

Colpo d'OCCHIO



La parte ottica dell'occhio è composta dagli elementi indicati in questa immagine.

La **cornea** e il **cristallino** formano un sistema corrispondente a un obiettivo che focalizza sulla **retina** la luce proveniente dall'esterno.

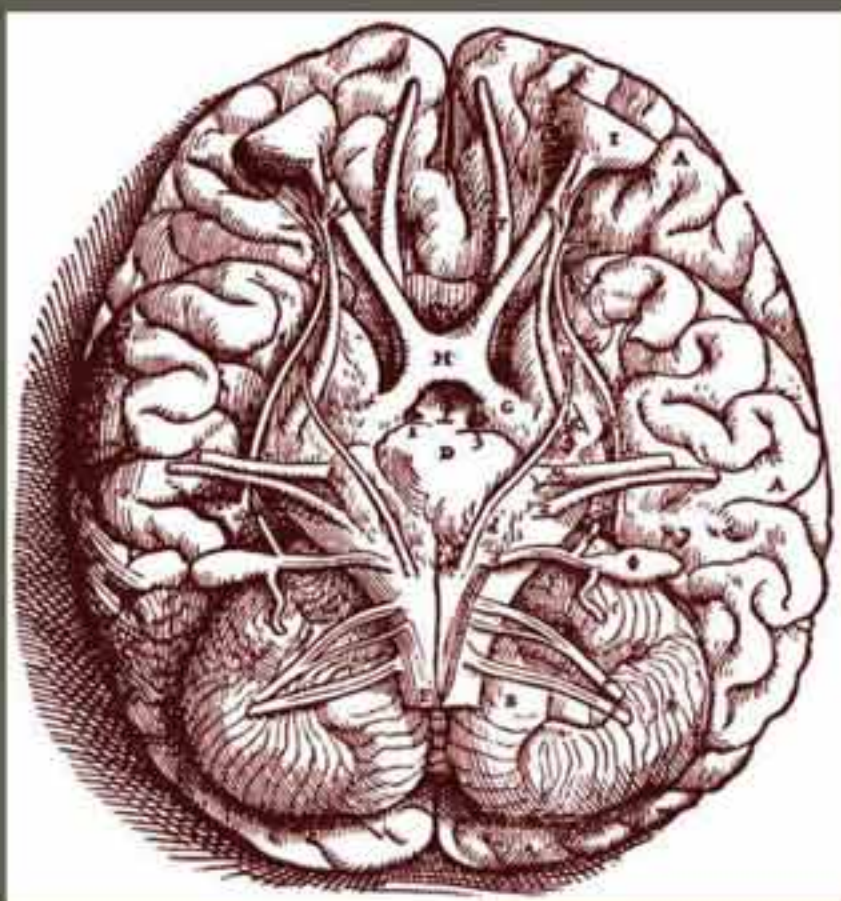
La **pupilla** (forame pupillare) corrisponde a un diaframma che, col suo allargarsi e restringersi, consente l'entrata nell'occhio di una quantità di luce sufficiente ad ottenere il funzionamento ottimale della retina senza che si verificano fenomeni di abbagliamento.

Tra la cornea e il cristallino si trova l'**umor acqueo**.
Tra il cristallino e la retina c'è l'**umor vitreo**.
Umor acqueo e umor vitreo rifrangono la luce con un'angolazione tale da far convergere l'immagine proprio sulla retina.



L'encefalo proteso sul mondo

È nella retina, un delicato e sottilissimo lembo di tessuto disteso sul fondo dell'occhio, che ha origine ogni nostra percezione visiva, dai più grandiosi spettacoli naturali al susseguirsi ordinato di lettere e parole su questo pannello. La retina non è una struttura sensoriale periferica, come la coclea dell'orecchio, ma è parte del sistema nervoso centrale: quasi un protendersi dell'encefalo verso il mondo esterno!



In questa illustrazione di Vesalius (1543), che mostra l'encefalo dal basso, è evidente la continuità anatomica fra quest'ultimo e le strutture ottiche (ombreggiate in giallo).



Fin dalle prime fasi dello sviluppo umano si constata la tendenza del cervello a spingersi in fuori frontalmente verso gli occhi per "toccare" la luce e "gettare uno sguardo sul mondo".



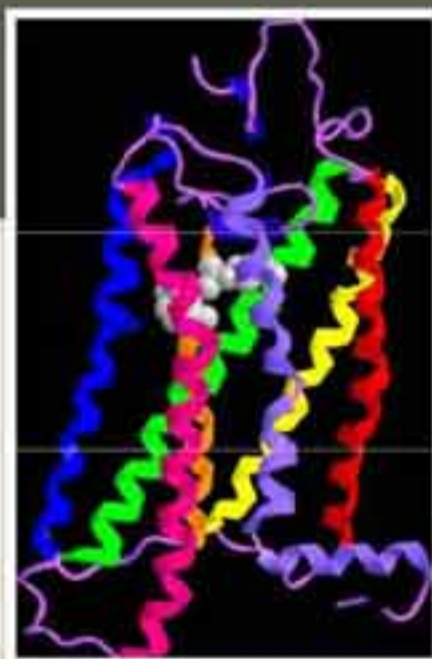
Cellule e molecole della visione



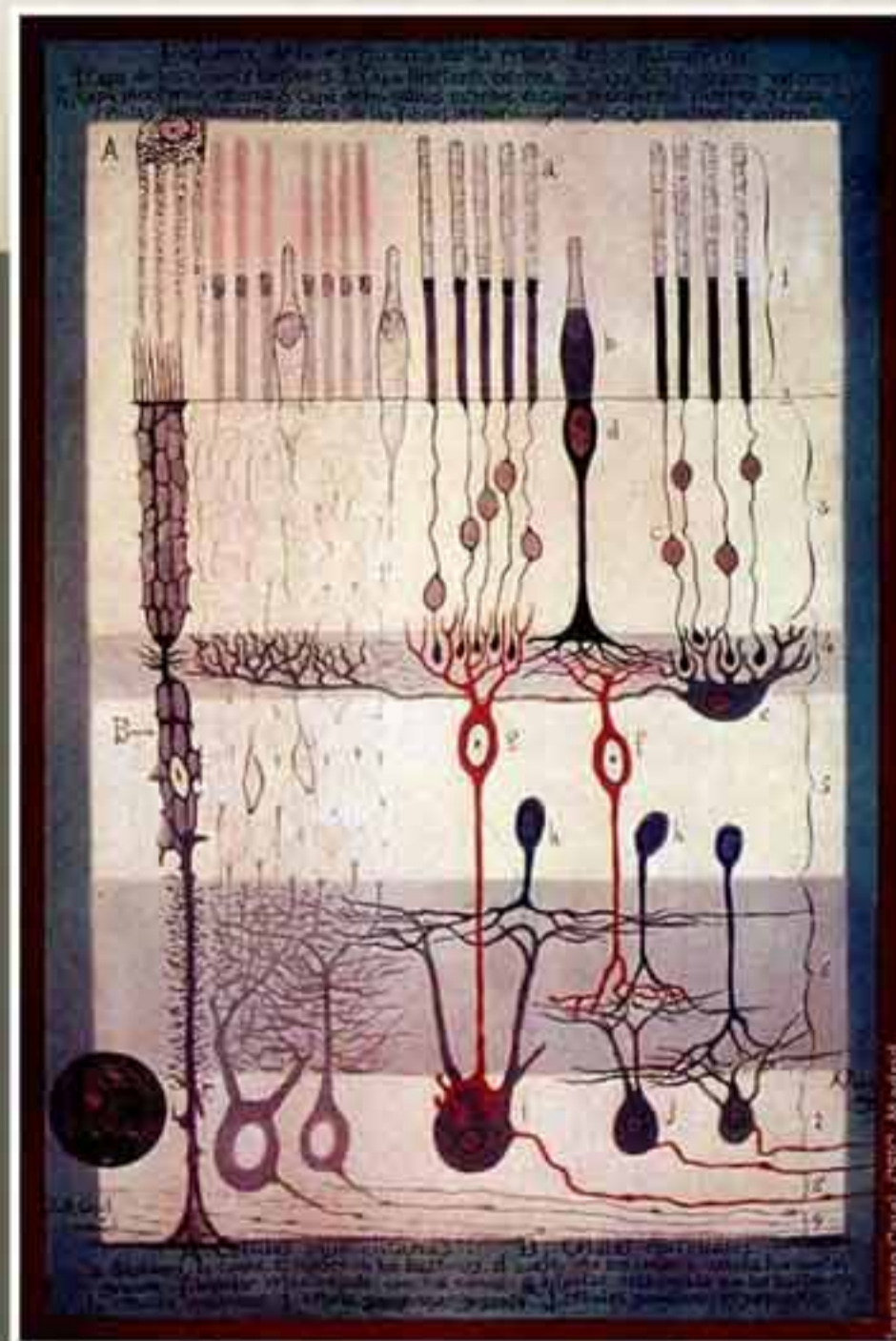
La retina contiene una distesa ordinata di cellule sensibili alla luce, i fotorecettori, che sono di due tipi: coni e bastoncelli. In una retina umana ci sono 6.500.000 coni e 120.000.000 di bastoncelli! La loro distribuzione non è uniforme lungo tutta la superficie della retina. Nella fovea (il punto di massima acuità visiva) essi sono molto più numerosi e addensati, mentre sono assenti nel punto di origine del nervo ottico.



I coni e i bastoncelli contengono in grande quantità una particolare proteina, chiamata opsina, combinata con una piccola molecola non proteica, il retinale 11-cis generato nelle cellule a partire dalla vitamina A. A seguito dell'assorbimento di luce il retinale 11-cis è convertito a retinale tutto-trans, è la chimica fondamentale della visione.



Struttura dell'opsina legata al retinale. La conversione fotochimica di quest'ultimo produce un cambiamento nell'organizzazione spaziale della proteina che dà il via alle reazioni che porteranno al segnale elettrico.



Coni (più rodi e tozzi) e bastoncelli (più allungati). L'opsina si trova nella porzione superiore delle cellule.

Cellule orizzontali

Cellule bipolari e amacrine
Con le cellule orizzontali, operano una elaborazione preliminare dell'immagine

Cellule gangliari
I suoi prolungamenti formano il nervo ottico

Oltre ai fotorecettori, la retina contiene decine di milioni di cellule neuronali di diversi tipi, connesse fra di loro in modo esteso e intricato a formare una fittissima rete. Questo disegno (ca. 1900) di Ramon y Cajal rappresenta i diversi tipi cellulari della retina e le loro connessioni.

Immagine al microscopio elettronico di coni e bastoncelli. Queste cellule sono in grado di generare un segnale elettrico a seguito di stimolazione luminosa.



Il meccanismo di TRASDUZIONE



La generazione di segnale elettrico è la modalità universale di comunicazione in tutto il sistema nervoso. Il video illustra il meccanismo di traduzione del segnale.

Il cambiamento conformazionale della rodopsina le permette di contattare ed attivare un'altra proteina (proteina Gt) la quale a sua volta contatta ed attiva un enzima (cGMP fosfodiesterasi, anch'essa una proteina). Questo enzima, quando attivato, promuove la degradazione di una piccola molecola, il GMP ciclico. L'abbassamento della concentrazione di GMP ciclico porta alla chiusura di un importante canale di membrana (un'altra proteina!) della cellula fotorecettore. Questo canale, al buio, rimane aperto grazie alla sua interazione con il GMP ciclico, e permette l'ingresso nella cellula di ioni sodio e calcio carichi positivamente. In assenza di GMP ciclico, però, la chiusura del canale fa cessare l'ingresso di ioni. Questo determina un cambiamento dello stato elettrico della cellula (iperpolarizzazione) che viene comunicato alle altre cellule neurali della retina, e quindi al cervello.



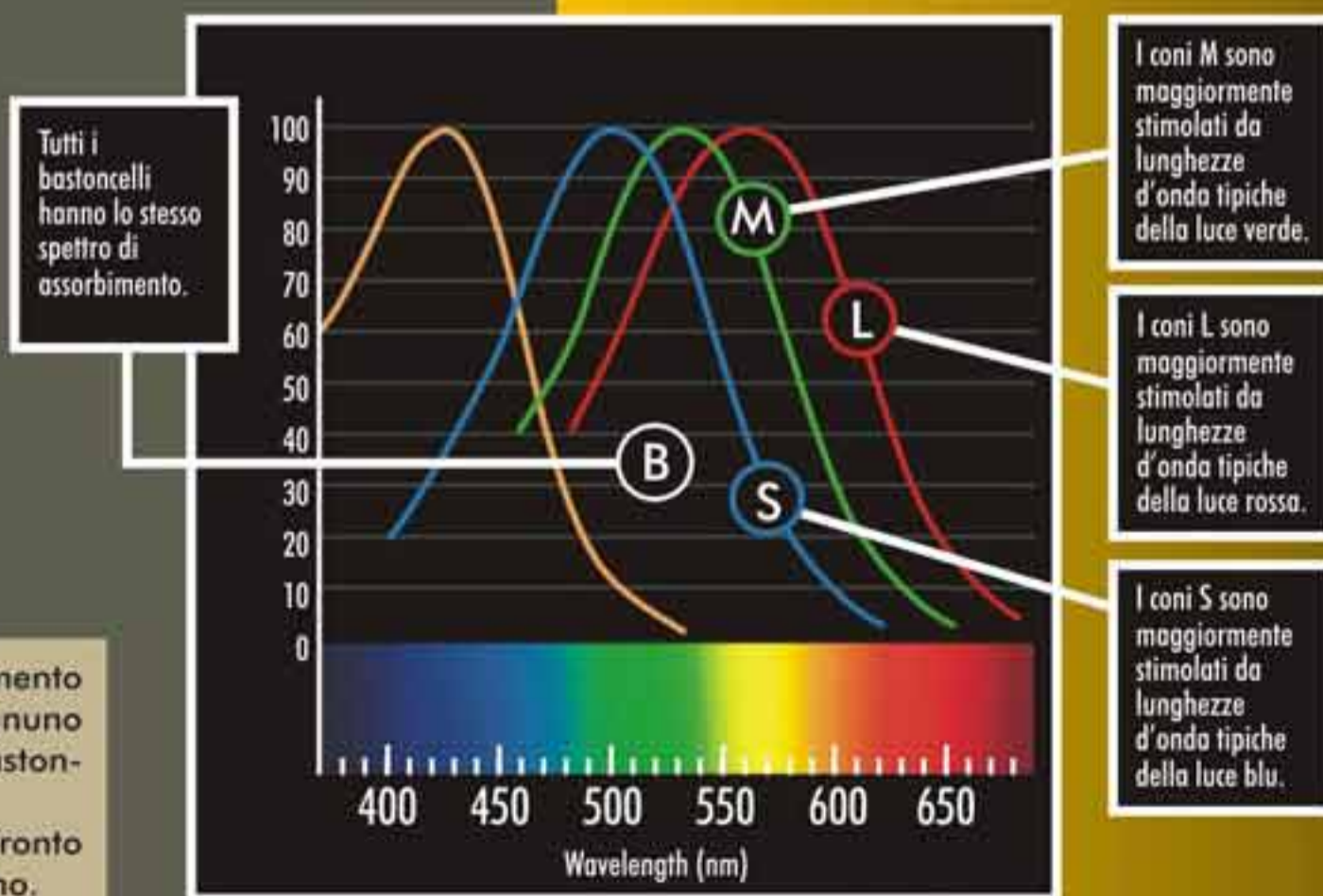
Perché vediamo in TECHNICOLOR

La retina è sensibile in un larghissimo intervallo di intensità luminose grazie all'esistenza di due tipi di fotorecettore a sensibilità molto diversa: i coni e i bastoncelli. I bastoncelli, molto più sensibili, garantiscono la visione notturna ma non discriminano i colori. Per questo la visione notturna è acromatica. I coni, meno sensibili, sono responsabili della visione dei colori. Il fondamento molecolare della visione dei colori è l'esistenza nella retina di diverse (tre nell'uomo) varianti di opsina (la proteina che lega il retinale) selettivamente presenti in tre diversi tipi di cono. Le piccole differenze fra le opsine dei tre tipi di cono fanno sì che, in seno a ognuna di esse, la reazione di trasformazione del retinale (che è unica) avvenga solo in un particolare intervallo di lunghezze d'onda della luce.



In assenza di ognuno dei tre tipi di cono, si hanno immagini con meno informazione, dove è più difficile distinguere fra cielo e prato. In presenza di un solo tipo di cono, l'immagine è acromatica.

La figura mostra gli spettri di assorbimento della luce dei diversi tipi di pigmento, ognuno dei quali selettivamente presente nei bastoncelli o in uno dei tre tipi di cono. La percezione del colore si basa sul confronto fra i segnali in uscita dai diversi tipi di cono.

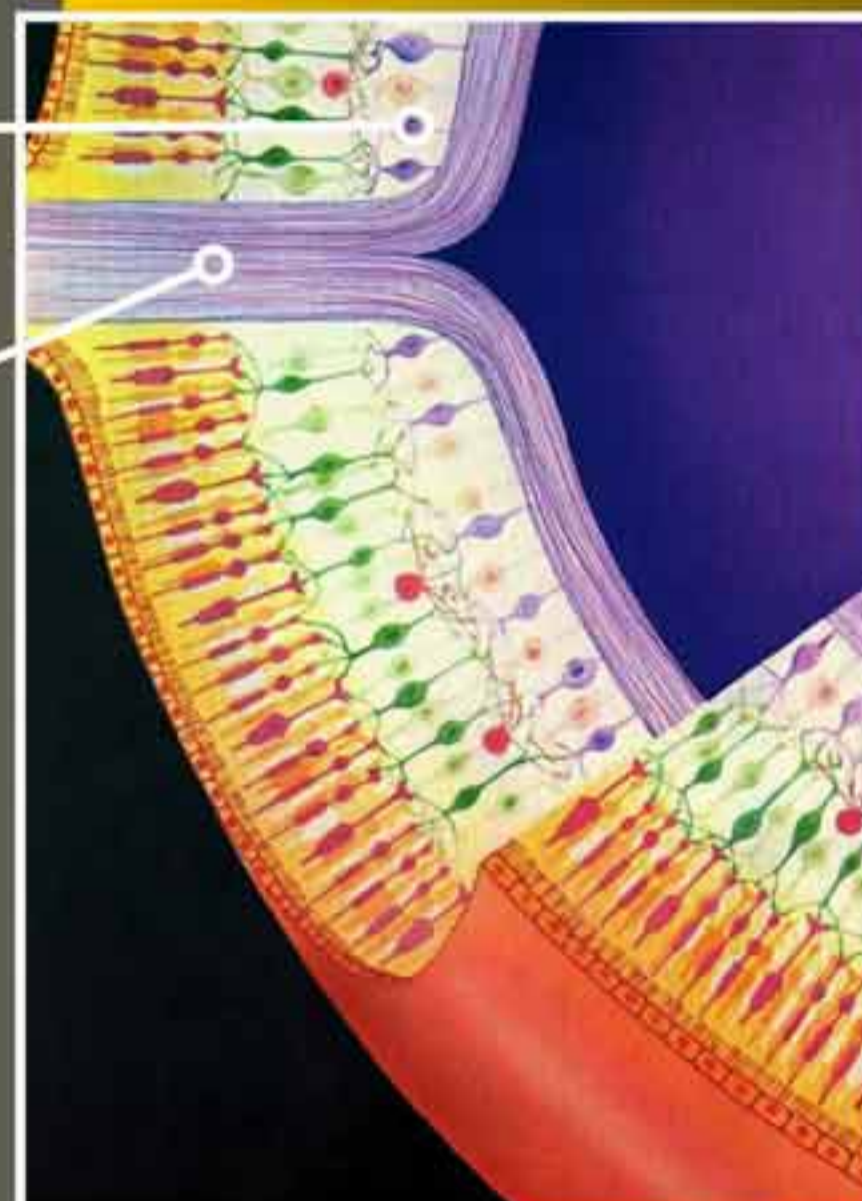


La retina come sensore digitale

La funzione della retina nella visione non si limita alla pura e semplice trasformazione di un segnale luminoso in segnale elettrico. In essa avviene infatti anche una prima elaborazione dell'immagine. Ai fini di questa elaborazione, un segnale analogico di ingresso (l'intensità luminosa percepita) viene trasformato in un segnale digitale di uscita diretto verso il cervello. In fisiologia per segnale digitale si intende una serie di impulsi elettrici detti spikes che viaggiano lungo un "cavo". Nel caso del sistema visivo il cavo è il nervo ottico che, formato dall'insieme degli assoni delle cellule gangliari (un assone o "fibra nervosa", è un sottile prolungamento di una cellula nervosa, un neurone, che conduce impulsi elettrici), collega la retina al cervello.

Le **cellule gangliari** convogliano i segnali elaborati nella retina verso i centri superiori dell'encefalo. I segnali scorrono lungo il **nervo ottico** formato dai prolungamenti delle cellule gangliari.

Sezione di nervo ottico vista al microscopio elettronico a scansione. Ogni singola fibra è un assone derivante da una cellula gangliare.



Sezione schematica di retina, che mostra l'organizzazione dei diversi strati neuronali e la loro convergenza sulle cellule gangliari.



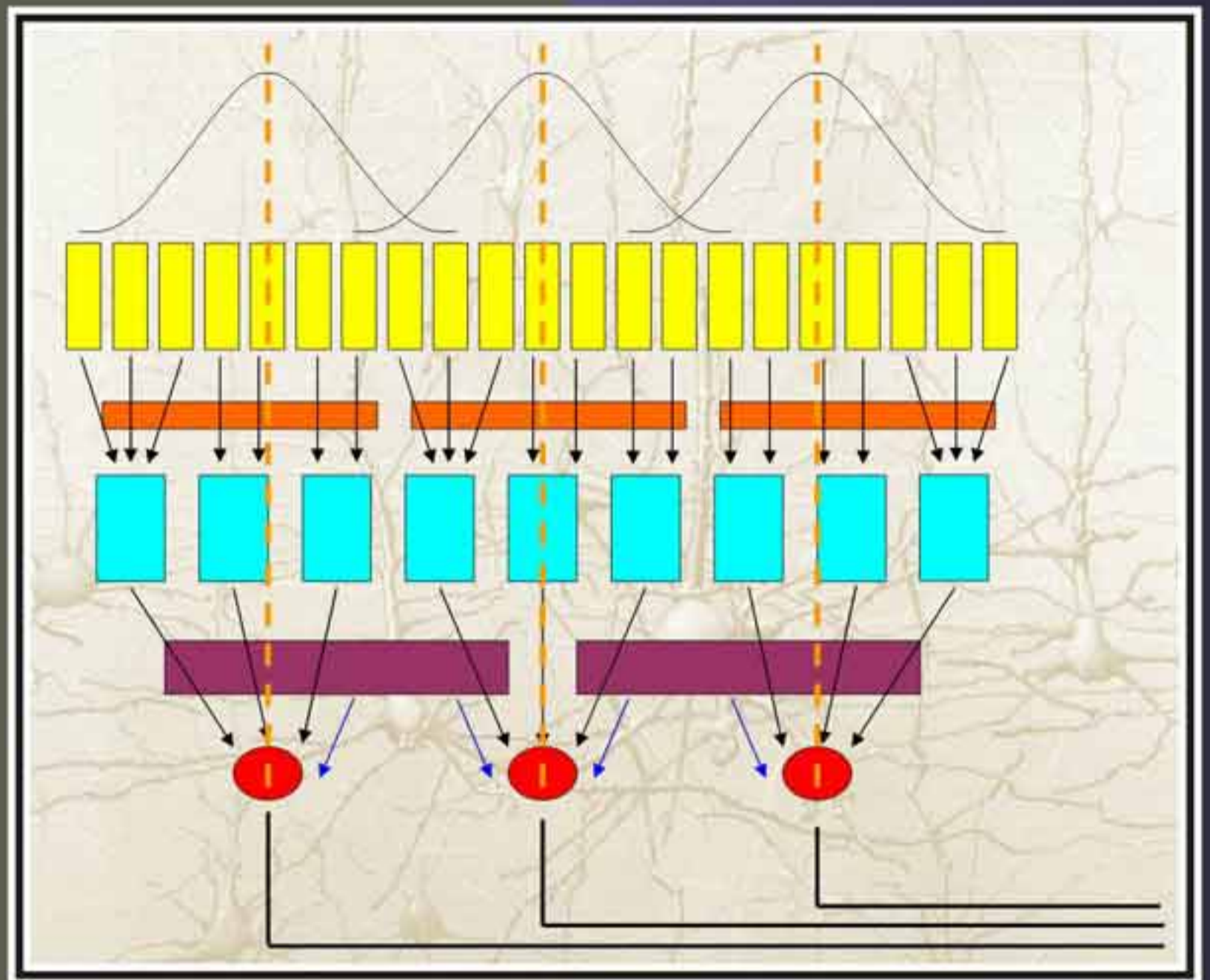
L'informazione impacchettata

La necessità di limitare le dimensioni del "cavo" di trasmissione per non intralciare la mobilità dell'occhio, impone di trasmettere tutta l'informazione raccolta da oltre 100 milioni di fotorecettori in un fascio di circa 1 milione di fibre nervose.

Per superare questa limitazione la natura adotta una serie di trucchi, tra cui la riduzione della ridondanza e la creazione di uno specifico codice di trasmissione molto efficiente.

In particolare, l'informazione proveniente dalla fovea, la zona di maggiore acuità visiva, è preservata il più possibile (una fibra per ogni recettore circa); le informazioni provenienti dal resto della retina sono invece fortemente codificate e "impacchettate".

Questa attività di elaborazione è svolta principalmente dalle cellule amacrine e gangliari.



Rappresentazione schematica degli strati cellulari della retina. Le frecce nere rappresentano il flusso di informazioni dai fotorecettori (in giallo) alle cellule gangliari (rosso), passando per cellule orizzontali (arancione), cellule bipolari (azzurro) e cellule amacrine (viola). Le curve in nero sopra i fotorecettori rappresentano i campi recettivi delle cellule gangliari, ovvero le regioni di spazio che, con diverse intensità, vengono registrate dalle cellule gangliari.



Ridurre la ridondanza

La ridondanza deriva dal fatto che punti vicini (spazialmente e temporalmente) hanno livelli simili di intensità luminosa e che le variazioni di intensità tendono ad essere lente e graduali (rispetto alla nostra velocità di percezione).

La strategia di riduzione della ridondanza si basa su semplici principi:

- 1) Non è conveniente trasmettere a breve distanza temporale una stessa immagine con piccoli cambiamenti; conviene invece trasmettere l'immagine una volta e negli istanti successivi trasmettere solo i cambiamenti.



- 3) La stessa cosa avviene a livello spaziale: variazioni rapide di contrasto (i contorni) sono "preferite" a zone più uniformi. Da ciò deriva la nostra abilità di riconoscere un oggetto anche da un semplice disegno che ne delinea i contorni.



- 2) Dovendo scegliere le informazioni da trasferire più rapidamente, hanno maggiore importanza le informazioni veloci rispetto a quelle lente; infatti il cervello giudica più importanti (spesso pericolosi) gli oggetti in moto rapido.

Supercodifica

La possibilità di codificare l'informazione deriva dalle diverse velocità di trasmissione delle cellule gangliari e del nervo ottico: le prime trasmettono a 3 bps (bit per secondo), il secondo invece trasmette a 14 bps.

È sperimentalmente verificato che la "potenza di trasmissione" del nervo ottico viene sfruttata interamente: ciò significa che a livello retinico l'informazione è codificata in modo superiore a quello della normale attività delle cellule gangliari.

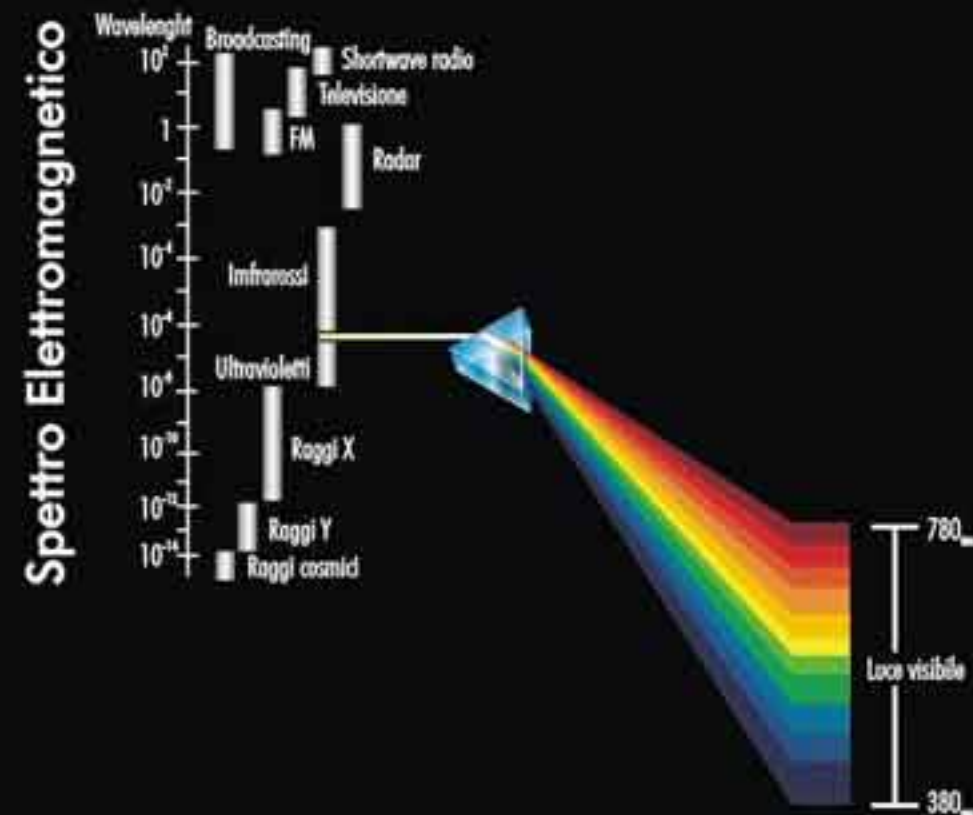


Tre numeri per un colore

La sensazione di luce è la più essenziale delle impressioni visive: ci fa distinguere superfici luminose da superfici nere; ma è propria anche delle sensazioni cromatiche.

La percezione del colore tuttavia non è riducibile alle sole caratteristiche fisiche del segnale luminoso ma coinvolge processi psicobiologici connessi all'interpretazione del segnale da parte del cervello. È un fenomeno soggettivo ma è sufficientemente simile fra individui diversi da permettere di descrivere il colore con risultati validi per la maggior parte delle applicazioni pratiche. Si basa sul principio della tricromia: nella retina ciascuno dei tre diversi tipi di coni manda al cervello un impulso che dipende dalla sensibilità spettrale del singolo cono e dalla distribuzione di energia dello stimolo luminoso. I tre impulsi sono gli stimoli fisiologici responsabili della produzione di una sensazione di colore: un dato colore è completamente individuato da tre numeri. Ne deriva, tra l'altro, che fasci di luce di diversa composizione spettrale possono dare luogo a una medesima sensazione di colore.

Nella banda visibile dello spettro elettromagnetico distinguiamo il porpora, tra 380 e 450 nm, il blu, tra 450 e 500nm, il verde, tra 500 e 570 nm, il giallo, tra 570 e 590 nm, l'arancione, tra 590 e 610 nm e il rosso, tra 610 e 780 nm.



Thomas Young scriveva nel 1801:

"...Ora poiché è praticamente impossibile supporre che ciascun punto sensibile della retina contenga un numero infinito di particelle, ciascuna capace di vibrare perfettamente all'unisono con ogni possibile andamento ondulatorio, diventa necessario ipotizzare che il numero sia limitato, per esempio ai colori principali: rosso, giallo e blu..."

Nell'intuizione di Young c'era solo un piccolo errore: non è il giallo ma il verde.



James C. Maxwell nel 1871 riconosceva l'importanza del lavoro di Young:

"...Può sembrare quasi una banalità affermare che il colore è una sensazione; e tuttavia Young, riconoscendo con onestà questa verità elementare, ha posto le basi della prima seria teoria sulla visione cromatica. Per quanto mi risulta, Thomas Young è stato il primo scienziato che, partendo dal fatto ben noto dell'esistenza di tre colori primari, ne cercò la spiegazione non già nella natura della luce ma in quella dell'uomo..."

