucleo ovale, numerosi mitocondri, apparati di Golgi, lisosomi. In particolare sono dotate di una propria membrana di rivestimento provvista di giunzioni con le cellule contigue e, soprattutto, di numerose invaginazioni, profonde ed irregolari (betacitomebrane) che provocano un aumento della sua superficie.

*Strato esterno o epitelio pigmentato.* Contiguo allo stroma ciliare, è costituito da cellule pigmentate, di aspetto pavimentoso. Il pigmento, in granuli, è presente soprattutto nella parte esterna del protoplasma

#### Stroma Ciliare

È composto da tessuto connettivo contenente fibre collagene, fibre elastiche, elementi cellulari (melanociti e fibrociti) e da una rete vascolare assai sviluppata, soprattutto in prossimità dello strato epiteliale dove dà luogo ad una fittissima trama di capillari di considerevole superficie. Questi vasi tuttavia non entrano in contatto diretto con l'epitelio ciliare: tra le due formazioni cellulari si interpone infatti una tenue struttura connettivale provvista di fibre nervose con funzione vasomotoria e secretoria.

### PRODUZIONE DELL'UMORE ACQUEO

L'umor acqueo viene prodotto alla velocità di  $2,2 \pm 0,37$  mm<sup>3</sup>/min. Come è noto, il movimento di fluidi attraverso le membrane biologiche avviene per meccanismi fisici (trasporto passivo), per meccanismi biochimici (trasporto attivo) o per meccanismi combinati.

*Meccanismi passivi.* Non incidono per più del 25% della produzione dell'umor acqueo. Sono rappresentati dalla diffusione, la dialisi e l'ultrafiltrazione. Le ultime due rendono conto della differenza proteica tra plasma e acqueo.

*Meccanismi attivi.* Il loro intervento spiega la maggiore concentrazione nell'acqueo di sostanze come sodio, cloro, acido ascorbico, acido lattico e la differenza di potenziale esistente tra stroma ed epitelio. La secrezione dell'acqueo dipende da un trasporto unidirezionale di soluti, che sono seguiti passivamente dall'acqua per un gradiente di concentrazione osmotica.

La secrezione unidirezionale dell'acqueo in camera posteriore (in direzione stroma-PE-NPE-camera posteriore) avviene per via transcellulare e paracellulare. Esiste un riassorbimento parziale dell'acqueo che dalla camera posteriore ritorna alle cellule del NPE.

L'anidrasi carbonica catabolizza la reazione tra anidride carbonica ed acqua, portando alla formazione di bicarbonato e ione idrogeno. Lo ione idrogeno viene scambiato con il sodio il quale però viene immediatamente espulso ad opera della sodio/potassio fosfatasi. L'alta concentrazione di sodio e di bicarbonato (quest'ultimo espulso mediante scambiatori con il cloro e canali per la diffusione facilitata per il bicarbonato) negli spazi intercellulari provoca lo spostamento di acqua per gradienti di concentrazione osmotica. L'inibizione dell'anidrasi carbonica o della sodio/potassio fosfatasi (rispettivamente con acetazolamide e digossina) provoca una diminuzione della produzione di umore acqueo del 50%.

## **ANATOMIA DELLA ZONA DI DEFLUSSO DELL'UMORE ACQUEO**

### Angolo Camerulare

Corrisponde al recesso periferico della camera anteriore. La parete anteriore è costituita dalla periferia della Descemet, contrassegnata da un rilievo anulare grigio biancastro (linea di Schwalbe) fatto di fibre collagene ed elastiche, e dal trabecolato attraverso il quale traspaiono il canale di Schlemm e lo sperone sclerale. La parete posteriore è costituita essenzialmente dalla radice dell'iride.

### Trabecolato

E' composto da lamelle connettivali. Se ne riconoscono tre porzioni: una più interna, a contatto con l'umore acqueo (trabecolato uveale), una intermedia (trabecolato sclero-corneale), ed una più esterna (trabecolato cribriforme) a diretto contatto della parete profonda del canale di Schlemm.

Le lamelle trabecolari sono separate l'una dall'altra da spazi vuoti (spazi intertrabecolari) ed hanno uno spessore di 5 micron negli strati più vicini alla camera anteriore e diventano più sottili man mano che ci si avvicina al canale di Schlemm.

### Canale di Schlemm

E' una formazione tubulare disposta attorno al limbus, a sezione ellittica.

Presenta due pareti, una esterna (sclerale) ed una interna (trabecolare): la prima è costituita da uno strato di cellule endoteliali, la seconda da due strati distinti di cellule endoteliali, uno a contatto del trabecolato cribriforme, l'altro a contatto del canale.

### Collettori Post-Canalicolari

Rappresentano la via di immissione dell'acqueo nel sangue e consistono in una serie di 30-40 canalicoli i quali dalla parete superficiale del canale di Schlemm si portano al plesso venoso episclerale.

## **DEFLUSSO DELL'UMORE ACQUEO**

L'umore acqueo, secreto direttamente in camera posteriore dai processi ciliari, attraverso lo spazio iridolenticolare passa in camera anteriore. Qui, oltre ad un rimescolio legato alle contrazioni dei muscoli ciliari ed iridei, l'acqueo presenta regolari movimenti da parete a parete della cavità camerulare e moti circolatori di convezione termica, ascendenti davanti all'iride e discendenti verso la cornea, originati dalla differenza di temperatura delle due strutture.

L'attraversamento del trabecolato uveale avviene molto agevolmente grazie all'ampiezza dei pori a questo livello. L'acqueo può seguire due vie di deflusso.

**Deflusso trabecolare** (deflusso pressione-dipendente). Costituisce la via principale del deflusso (85%). All'altezza del trabecolato corneo-sclerale il passaggio del liquido è meno agevole per il progressivo restringimento dei pori. A questo livello possono inoltre depositarsi detriti veicolati dallo stesso liquido. Il trabecolato cribriforme è ancora meno permeabile: l'acqueo infatti lo attraversa solo dopo aver imbibito lo strato endoteliale e le lamelle circostanti. La sua progressione può essere accelerata dalla contrazione delle fibre longitudinali del muscolo di Brucke che determina l'arretramento dello sperone sclerale e l'apertura a ventaglio delle fibre trabecolari. Superato il trabecolato cribriforme, l'acqueo deve sormontare un ulteriore ostacolo: la parete interna del canale di Schlemm che potrebbe essere, insieme al trabecolato cribriforme, la sede principale della fisiologica resistenza al deflusso.

**Deflusso uveosclerale** (deflusso pressione-indipendente). Attraversato il trabecolato uveale l'acqueo abbandona la via classica per deviare lateralmente, lungo le lamelle trabecolari, fino a giungere al tessuto uveale che riveste la faccia esterna del muscolo ciliare. Costituisce il 15% del deflusso dell'acqueo in

condizioni normali, ma potrebbe acquistare notevole importanza nelle situazioni di alterato deflusso trabecolare.

**Deflusso irideo.** Poco rilevante, si verificherebbe per assorbimento diretto da parte dell'iride.

### **REGOLAZIONE DELLA PRODUZIONE E DEL DEFLUSSO**

La pressione intraoculare si mantiene su livelli relativamente costanti, suggerendo la presenza di meccanismi di regolazione per l'omeostasi del sistema.

Alcuni autori suggeriscono l'esistenza, all'interno del bulbo oculare, di barocettori. Tuttavia l'esistenza di centri e di effettori nella regolazione della pressione intraoculare è ancora ipotetica. Nell'ambito dei supporti nervosi, ruolo fondamentale è attribuibile al sistema autonomo, nei suoi versanti parasimpatico ed ortosimpatico.

#### **Parasimpatico:**

i parasimpatico-mimetici (pilocarpina) provocano la contrazione del muscolo ciliare e del muscolo sfintere dell'iride provocando un aumento del deflusso trasecolare

#### **Ortosimpatico:**

*recettori beta-* i recettori beta-2 sono localizzati nell'epitelio non pigmentato dei corpi ciliari e la loro stimolazione stimola la sintesi di AMPc con conseguente aumento della produzione di acqueo. Non agiscono sul deflusso.

*recettori alfa-* i recettori alfa-1 sono localizzati a livello dei vasi, del muscolo dilatatore dell'iride e del muscolo di Muller delle palpebre. I recettori alfa-2 presentano due localizzazioni principali: a livello presinaptico e nei corpi ciliari (NPE). La stimolazione dei primi ha un effetto simpatico-litico con diminuzione di liberazione di noradrenalina. La stimolazione dei secondi provoca diminuzione di AMPc con diminuzione della produzione di acqueo. La stimolazione degli alfa-2 provoca inoltre un incremento del deflusso uveosclerale. (ciò è vero però solo per alcuni tipi di agonisti che stimolano solo la sottopopolazione alfa-2-A). *Sistema dopaminergico:* è stata segnalata la presenza di recettori DA-1 a livello dei corpi ciliari. La loro stimolazione provoca aumento di produzione dell'umore acqueo. La stimolazione dei recettori DA-2 sembrerebbe che provochi diminuzione di produzione di acqueo, agendo sulla membrana presinaptica delle fibre simpatiche periferiche.