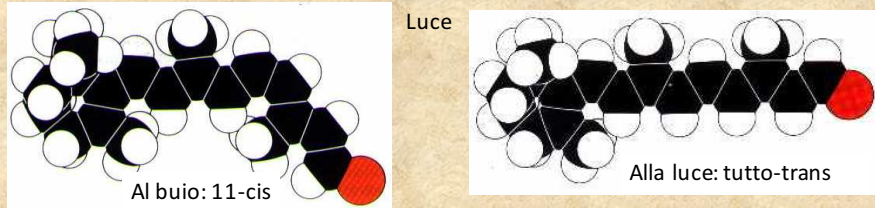


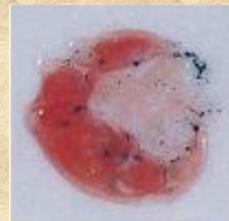
Le opsine presenti nelle membrane dei coni e dei bastoncelli contengono una molecola che cambia di forma quando viene esposta alla luce



Perché la opsina, dopo essere stata eccitata, ritorni nella condizione di partenza è necessario che il retinale tutto-trans si distacchi dalla opsina e venga sostituito da una nuova molecola in conformazione 11-cis.

Il retinale tutto trans torna in condizione 11-cis grazie ad interventi enzimatici che si svolgono soprattutto nelle cellule pigmentate del tappeto nero.

Dopo la esposizione a luci molto intense i fotorecettori possono risultare "esauriti" per carenza di nuovo 11-cis retinale. Questa è una delle possibili cause di alcuni fenomeni di abbagliamento e di immagini residue. Le aree illuminate fortemente mostrano uno sbiancamento (bleaching) dovuto al cambiamento di conformazione del retinale, qui mostrato in una area della retina di rana.

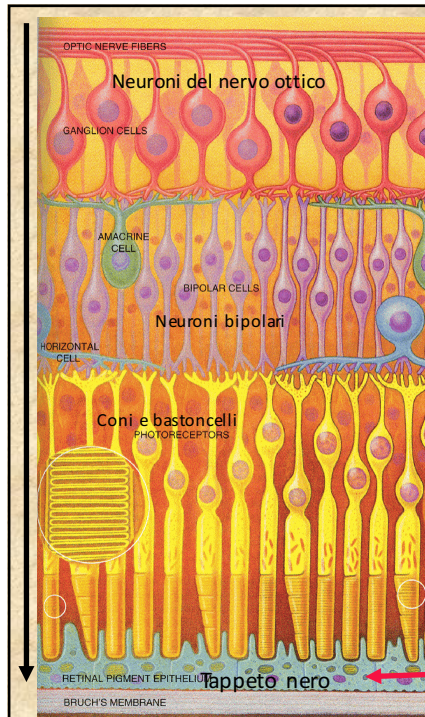


Afterimage

Immagine residua: se si fissa questa immagine per 10-60 secondi e poi si guarda una parete bianca apparirà l'immagine residua a colori invertiti. La stessa cosa avviene spesso anche se si chiudono gli occhi dopo aver fissato l'immagine.

Sappiamo che il retinale, eccitato da un fotone, cambia conformazione per trasformazione di un doppio legame da cis a trans: al buio 11-cis, alla luce tutto-trans. Il cambiamento del retinale induce un cambiamento di conformazione della proteina associata, una opsina, che porta, indirettamente, alla attivazione di un enzima, cioè una fosfodiesterasi. La fosfodiesterasi idrolizza il secondo messaggero cGMP e la diminuzione della concentrazione di questa molecola determina la chiusura di canali ionici e quindi un cambiamento di potenziale della membrana. Perché la opsina ritorni nella conformazione a riposo di partenza è necessario rimuovere il retinale tutto-trans e sostituirlo con un nuovo retinale 11-cis. Il retinale tutto-trans potrà tornare alla conformazione 11-cis grazie ad una cascata enzimatica che richiede energia e che si svolge in genere nelle cellule pigmentate del tappeto nero, cioè uno degli strati più esterni della retina, che si trova a contatto con le estremità dei coni e dei bastoncelli, il segmento esterno, quello che contiene le membrane con le opsine. Dopo la esposizione a luci molto intense i fotorecettori possono risultare "esauriti" per carenza momentanea di nuovo 11-cis retinale. Questa è una delle possibili cause di alcuni fenomeni di abbagliamento e di immagini residue. Possiamo vedere un esempio di immagini residue fissando l'immagine nella slide 56.

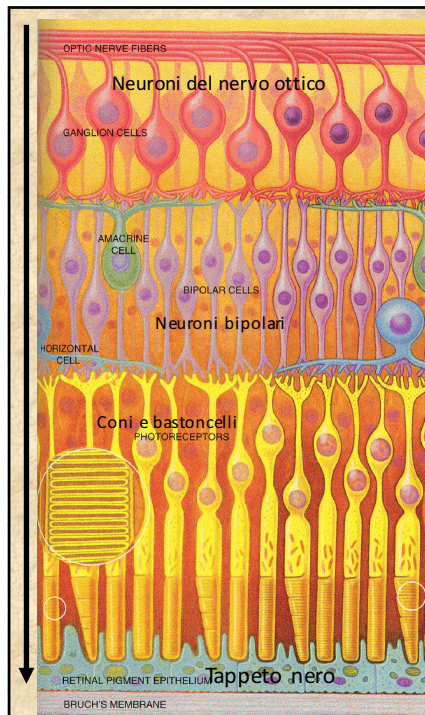
Leggende sulle immagini residue. Il fenomeno delle immagini residue ha generato la falsa idea che nella retina di un cadavere potesse rimanere traccia delle ultime immagini osservate prima di morire, anche sulla base di osservazioni erronee di studiosi della fine del XIX secolo. In realtà zone della retina esposte a forte illuminazione mostrano uno sbiancamento (bleaching, slide 55). Questo errore portò a tentare, senza successo, di sviluppare in medicina legale dei metodi (optografia forense) mirati riconoscere il volto di un assassino nella retina della vittima. Anche se la polizia fin dal secolo scorso ha rinunciato a questo tipo di prove, la letteratura poliziesca ha ampiamente sfruttato il fenomeno.



La retina è una struttura complessa formata da diversi strati di cellule nervose. La luce (freccia) deve attraversare tutti gli strati prima di raggiungere la zona sensibile dei coni e dei bastoncelli (freccia rossa). Gli impulsi nervosi generati grazie alla luce nei coni e nei bastoncelli passano mediante sinapsi nelle cellule bipolari e infine nei neuroni del nervo ottico, i cui assoni arrivano al cervello.

I raggi luminosi che, dopo aver attraversato tutti gli strati, non colpiscono coni o bastoncelli o comunque non vengono assorbiti dalla rodopsina generando un impulso nervoso, giungono a uno strato scuro, il tappeto nero, che li assorbe. Questo è importante per evitare che i raggi vengano riflessi disturbando la visione.

Il tappeto nero svolge anche molte altre funzioni importanti, tra cui ricordiamo quelle trofiche e quella del riciclo del retinale tutto-trans a 11-cis.

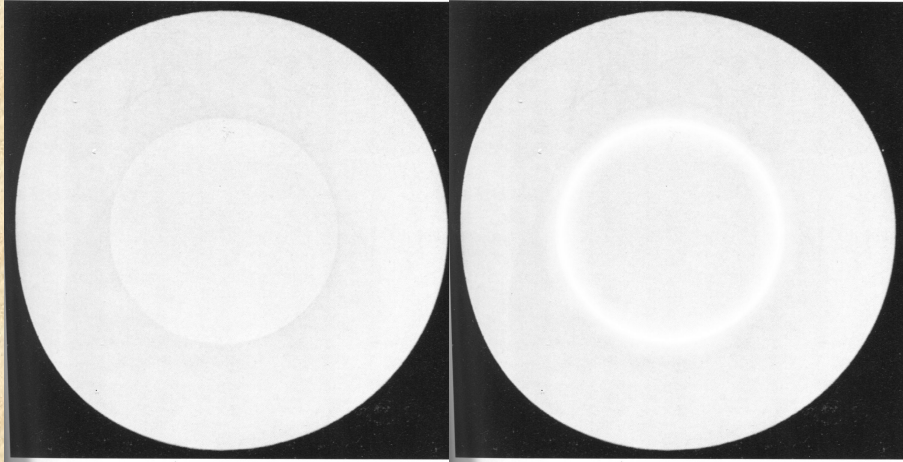


Quanti neuroni del nervo ottico sono in contatto con un singolo fotorecettore?

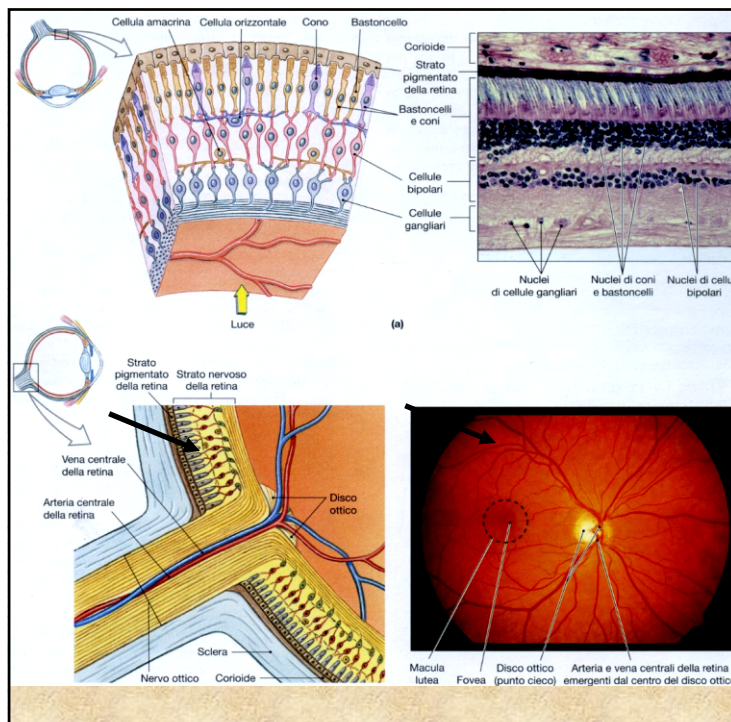
Quanti fotorecettori si mettono in contatto con un neurone del nervo ottico?

Dalla figura è evidente che esiste una diffusione laterale dei segnali: come è quindi possibile una visione distinta, se l'eccitazione di un fotorecettore si trasmette anche ad altri fotorecettori?

Collegamenti trasversali e inibizione laterale



Nell'immagine di sinistra si percepisce una netta differenza tra il cerchio centrale, che appare più chiaro, e quello periferico che appare più scuro. In realtà è una illusione ottica dovuta alla presenza di una sfumatura scura al confine tra i due cerchi. Infatti la immagine di destra è identica alla prima, ma con un anello bianco è stata mascherata la sfumatura al confine: ora la tonalità della zona centrale e di quella periferica appaiono identiche.



Gli assoni di tutti i neuroni del nervo ottico scorrono sulla superficie della retina convergendo in un punto vicino al centro dell'occhio, dove si riuniscono per uscire dall'occhio formando il grande nervo ottico. In quel punto della retina, detto "disco ottico" ci sono soltanto assoni e non coni o bastoncelli, quindi è una zona cieca (freccia).

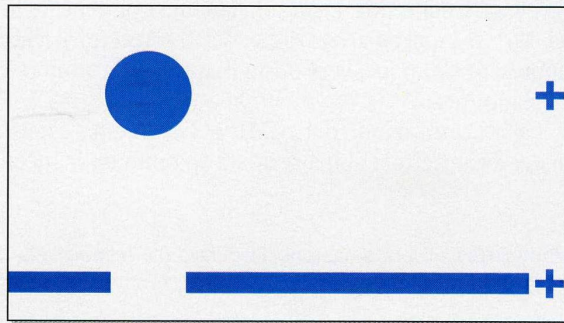
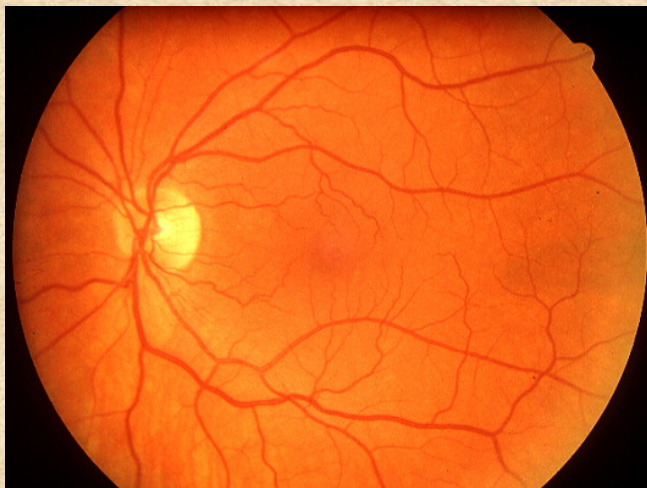


Figura 18.7 Determinazione del punto cieco. La macchia cieca dell'occhio sinistro può venire localizzata chiudendo l'occhio destro e fissando la croce posta in alto con l'occhio sinistro. Se l'immagine viene tenuta a circa 15 cm dall'occhio e viene mossa leggermente avanti e indietro, il cerchio posto a sinistra scompare perché la sua immagine si forma sulla macchia cieca. Se poi l'occhio sinistro fissa la croce posta in basso, la linea a sinistra appare continua, in quanto l'interruzione si forma sulla macchia cieca. Il sistema visivo, infatti, "riempie" la macchia cieca con ciò che la circonda (ridisegnata da L.M. Hurvich, Color vision, Sinauer Ass., 1981).

Dimostrazione del punto cieco. Osservare da circa 30 cm di distanza

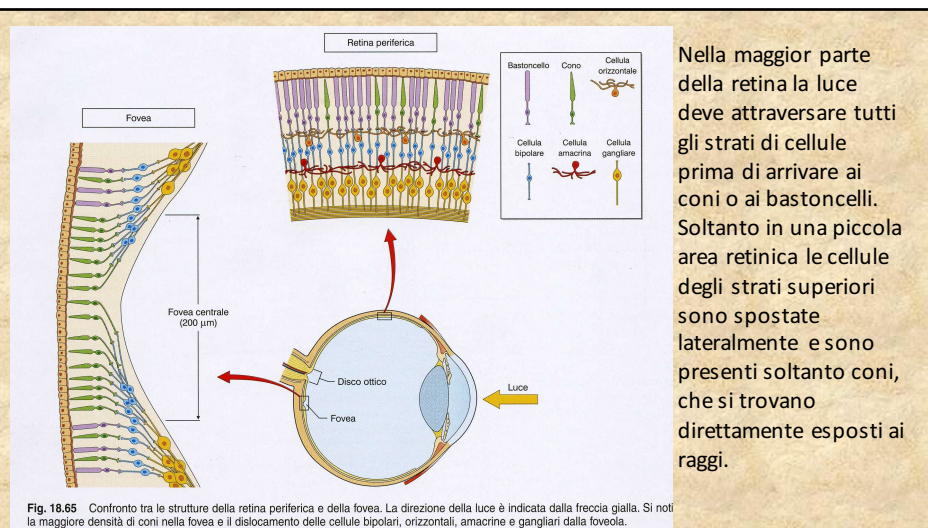


i vasi sanguigni della retina

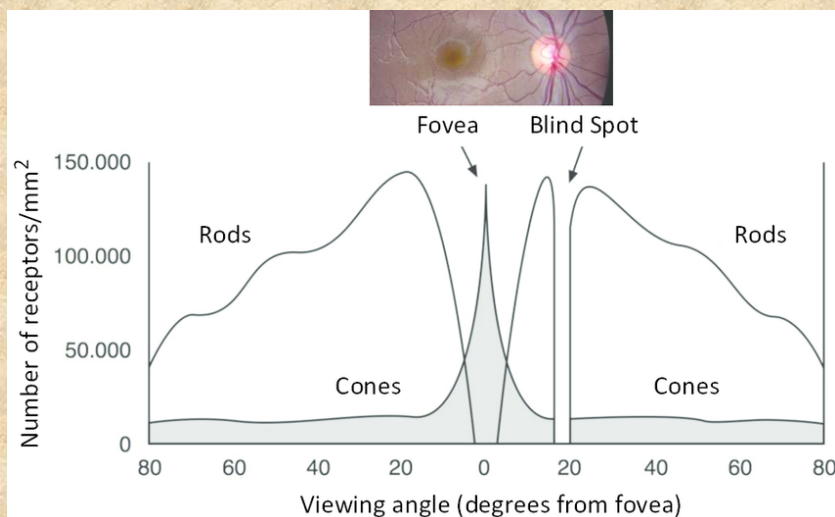
I nostri neuroni visivi sono quasi insensibili alle immagini stazionarie.

Perché non vediamo i vasi sanguigni della retina? Sono di notevoli dimensioni, opachi, e si trovano sul percorso dei raggi luminosi, molto vicini ai fotorecettori, quindi dovrebbero proiettare un'ombra ben visibile.

Con un semplice artificio possiamo riuscire a vederli distintamente. Con una piccola torcia elettrica a raggio luminoso sottile (**non un laser, per evitare gravi danni all'occhio!**) illuminiamo lateralmente il bulbo oculare, evitando di proiettare la luce direttamente nella pupilla e muoviamo rapidamente il fascio luminoso. L'esperimento avrà più successo in penombra, se si guarda con l'occhio una superficie uniforme, rivolgendo lo sguardo in direzione opposta a quella da cui proviene il raggio della torcia. Dopo pochi secondi vedremo distintamente il disegno dei vasi sanguigni (l'immagine che si percepisce è detta "albero di Purkinje" dal nome dello studioso che per primo la ha evidenziato). Si sottolinea che perché la prova abbia successo è necessario muovere il raggio luminoso. Perché con questo artificio vediamo i vasi sanguigni, che normalmente non vediamo? Molti neuroni visivi rispondono soltanto a immagini in movimento e sono poco sensibili a immagini immobili (Perché agiamo le braccia per farci notare?). Di questa relativa cecità a immagini immobili è difficile rendersi conto, per la esistenza di piccoli e rapidi movimenti involontari dei nostri occhi, che non riusciamo a sopprimere anche se ci illudiamo di fissare con precisione un oggetto. Questo è il motivo per cui non è realizzabile una completa immobilità delle immagini retiniche nella visione normale. Al contrario i vasi retinici solidali con gli strati della retina, sono immobili relativamente ai fotorecettori: se spostiamo lo sguardo si spostano anche i vasi. Quando effettuiamo la prova con la torcia elettrica, muovendo il raggio produciamo un movimento delle ombre per cui le immagini dei vasi non sono più immobili e divengono percepibili



Questa piccola area, dal diametro inferiore a 1 mm, chiamata "fovea" è quella che utilizziamo quando fissiamo lo sguardo su un oggetto, ad esempio per leggere. Soltanto questa è l'area della visione distinta. La fovea contiene 100.000 - 200.000 coni



Quale è il potere di risoluzione dell'occhio umano?
Riusciamo a riconoscere due punti come distinti se distano almeno circa 0.2 mm. Due punti più ravvicinati ci sembrano uniti in una immagine unica

Considerando la ampiezza del nostro capo visivo questo corrisponde alle capacità di un sensore di circa 600 megapixel (600 milioni di pixel)

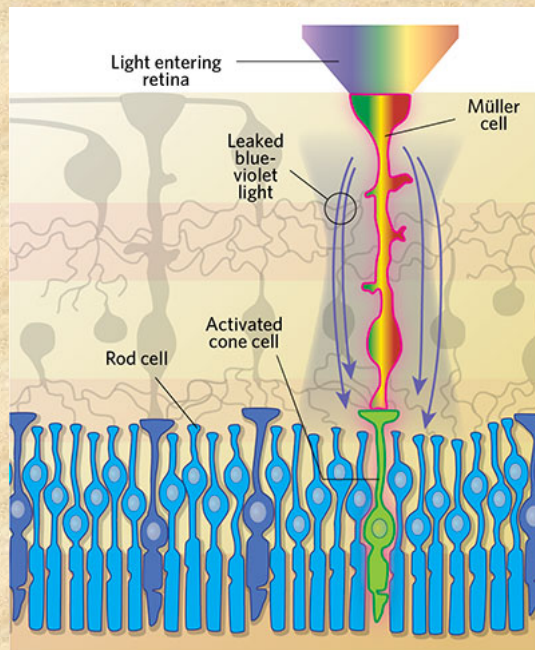
Il nostro occhio ha soltanto circa 6 milioni di coni (i 120 milioni di bastoncelli, responsabili della visione crepuscolare a bassa definizione non rientrano nel computo).

Come si conciliano questi dati? La risposta è nel fatto che la fovea analizza in successione tante parti del campo visivo, creando una immagine a mosaico che poi il cervello elabora. In realtà quindi l'immagine davvero nitida è soltanto quella generata dalla fovea. Che, con un numero relativamente piccolo di coni, copre un campo visivo di circa 1°

Di fatto quindi ci troviamo nelle condizioni di una fotocamera che, anziché scattare una fotografia da 600 megapixel (milioni di pixel) per tutto il panorama, scatta moltissime foto da poche decine di kilopixel (migliaia di pixel). Il computer (cioè il cervello) unisce poi le foto per creare una grande immagine ad alta risoluzione.

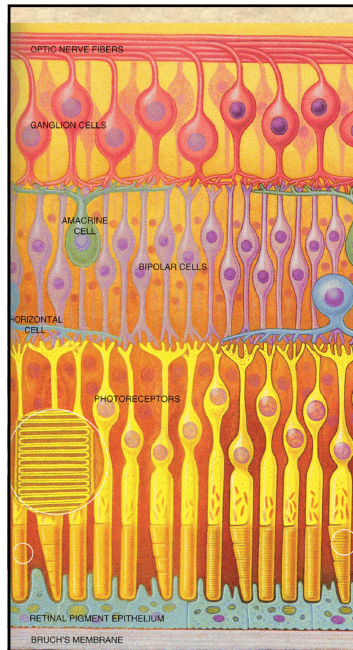
Possiamo renderci conto del fatto che in realtà soltanto una parte del campo è davvero nitida con un semplice esperimento che ci aiuta anche a valutare la ampiezza del nostro campo visivo.

Con gli occhi fissi in avanti (o se preferite con un solo occhio aperto), ad esempio fissando il monitor del computer, tendiamo le braccia in avanti e poi le muoviamo verso i lati fino a quando quasi scompaiono dal nostro campo visivo. In questo modo possiamo stimare l'ampiezza del campo visivo, ma soprattutto cerchiamo di renderci conto se tutto il campo visivo è nitido. Ci accorgiamo facilmente che, se il monitor rimane nitido, le immagini delle mani risultano assai poco nitide: l'immagine del centro del monitor cade sulla fovea, mentre le mani vanno spostandosi in aree dove la visione non è nitida, fino a scomparire dal campo visivo.



In realtà le cose sono molto più complicate

Guida ottica da glia



Epitelio pigmentato (tappeto nero) e tappeto lucido: perché gli occhi dei gatti brillano al buio?

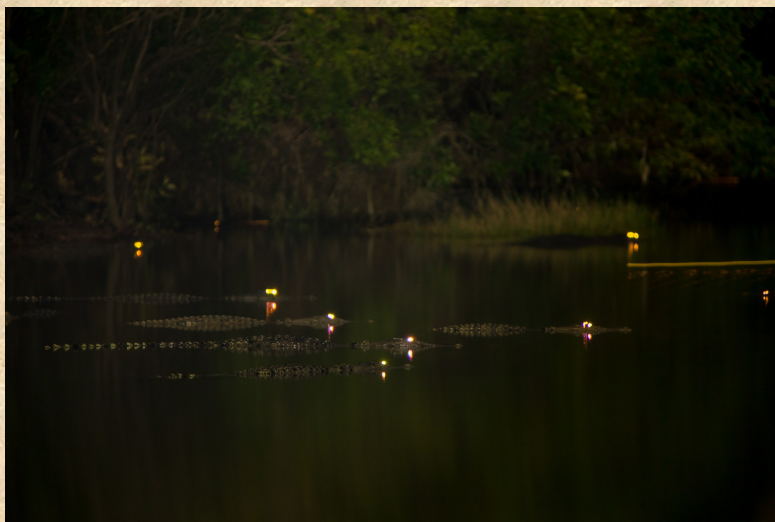


Abbiamo visto che nel nostro occhio i raggi che superano i coni e i bastoncelli senza essere assorbiti dalla rodopsina, e quindi senza eccitare i coni o i bastoncelli, vengono assorbiti dal tappeto nero.

Negli animali notturni, come i gatti, invece del tappeto nero c'è uno strato riflettente a specchio (tappeto lucido). In questo modo i raggi vengono riflessi e possono eccitare i coni o i bastoncelli, aumentando così la sensibilità alla luce.

Gli occhi che vediamo brillare nel buio riflettono la luce grazie al tappeto lucido.

Gli animali notturni hanno quindi una alta sensibilità alla luce, anche se la visione potrà essere meno precisa a causa di possibili disturbi provocati dai raggi riflessi.



Caimani nella notte

La percezione dei colori

Con un solo tipo di fotorecettore, anche se sensibile ad un ampio spettro di lunghezza d'onda, non è possibile distinguere colori diversi. Stimoli di lunghezza d'onda diversa, cioè di colori diversi, ecciteranno la retina in modo più o meno intenso. Con almeno due tipi di coni, con spettro di assorbimento diverso e in parte sovrapposto, luci di colori diversi provocheranno segnali differenziati.

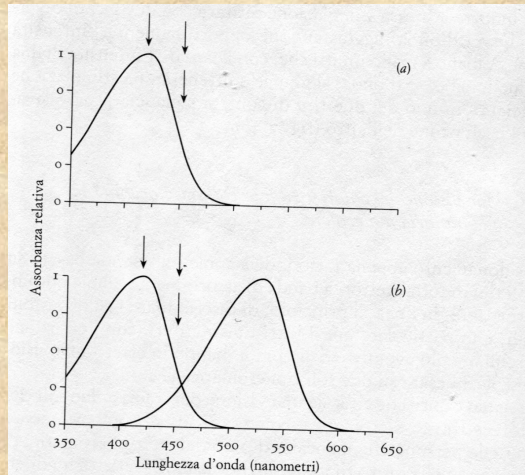
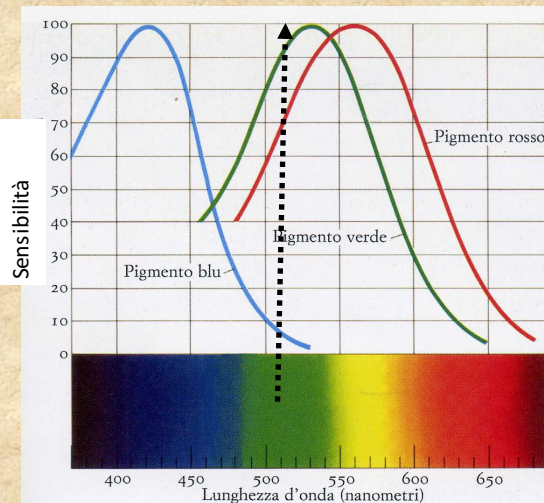


Figura 7.4

(a) Ambiguità di un sistema di visione dei colori basato su un solo tipo cromatico di cono. La differenza di risposta di questo cono a due stimoli di diversa lunghezza d'onda potrebbe essere annullata variando l'intensità di uno dei due stimoli. (b) L'effetto non può invece prodursi in un sistema basato su due (o più) tipi di coni le cui curve di assorbimento spettrale siano parzialmente sovrapposte, perché in questo caso la variazione d'intensità necessaria a riequilibrare la risposta nei coni di un tipo provocherebbe un maggiore squilibrio nella risposta degli altri coni.



LA VISIONE DEI COLORI.

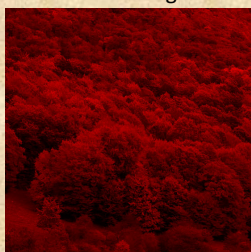
Possiamo distinguere i colori grazie al fatto che esistono tre tipi di coni che, grazie al diverso tipo di pigmento (opsina) che contengono, assorbono la luce di un determinato colore: uno con sensibilità massima al blu, uno al verde e uno al rosso.

Immaginiamo che il nostro occhio venga colpito da una luce verde (freccia). Questa verrà recepita sia dai coni del blu (molto poco), sia da quelli del verde (molto), sia da quelli del rosso (poco).

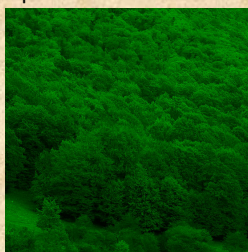
Il cervello analizza il colore integrando le informazioni dei tre tipi di coni: soltanto la luce di quel particolare tono di verde eccita i tre tipi di coni in quella proporzione.

I monitor dei computer, gli scanner e le fotocamere utilizzano per riprodurre i colori lo stesso principio dell'occhio: il sistema "RGB" (abbreviazione di Red-rosso, Green-verde, Blue-blu).

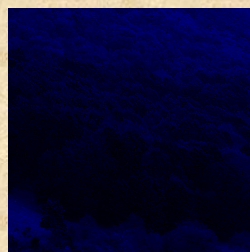
I tre colori base vengono miscelati per ottenere tutte le tonalità desiderate.



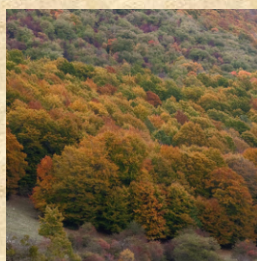
Solo il rosso



Solo il verde

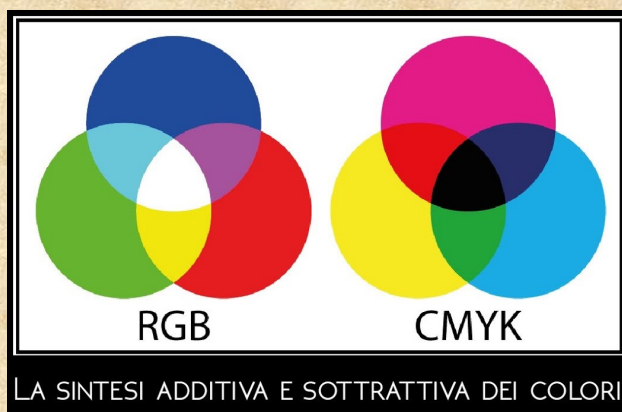


Solo il blu



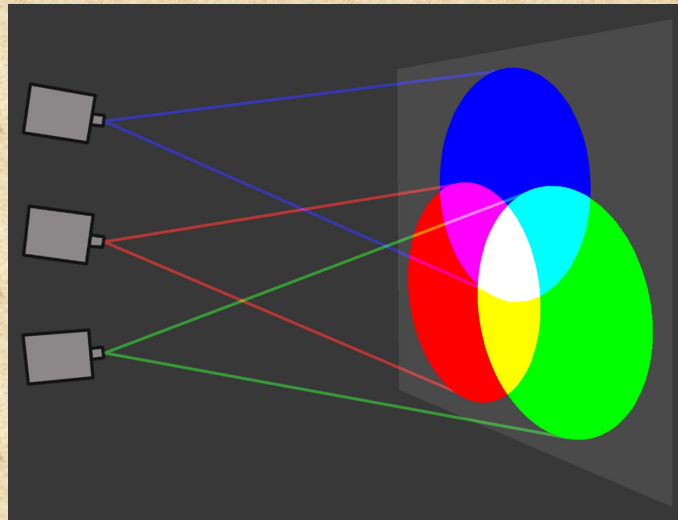
I tre canali miscelati

I **colori** primari sono i **colori** di base dai quali si ottengono, mescolandoli, tutti gli altri. I colori primari sono diversi se consideriamo la sintesi additiva o la sintesi sottrattiva. Sintesi additiva è il risultato della sovrapposizione di raggi luminosi colorati (somma di colori). Sintesi sottrattiva è il risultato del mescolamento di pigmenti ciascuno dei quali assorbe la luce di determinate lunghezze d'onda (sottrazione di colori)



Per la sintesi additiva i colori primari sono Red, Blue, Green.

Per la sintesi sottrattiva i colori primari sono Cyan, Magenta, Yellow (K= nero)



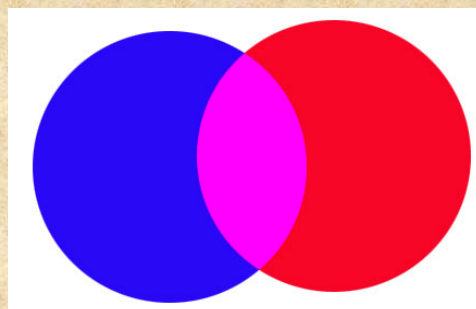
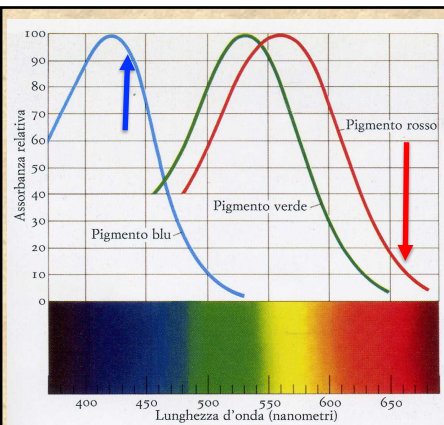
Sintesi additiva. Ad esempio lo schermo del computer



Sintesi sottrattiva. Ad esempio la stampa a colori o la pittura



Quanti sono i colori dell'arcobaleno?
Esistono colori visibili per l'uomo che non compaiono nell'arcobaleno (o nella luce che emerge da un prisma)?



Il magenta è un colore che non fa parte dello spettro ottico: cioè la sua tonalità non può essere generata con luce di una singola lunghezza d'onda. Il colore magenta è stato ottenuto sovrapponendo rosso e blu, a lunghezze d'onda tali da stimolare rispettivamente soltanto il cono per il rosso e quello per il blu. Nessuna singola lunghezza d'onda e nessuna banda di lunghezze d'onda per quanto larga può stimolare questi due coni senza stimolare anche quello per il verde.



Come vedono i colori?

Pesci, rettili, uccelli. 4 tipi di coni.



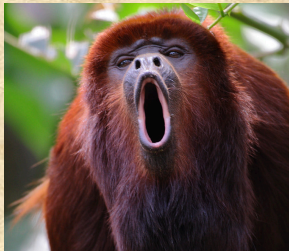
Mammiferi non primati e molte scimmie del Nuovo Mondo. 2 tipi di coni. Il toro quindi è daltonico per il Rosso-verde



Aotus, scimmia notturna. 1 tipo di cono, visione monocromatica



Primati del vecchio mondo: 3 tipi di coni.



Scimmia urlatrice. Una scimmia del Nuovo mondo con 3 tipi di coni

WHAT HUMANS SEE

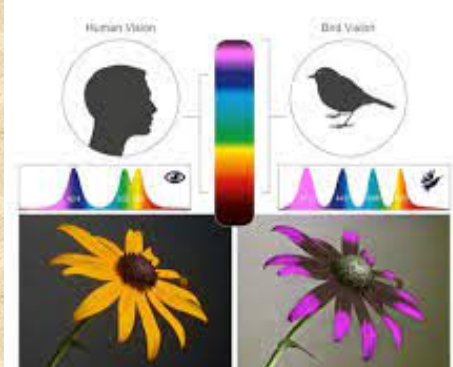


WHAT BIRDS SEE



I rettili e gli uccelli hanno una visione tetracromatica (hanno cioè quattro tipi di coni) che, nella maggior parte dei casi sono rispettivamente sensibili agli ultravioletti, al blu, al verde e al rosso (con caratteristiche spettrali diverse tra i diversi animali) Le stesse caratteristiche di tetracromia erano probabilmente condivise dai progenitori dei mammiferi attuali, i sinapsidi.

Queste simulazioni, basate sullo spettro di sensibilità dei loro quattro tipi di coni, ci fanno capire la maggior capacità di discriminare i colori in un uccello



Gli antichi mammiferi, visto il probabile adattamento alla vita notturna, che non richiedeva una visione a colori ma bensì una elevata sensibilità alla scarsa illuminazione, andarono incontro alla perdita di due tipi di coni (UV e Rosso), aumentando invece il numero dei bastoncelli. Questa è la situazione degli attuali mammiferi non primati: visione dicromatica, con un cono per il blu e uno per il verde (il cui gene è sul cromosoma X), cecità agli ultravioletti e relativa cecità per il rosso. Retina molto ricca di bastoncelli.



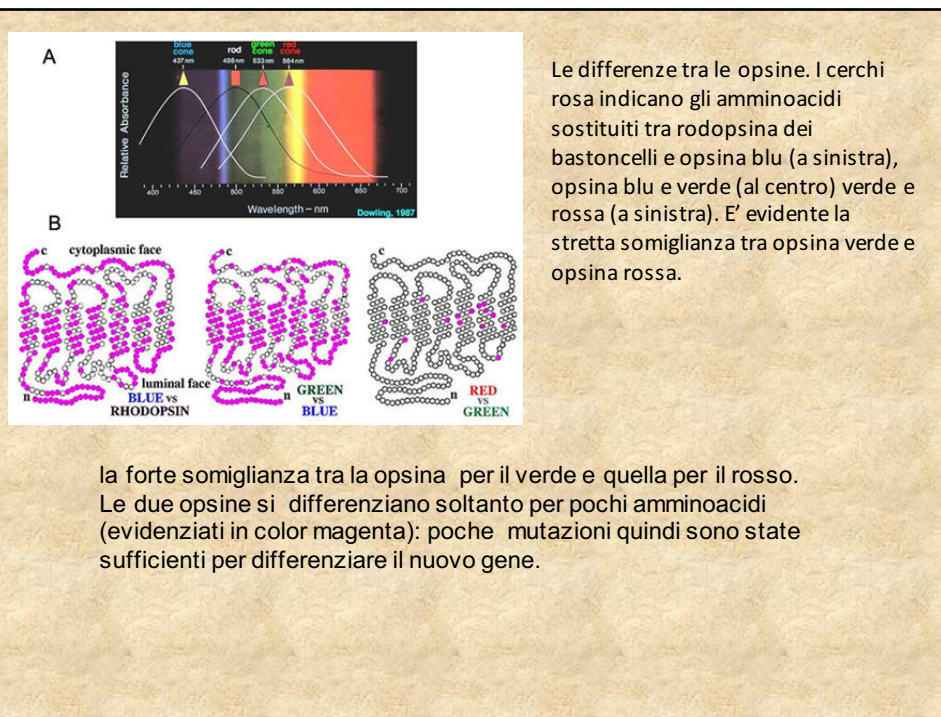
Ricostruzione ipotetica di un mammifero vissuto circa 60 milioni di anni or sono

L'uomo ha una visione tricromatica: grazie alla presenza di tre tipi di coni con le caratteristiche di risposta spettrale che abbiamo visto. Il nostro occhio è capace di discriminare una enorme quantità di colori diversi tra circa 390 nm e 700 nm. Lunghezze d'onda inferiori (ultravioletti) o superiori (infrarossi) non sono per noi visibili. Questa caratteristica è condivisa da molti altri primati, in particolare dalle scimmie del vecchio mondo (catarrini). Al contrario gli altri mammiferi, comprese la maggior parte delle scimmie del nuovo mondo (platirrini), hanno una visione dicromatica: dispongono cioè soltanto di due tipi di coni.



La nostra visione cromatica confrontata con quella tipica dei mammiferi non-Primi

Nei Primati vecchio mondo (catarrine), che comprendono le grandi scimmie e l'uomo si è evoluta la visione tricromatica, con la comparsa di coni per il rosso (Gene localizzato sul cromosoma X). Il fenomeno che ha portato a questa novità è stato probabilmente una duplicazione del gene per la opsina del verde (cromosoma X). Uno dei due geni duplicati ha subito delle mutazioni che ne hanno modificato la sensibilità al colore, producendo così coni sensibili al rosso. Il nostro cromosoma X infatti porta i geni per la opsina del verde e per quella del rosso.



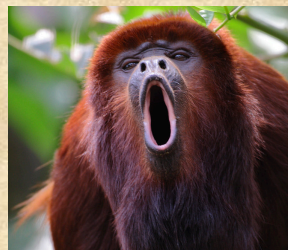
E' molto interessante esaminare il caso delle scimmie Platyrrhine (scimmie del nuovo mondo), la maggior parte delle quali ha una visione dicromatica, come quella dei mammiferi non-primati. In questi animali è però presente un polimorfismo del gene per l'opsina posto sul cromosoma X. Nella forma più comune la opsina ha un massimo di sensibilità nel verde, mentre la forma alternativa rara ha il massimo di sensibilità nel rosso.

I maschi, con un solo cromosoma X, hanno in genere soltanto coni per il verde (allele più frequente), mentre rari maschi hanno soltanto coni per il rosso (allele più raro).

Vista la ampiezza di risposta cromatica di questi coni le differenze funzionali sono irrilevanti.

Nel caso delle femmine, con due cromosomi X, esiste la possibilità, anche se rara, di femmine eterozigoti, quindi con coni per il verde e coni per il rosso, che hanno dunque una visione tricromatica.

Alla condizione della maggior parte delle scimmie del nuovo mondo fa eccezione *Alouatta*, la scimmia scimmia urlatrice, che ha visione tricromatica simile a quella dell'uomo. Questa condizione è conseguenza di una duplicazione del gene per la opsina, posto sul cromosoma X, un fenomeno analogo a quello che avrebbe generato la tricromia nei primati del vecchio mondo. Si sottolinea che scimmia urlatrice è specializzata per una alimentazione fogliivora: la visione tricromatica rappresenta per questa specie un forte vantaggio selettivo.



Tra le scimmie del nuovo mondo è infine da ricordare il caso di *Aotus*, una scimmia notturna, che ha invece una visione monocromatica, con un solo tipo di coni



DALTONISMO

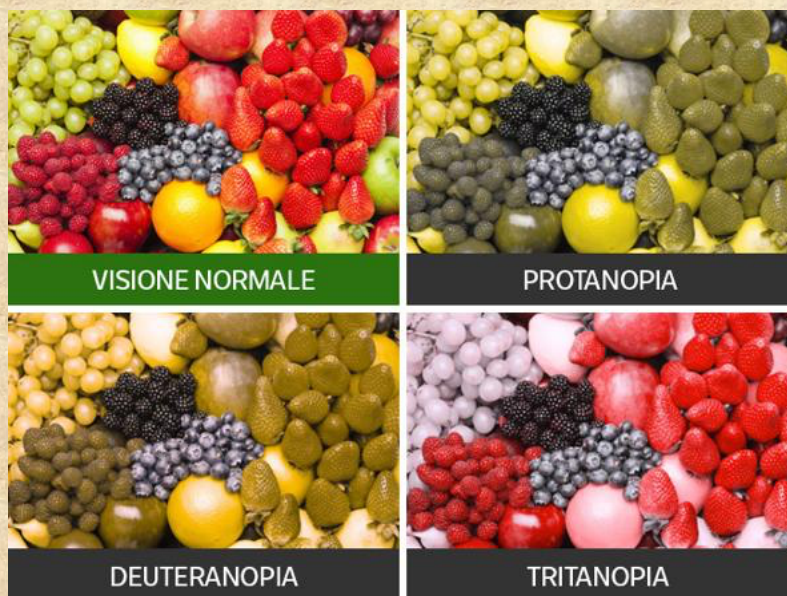
Il Daltonismo è una anomalia ereditaria della percezione dei colori, dovuta a non funzionamento di uno dei tre tipi di coni.

Come vedono i daltonici? Questi sono esempi dei tipi più comuni.

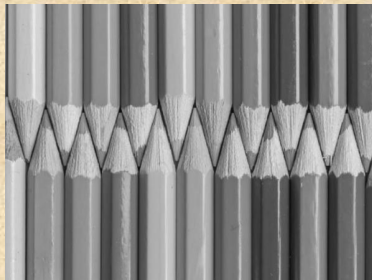


Esistono molte altre forme di daltonismo, meno gravi, in cui non manca completamente la funzione di uno dei tipi di coni, ma è soltanto ridotta. In questo caso il difetto di percezione dei colori è meno evidente.

Esistono anche forme più gravi, molto rare, in cui manca completamente la percezione dei colori (vedono in bianco e nero)







Acromatopsia: mancanza funzionale di tutti e tre i tipi di coni. Sono attivi soltanto i bastoncelli.

La forma più grave di daltonismo, cioè la mancanza funzionale di tutti e tre i tipi di coni (acromatopsia), è molto rara (circa 1/33000). Fanno eccezione alcune piccole popolazioni geneticamente isolate in cui questa anomalia può essere molto più comune. Il caso più noto è quello di un'isola del Pacifico, Pingelap, in Micronesia.



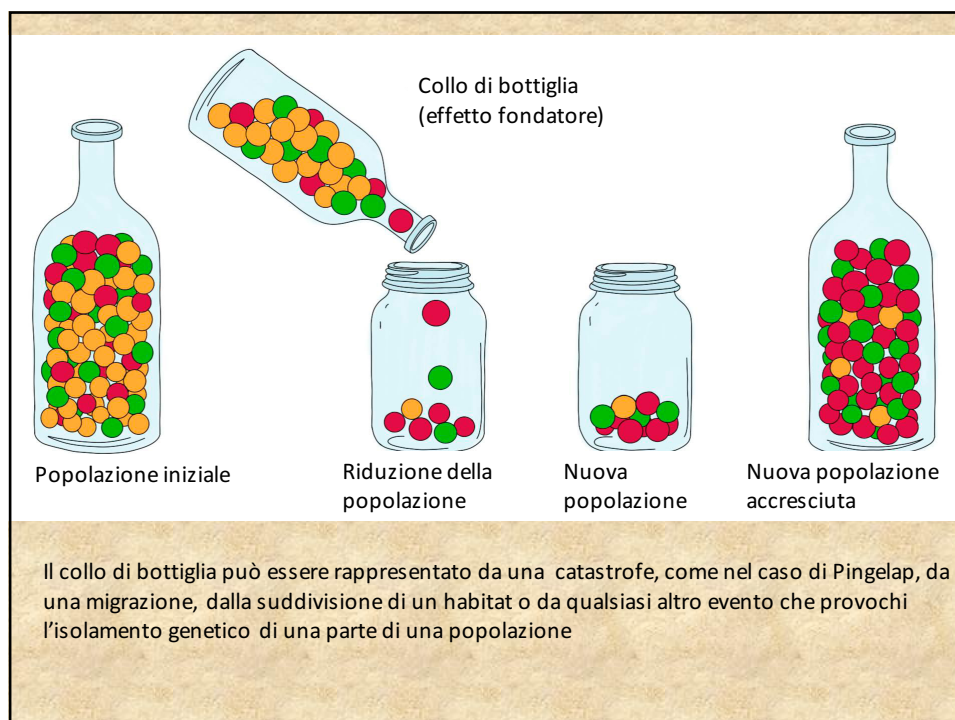
Pingelap

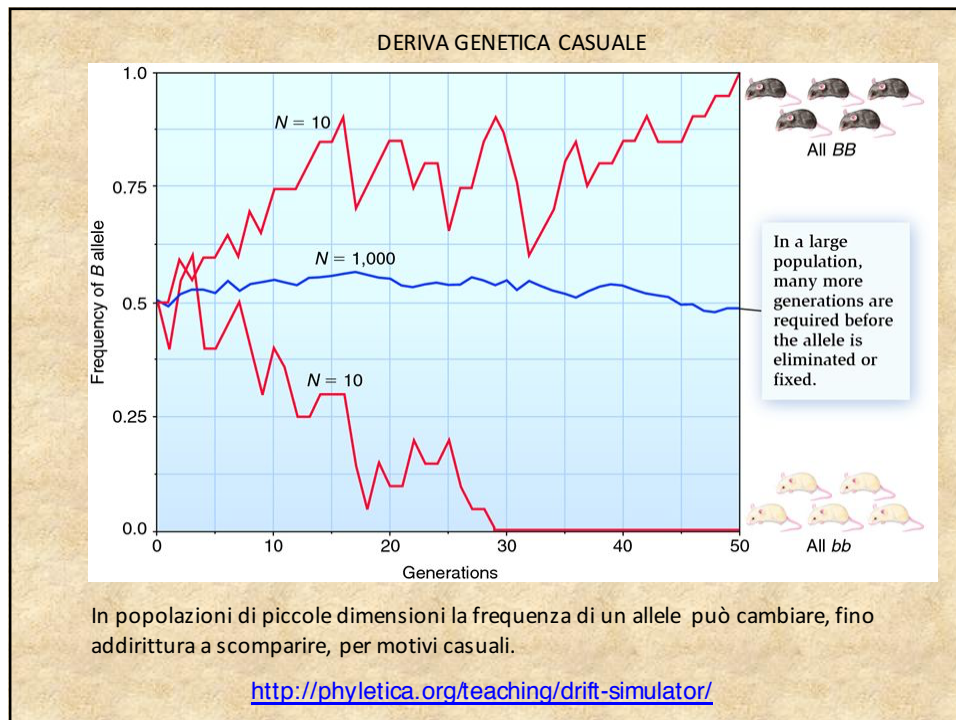
A Pingelap la acromatopsia interessa circa il 10% della popolazione. Gli individui affetti, oltre alla completa incapacità di distinguere i colori, hanno anche una visione poco nitida e non sopportano illuminazioni intense, mentre vedono meglio in condizioni di poca luce. Questo si spiega con il fatto che la loro visione si basa esclusivamente sui bastoncelli. La affezione è dovuta ad una mutazione autosomica recessiva.

Come si spiega l'altissima frequenza della acromatopsia a Pingelap? L'isola ha attualmente una popolazione molto piccola, di circa 250 abitanti, ma nel 1775 un tifone catastrofico colpì l'isola, lasciando soltanto 20 sopravvissuti, tra cui il capo della comunità, che probabilmente era portatore eterozigote della mutazione e quindi vedeva normalmente. Dopo quattro generazioni circa il 2.5 % della popolazione era cieco ai colori, alla sesta generazione la percentuale era salita circa al 5% e oggi a circa al 10% (mentre il 30% sono gli eterozigoti, cioè i sani portatori).



L'alta frequenza della cecità colori a Pingelap è il risultato di un effetto fondatore, seguito dalla azione della deriva genica casuale. Inizialmente si è quindi verificato un collo di bottiglia genetico, per cui i pochi sopravvissuti al tifone avevano, per caso, una percentuale di geni mutati molto superiore alla media (l'effetto è stato poi forse amplificato dal fatto che il portatore fosse il capo della comunità, quindi con probabilità di generare molti figli). Nelle generazioni successive la deriva genica casuale, cioè le fluttuazioni casuali della frequenza dei geni, date le piccole dimensioni della popolazione, hanno portato ad un aumento della frequenza del gene mutato. Le piccole dimensioni della popolazione hanno poi facilitato i matrimoni tra consanguinei.





Mendel e il rapporto 3:1

Mendel in realtà in uno degli esperimenti sull'incrocio degli ibridi di prima generazione riscontrò 705 piante a fiori rossi e 225 a fiori bianchi. In un altro esperimento trovò 787 piante alte e 277 basse. Da questi numeri estrapolò un rapporto di 3:1.

Molto probabilmente, se avesse esaminato un piccolo numero di esemplari, avrebbe trovato numeri diversi e non avrebbe compreso i principi della genetica.

In realtà ogni generazione equivale a un lancio della moneta: le probabilità di ottenere testa o croce sono 1:1, ma in realtà con pochi lanci si possono ottenere rapporti molto diversi

H:T

T	H	T	T	T	H	H	H	T	T	T	H	H	T	H		7:8
H	T	H	T	T	H	T	H	T	H	T	H	H	H			8:6
T	T	T	T	T	T	T	T	H	T	T	H	T	H	H		3:11
H	H	H	H	T	T	H	T	H	H	H	T	T	T			8:6
H	H	H	H	H	H	H	T	H	H	T	T	H	T			10:4
H	H	T	T	H	T	T	T	T	T	H	H	T	T			5:9
T	T	H	H	T	T	H	H	H	T	T	T	H				7:7

49 heads
51 tails

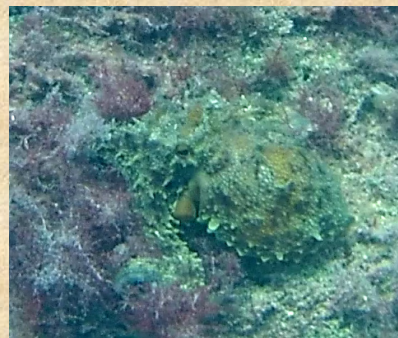
longest run of heads: 7
longest run of tails: 8

Le donne discriminano i colori meglio degli uomini?

La opsina sensibile al verde è codificata dal gene *OPN1MW* (MW= Medium Wave), localizzato sul cromosoma X. Nella nostra specie esiste anche una forma alternativa relativamente rara, *OPN2MW*, che codifica una opsina molto simile, caratterizzata da uno spettro di sensibilità cromatica molto simile, ma non identico (intermedio tra i normali coni per il verde e quelli per il rosso). I maschi, avendo un solo cromosoma X, potranno avere la prima forma oppure, più raramente, la seconda. Questa situazione non modifica in modo apprezzabile la visione di colori. Le donne, con due cromosomi X, potranno essere eterozigoti, avere cioè alcuni coni che esprimono *OPN1MW* e altri che esprimono *OPN2MW*. Si stima che questo avvenga circa nel 15% delle donne.

In teoria queste donne eterozigoti potrebbero avere una capacità di discriminare sfumature di colore migliore dei maschi o delle donne omozigoti e alcune osservazioni di fisiologia sembrano confermare questo fatto.

In molti animali possono coesistere fotorecettori assai diversi. E' tipico il caso del polpo e di altri cefalopodi che, oltre a possedere occhi con lenti estremamente complessi, hanno anche cellule fotosensibili nella pelle. Le cellule sensoriali della pelle del polpo contengono pigmenti fotosensibili simili a quelli che si trovano nella retina dell'occhio. In questo modo l'animale percepisce le variazioni nella luminosità e può mimetizzarsi immediatamente con l'ambiente, senza bisogno di input dagli occhi e dal cervello. Le straordinarie capacità di cambiare colore di questi animali, oltre che per il mimetismo criptico, sono anche implicate nella comunicazione intraspecifica.





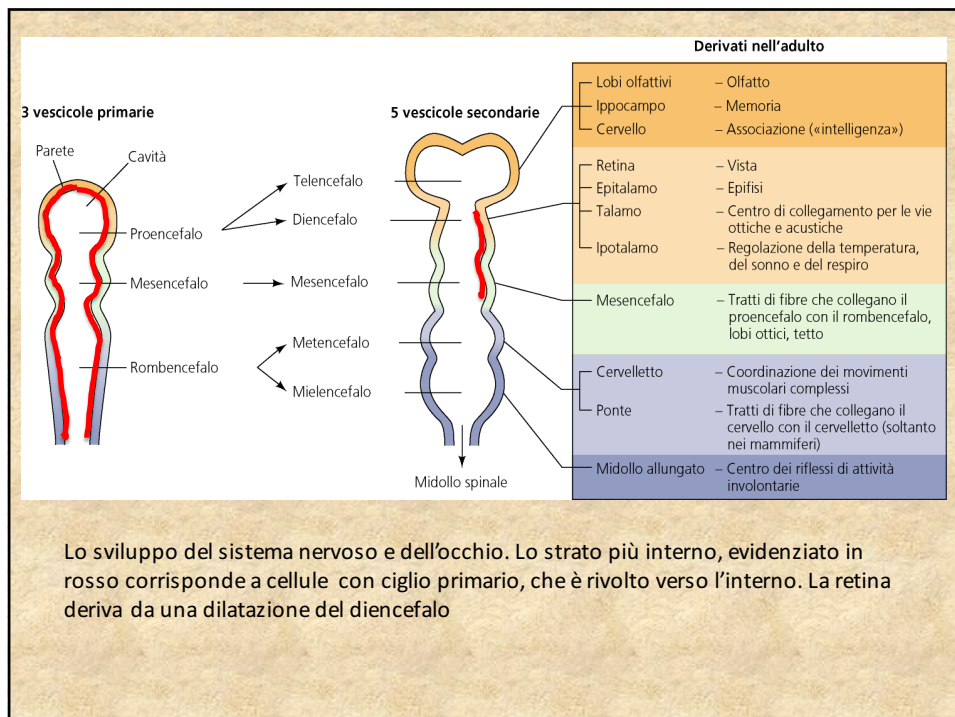
Dominanti di colore: lo stesso soggetto fotografato con diverse fonti di illuminazione: dal vero il nostro occhio non nota le dominanti giallastre o azzurre



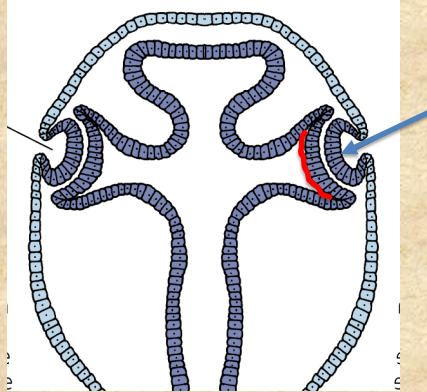
Dominanti di colore dovute alla illuminazione. In fotografia è evidente la forte dominante giallo-arancione. Il nostro occhio corregge automaticamente



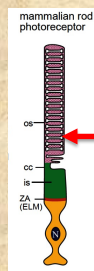
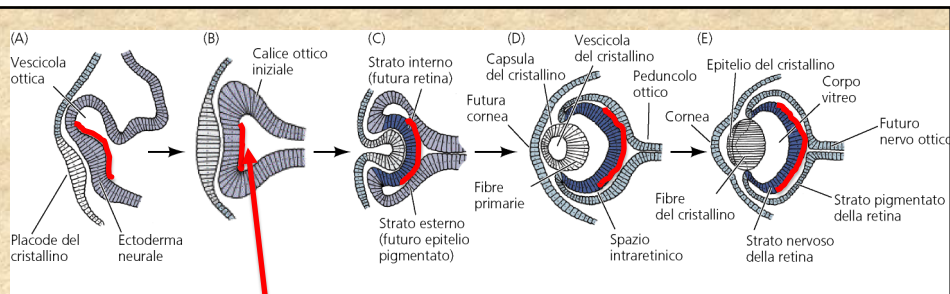
La stessa strada quando era illuminata con lampade a incandescenza (tungsteno) e dopo la sostituzione con lampade led. In fotografia la differenza è evidente, dal vero non si notavano differenze.



Formazione degli occhi



Le dilatazioni del diencefalo (vescicole ottiche) si ripiegano a coppa e formano la retina. E' evidente in rosso la posizione dello strato di cellule ciliate. Il cristallino (freccia) si origina invece da una introflessione dell'ectoderma



ciglia

Le diverse tappe della formazione dell'occhio. In rosso lo strato delle cellule ciliate, che rivolgono le ciglia verso l'interno. Le ciglia si differenzieranno in coni e bastoncelli, che quindi sono rivolti verso l'interno

