

Fisiologia sensoriale: Si prende il sistema biologico, si va a studiare le componenti più piccole e si va a capire l'organizzazione del sistema nelle componenti più piccole per capire come funzionano i sottosistemi un po' più grandi (bottom-up).

Psicofisica e psicologia sperimentale: Approccio top-down, perturbazione del sistema tutto intero e osservazione delle reazioni.

Caratteristiche dei recettori:

Specificità: Specializzati per una data modalità sensoriale, per una gamma ristretta dello stimolo.

Sensibilità: Risponde anche a stimoli di piccola intensità, a volte ai limiti fisici.

Es. Coni della retina, il cono rosso non ha il picco di sensibilità nel rosso ma è quello che risponde di più al rosso.

Processo di trasduzione dello stimolo: Trasformazione di uno stimolo in un'altro stimolo di differente natura.

Processo di amplificazione: spesso la trasduzione genera una variazione chimica nella cellula molto piccola, serve un'amplificazione del segnale trasdotto, i meccanismi variano molto da recettore a recettore, alcuni amplificano moltissimo come i bastoncelli e i recettori olfattivi. Una volta trasdotto e amplificato il segnale deve essere comunicato al sistema nervoso tramite sinapsi.

Curva di tuning: L'informazione ricevuta da un singolo fotorecettore è sempre ambigua, non si può ricostruire lo stimolo che ha generato il segnale osservando ad esempio solo i coni di una tipologia. Caratteristica comune a tutti i recettori. Può accadere anche che il segnale sia causato da uno stimolo diverso da quello per cui è specifico il recettore (es. i fotorecettori possono rispondere anche a stimoli meccanici). Nella retina il problema della specificità è risolto inserendo più tipi di recettori con curve di tuning diverse. Assumere che il rapporto tra l'attivazione dei fotorecettori si mantenga costante al variare dell'intensità luminosa mantenendo costante la lunghezza d'onda implica che la risposta all'intensità sia lineare, molto raramente è così.

Codifica di popolazione: Metodo di codifica estremamente usato nel sistema nervoso.

Limiti della codifica di popolazione: Nella realtà gli stimoli non sono mai monocromatici (tranne i laser). Stimoli policromatici possono produrre lo stesso segnale con combinazioni molto diverse di intensità delle varie lunghezze d'onda, processo sfruttato nel sistema RGB (**metamerismo**).

Il sistema alternativo è il sistema a linee dedicate, in cui serve un recettore per ogni singola lunghezza d'onda con una curva di tuning molto stretta, in questo caso sarebbe possibile fare un'analisi spettrale molto precisa. Ciò avrebbe portato ad una complessità della retina e dei circuiti associati probabilmente insostenibile.

Funzione psicometrica: Rapporto tra intensità dello stimolo e intensità percepita.

Il valore di intensità dello stimolo percepita dal 50% della popolazione prende il nome di **soglia percettiva assoluta**, misurata in assenza di stimolo di background.

La soglia misurata in presenza di background invece si chiama **soglia differenziale**.

Legge di Weber: Se si aumenta il background la soglia differenziale aumenta proporzionalmente secondo un fattore detto costante di Weber. (legge empirica).

La legge di Weber non è sempre valida, se lo fosse basterebbe abbassare il background per ottenere una soglia che tende a 0. In realtà per stimoli molto piccoli il rumore di fondo impedisce il discernimento del segnale e per stimoli molto forti il recettore o le vie che trasportano il segnale vanno in saturazione.

La valutazione psicometrica ha difetti: dipende dal soggetto di prova. Per evitare le variazioni dovute all'umore si applica la tecnica della scelta forzata, costringendo il soggetto a rispondere sempre.

Codifica dell'intensità dello stimolo e adattamento:

Alcuni recettori trasducono direttamente in uno stimolo nervoso. La frequenza delle scariche aumenta con l'intensità dello stimolo. Si può avere lento adattamento (informazione statica) o rapido adattamento (informazione dinamica). L'adattamento interessa tutti i recettori, alcuni adattano poco, ma mai zero.

Alcuni recettori non generano potenziali d'azione ma variano il loro potenziale di membrana (es. fotorecettori). Anche il fotorecettore presenta adattamento, un aumento dello stimolo causa un picco (negativo) del segnale seguito da un piccolo ritorno verso il potenziale iniziale.

L'adattamento è fondamentale per evidenziare le novità, ovvero i cambiamenti negli stimoli.

Campionamento:

Compromesso tra la densità spaziale dei recettori e la complessità della circuiteria necessaria all'elaborazione del segnale. I sensi devono essere sufficientemente precisi da distinguere una preda da un predatore ma abbastanza semplici da limitare la complessità e quindi l'ingombro ed il consumo energetico del sistema di elaborazione. Es. sensibilità tattile molto precisa sui polpastrelli, più grossolana sulla schiena.

Convergenza: Se si disponessero i recettori lontani tra loro avremmo zone funzionalmente cieche, invece se si fanno convergere i segnali di più recettori su un numero minore di neuroni di second'ordine si semplifica il circuito senza generare zone cieche.

Aliasing: I recettori devono campionare lo spazio sensoriale ad intervalli adeguati a rappresentare fedelmente le frequenze tipiche degli stimoli. Succede quando la lunghezza d'onda dello stimolo (la distanza tra i picchi, possono essere ad esempio bande in un'immagine o punte di un pettine) approssima la distanza tra i recettori (tecnicamente il doppio della distanza tra recettori).

Perché non percepiamo l'aliasing? Nell'occhio la soluzione è fornita dalla leggera sfocatura dell'immagine dovuta alle imperfezioni dell'occhio. Nella percezione tattile dalla rigidità dell'epidermide: irregolarità la cui distanza approssima la distanza tra recettori l'epidermide non può formare una singola indentazione per ogni sporgenza della superficie, così si eliminano le frequenze alte che genererebbero segnali aberranti.

Un'altra soluzione è la convergenza: facendo convergere più recettori sugli stessi neuroni post-sinaptici si eliminano ugualmente le frequenze alte aberranti.

La retina in realtà presenta una densità di coni blu inferiore, si riesce infatti a generare aliasing usando pattern blu in un soggetto con vista buona.

Parallelamente alla convergenza si ha anche divergenza quando è necessario notificare uno stimolo a più sistemi neuronali diversi.

L'adattamento avviene a livello neuronale piuttosto che recettoriale (?).

Eliminazione del Rumore: generato dai processi biologici che possono sovrastare la trasduzione generata da stimoli deboli generando falsi positivi (NdA e falsi negativi). Una possibilità per ridurre il rumore è la convergenza (facendo la media del segnale proveniente da più recettori si riduce il rumore perché ha natura additiva ed essendo casuale la sua distribuzione è una gaussiana con media 0). Altra strategia simile è la coincidenza dell'attivazione di più recettori.

La Visione

Non comparare troppo rigidamente l'occhio umano ad una macchina fotografica!

Nelle macchine la distribuzione dei fotositi è uniforme, nell'occhio umano la "risoluzione" è più alta al centro del campo visivo rispetto alla periferia. In realtà la distribuzione di coni e bastoncelli è uniforme ma la retina periferica presenta una convergenza maggiore.

Alcuni animali hanno retine uniformi, ad esempio i topi, in questi animali i movimenti oculari sono molto ridotti rispetto all'uomo.

Adattamento alla luce: è necessario adattare la sensibilità alla luce per evitare di saturare i neuroni a qualche punto della catena percettiva. L'adattamento alla luce non è un fenomeno globale ma avviene in maniera locale.

Nesso tra movimento e percezione: La percezione del mondo scaturisce dall'integrazione di informazioni visive e motorie. Il sistema nervoso tiene conto dei comandi inviati ai muscoli oculomotori e sottrae l'alterazione che si aspetta dovuta al movimento oculare dalla percezione visiva.

Luminanza delle superfici: Misura della luce emessa per unità di superficie (unità di misura: 1 candela/m²). Circa la luminanza di una superficie bianca illuminata da una candela alla distanza di 1 metro. La percezione della luminanza non dipende dalla distanza dell'occhio dalla superficie perché al diminuire dei fotoni che colpiscono la retina diminuisce anche di pari passo l'area di retina sulla quale si proietta l'immagine della superficie.

La retina mantiene la capacità di percepire informazioni in un range che va da 10⁻⁶ a 10⁶ Cd/m² (12 ordini di grandezza). Oltre 10⁷ circa iniziano i danni retinici, come limite inferiore abbiamo la soglia assoluta di percezione.

I coni non vanno in saturazione, i bastoncelli sì.

Fattori che permettono un così ampio range di funzionamento:

- Diametro pupillare: varia da 8 a 2 mm, fattore = 16, 1.2 ordini di grandezza.
- Presenza di recettori diversi: coni e bastoncelli (si pensa che i bastoncelli lavorino fino a circa 100 Cd/m², i coni lavorano da 10⁻³ fino al limite massimo).
- Meccanismi biochimici di adattamento alla luce ed al buio.
- Meccanismi di adattamento sinaptico.

Nella retina umana coni e bastoncelli non sono distribuiti in modo uniforme. Altri animali hanno distribuzioni differenti, ad esempio la retina del topo non è un buon modello per la retina foveale umana, ma di quella periferica. La similitudine tra retina murina e umana periferica si pensa dipenda dagli antenati comuni che si muovevano di notte (bastoncelli) perché di giorno erano attivi grandi rettili. La retina umana è adattata alla visione notturna tranne la fovea, filogeneticamente più recente. L'inserzione del nervo ottico genera un punto cieco a circa 15° in direzione temporale, normalmente non ci accorgiamo della sua presenza perché il sistema nervoso lo riempie (tipo filtri photoshop).

L'assenza di bastoncelli nella fovea fa sì che la sensibilità alle sorgenti di luce deboli sia migliore nella visione periferica: di giorno dobbiamo scorrere lo sguardo, di notte no ma vediamo di meno al centro del campo visivo.

Origine filogenetica dei fotorecettori:

Il fotorecettore ancestrale era con ogni probabilità un cono, le modificazioni dei bastoncelli sono frutto di specializzazioni successive. La formazione di nuovi dischi nei primi stadi è apparentemente uguale nel cono e nel bastoncello.

Il versante sinaptico del cono è una struttura "a nastro" e forma contatti con molte cellule, per lo più neuroni bipolari.

La sinapsi del bastoncello è molto più piccola e contatta meno cellule.

Il segmento esterno del bastoncello è molto più grande rispetto a quello del cono, infatti non si vedono i segmenti esterni dei coni.

La retina periferica rappresenta la maggior parte della retina quindi quasi tutta la retina è in realtà costituita da segmenti esterni dei bastoncelli (conferiscono migliore visione notturna).

La captazione dei fotoni e l'amplificazione del segnale avvengono nel segmento esterno, il contatto sinaptico in quello interno. Per trasferire il segnale da un lato all'altro del neurone si usa il potenziale di membrana.

Nel segmento esterno non ci sono canali ionici significativi, nel segmento tra segmento esterno ed il nucleo ci sono canali per il K^+ **non** modulati dal potenziale di membrana, la fuoriuscita di potassio porta ad iperpolarizzazione di potassio che tende al potenziale di riposo del potassio. Agiscono anche altri canali (HCN), che fanno passare sodio e potassio attivati da iperpolarizzazione, K è vicino all'equilibrio e ne passa poco, Na è molto lontano dall'equilibrio ed entra in grande quantità. Si mantiene così l'equilibrio elettrico, per quello chimico c'è la Na/K ATPasi. Alla luce saturante il potenziale si stabilizza a circa -70 mV, il bottone sinaptico non rilascia neurotrasmettitore. Al buio si aprono i canali CNG che fanno entrare Na e Ca generando una corrente depolarizzante che si propaga al segmento interno tramite il ciglio che collega segmento esterno e segmento interno. I canali HCN si chiudono (sono aperti dalla iperpolarizzazione) Il nuovo equilibrio è a circa -45 mV. Nel segmento esterno c'è uno scambiatore Na , Ca , K attivo secondario che importa sodio ed estrude calcio. In luce saturante il calcio è a circa 100 nM, al buio circa 500 nM.

Quando il potenziale supera la soglia nel bottone sinaptico entra calcio che fa rilasciare le vescicole di glutammato.

Pigmenti visivi: cromoforo + apoproteina

Opsine: Recettori accoppiati a proteine G (trasduttori). Formano legame covalente con residuo Lys 296 con gruppo prostetico derivato da vit. A (11-cis-retinale). Lo spettro di assorbimento è modulato dalla struttura della proteina.

L'assorbimento di un fotone fa trasformare l'11-cis-retinale in retinale tutto-trans che induce cambiamento conformazionale nella proteina cromoforo e nell'opsina.

I recettori associati a proteine G sono trans-membrana, si trovano con un capo nel disco (organello intracellulare) e con l'altro nel citosol. I recettori associati a proteine G tendono ad essere associati a coppie, sembra che questi dimeri si associno a formare "binari" tutti orientati parallelamente (mantenuti in posizione dal citoscheletro) (modelli da rivedere perché in questo caso i recettori sono stazionari e sono le proteine G a diffondere).

Si conoscono 3 conopsine e 1 rodopsina, si pensa che siano originate da duplicazioni e successive mutazioni dello stesso gene primordiale (spiega anche il motivo della sovrapposizione delle curve di tuning, la conopsina verde e quella rossa sono di origine relativamente recente e le loro sequenze amminoacidiche sono ancora molto simili, molto di più rispetto alle conopsine blu e verde).

Come si fa a determinare la curva di tuning di un fotorecettore?

Si misura il potenziale di membrana di un cono/bastoncello isolato ed adattato al buio che viene esposto a flash di luce a lunghezza d'onda diversa ma di intensità costante (costante il numero di fotoni medio che colpiscono una unità di superficie). Per rappresentare in un grafico il grande range di intensità luminosa a cui risponde un fotorecettore si usa una scala logaritmica dell'intensità luminosa.

In realtà il potenziale del fotorecettore non è un segnale "pulito" ma contiene rumore dovuto all'attivazione termica degli enzimi legati alla catena di trasduzione, l'iperpolarizzazione non può essere più misurata quando la sua ampiezza è inferiore a quella del rumore.

In realtà secondo le leggi della percezione viste prima la sensibilità (e quindi la iperpolarizzazione) non scende mai a zero ma diventa molto piccola.

Per misurare sensibilità molto piccole si può fissare un obiettivo di iperpolarizzazione e aumentare l'intensità luminosa fino ad ottenere l'iperpolarizzazione voluta.

Il numero di fotoni (intensità luminosa) necessario ad ottenere la stessa iperpolarizzazione varia enormemente al variare della lunghezza d'onda, per questo si rende necessario il grafico in scala logaritmica.

Se spostiamo la lunghezza d'onda verso il rosso la sensibilità precipita verso valori infinitesimali, se invece ci spostiamo verso l'ultravioletto la sensibilità cala poco.

Perché allora non vediamo gli ultravioletti? Perché cornea e cristallino si presentano praticamente opachi nell'ultravioletto e li filtrano (ecco perché si danneggiano).

Il grafico che otteniamo in questo modo in realtà si “impenna” verso il rosso (aumentano i fotoni necessari per ottenere la stessa stimolazione). Come si ottiene allora il grafico bellino?

- Invertiamo il segno del logaritmo.
- Poniamo il valore (logaritmico) a cui si trova il picco a 0 (normalizziamo).

Esperimento di psicofisica (<https://www.jneurosci.org/content/jneuro/30/37/12495.full.pdf>)

Obiettivo dell'esperimento: determinare la soglia percettiva assoluta del topo per uno flash luminoso di breve durata e di piccole dimensioni.

I topi non possono parlare quindi i ricercatori si sono inventati questo metodo per rilevare se il topo ha visto o meno lo stimolo: addestrare i topi che possono smettere di correre (ai topi piace molto correre sulla ruota di notte) per andare a bere solo se hanno visto un flash luminoso (l'abbeveratoio eroga acqua solo per 12 s in seguito allo stimolo luminoso). Lo stimolo viene presentato ad intervalli casuali da 200 a 500 giri di ruota, è considerato come rilevato se il topo si ferma entro due giri di ruota dopo la presentazione dello stimolo.

Risultato: la soglia assoluta misurata per uno stimolo a 500 nm con un angolo di ampiezza di 5.3° è stata di 67 ± 6 (intervallo di confidenza 95%) fotoni misurati alla cornea (molto simile a quanto misurato nell'uomo da Hecht et al., 1941). Considerando che uno stimolo di questa ampiezza si proietta su un'area di retina che contiene circa 8350 bastoncelli la probabilità che uno di essi abbia ricevuto più di un fotone è trascurabile (<0.003) ne deduciamo che i bastoncelli sono capaci di rispondere ad un singolo fotone (che causa una singola isomerizzazione del retinale).

Da qui l'esperimento prosegue per analizzare la sommazione spaziale dello stimolo variando la dimensione del disco luminoso. Si osserva che per stimoli sufficientemente piccoli la soglia risulta inversamente proporzionale alla dimensione del disco (come previsto dalla legge di Ricco), mentre per stimoli la cui proiezione sulla retina è compresa tra 1000 e 10000 μm^2 (400-4000 bastoncelli) la soglia è molto più bassa del previsto (effetto di **supersommazione spaziale**). Il modello sviluppato dai ricercatori per spiegare questo fenomeno si basa su tre assunzioni:

- 1) Singole isomerizzazioni delle rodopsine possono essere rilevate e trasmesse dai bastoncelli ai neuroni di livello più elevato. (Provata nella prima parte dell'esperimento e da Hecht et al. 1941, Barlow et al. 1971, Mastrorade 1983).
- 2) Le isomerizzazioni che avvengono a causa dell'agitazione termica (“al buio” perché non dipendono dai fotoni, le possiamo considerare come falsi positivi) avvengono e sono indistinguibili da quelle indotte da stimoli luminosi. (Provata da Barlow et al. 1971, Mastrorade 1983, Baylor et al. 1979).
- 3) Cellule gangliari tappezzano la retina ed hanno campi ricettivi descritti da gaussiane che si sovrappongono tra cellule gangliari vicine.

Questo modello sostiene che la sommazione spaziale per i target più piccoli sia soddisfatta perché lo stimolo cade principalmente su un singolo campo ricettivo e quindi eccita una cellula gangliare molto più delle circostanti. Invece la supersommazione avviene per target che generano un simile livello di eccitazione in due o più cellule gangliari vicine, l'effetto combinato delle isomerizzazioni termiche e quelle luminose fa in modo che la stimolazione delle cellule gangliari superi la soglia dei neuroni a valle nella catena di trasmissione verso il sistema nervoso.

Modello alternativo: Una spiegazione alternativa attribuisce alle cellule amacrine AII la supersommazione, la plausibilità di questa spiegazione dipende dalle dimensioni del campo ricettivo delle cellule amacrine nel topo. Studi nella retina di gatto (che ha una densità di bastoncelli molto vicina a quella del topo) hanno evidenziato che una cellula amacrina AII riceve afferenze da circa 300 bastoncelli, mentre studi nel topo hanno mostrato che le gap-junctions potrebbero ampliare il campo ricettivo fino 4 volte. Se il campo ricettivo delle cellule amacrine AII è di circa 1200 bastoncelli (vicino ai 2000 per i quali l'effetto di supersommazione è massimo) non si può escludere questa seconda ipotesi.

Un'altra ricerca (quale?) misurò la soglia minima del sistema visivo umano a 5-6 foto-isomerizzazioni.

Perché la dimensione ottimale è proprio quella che è? Osservando le cellule gangliari sulla retina si nota che l'albero dendritico della maggior parte di esse ha un diametro pari a quello della proiezione del disco avente il diametro ottimale misurato prima. È la cellula gangliare ad integrare i segnali ricevuti da circa 3000 recettori ed attivarsi solo se si rilevano circa 12 trasduzioni. (non torna proprio tanto).

Alcune specie presentano il **tapetum lucidum**, uno strato di tessuto riflettente oltre la retina che riflette la luce di nuovo attraverso i bastoncelli. Aumenta la sensibilità alla luce ma produce una leggera sfocatura, è tipico di animali che hanno vita notturna e non presentano una fovea sviluppata.

Quale è l'iperpolarizzazione generata da un singolo fotone?

Non si può "sparare" un singolo fotone, si devono usare filtri attenuatori in modo da avere statisticamente la probabilità che un singolo fotone colpisca il recettore. Si tratta quindi sempre di fenomeni probabilistici che richiedono analisi di tipo statistico.

Classicamente si era stimata la variazione di potenziale di un bastoncello in risposta ad un singolo recettore a circa 1 mV, più recentemente (Cangiano et al. 2012, <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2011.226878>) si è misurata nella retina di ratto una variazione di potenziale (media della variazione di potenziale/media del numero di fotoni assorbiti) di 3.32 mV (Standard Deviation 1.18) oppure (aumento di varianza/risposta media) 3.55 mV (SD 1.55) a 24°C (vicino alla temperatura ambiente) mentre a 36°C (vicino alla temperatura corporea) si è misurata una risposta (media della variazione di potenziale/media del numero di fotoni assorbiti) di 2.35 mV (SD 0.82) oppure (aumento di varianza/risposta media) 2.57 mV (SD 1.33)

Catena fototrasduttiva del bastoncello

- 1) Attivazione della rodopsina. Una singola rodopsina rimane attiva per un tempo medio di 36 ms.
- 2) Attivazione delle proteine G: In media sembra che una singola rodopsina attivi 20 proteine G.
- 3) Attivazione della fosfodiesterasi: Le proteine G si legano e disinibiscono la fosfodiesterasi che aumenta la sua attività catalitica degradando cGMP (presente in elevata concentrazione nel segmento esterno).
- 4) Idrolisi della cGMP: Al buio si ha un equilibrio tra sintesi e degradazione, alla luce PDE ne degrada grandi quantità.
- 5) Chiusura dei canali ionici: Al buio cGMP tiene aperta una piccola parte dei canali di membrana, (canali CNG, cyclicnucleotide gated) (meccanismo cooperativo tra più molecole, l'apertura dei canali varia con il cubo della concentrazione di cGMP quindi una piccola diminuzione della concentrazione di cGMP si traduce in una grande diminuzione dei canali aperti).

La chiusura di canali altera il potenziale come detto prima.

La corrente che attraversa il segmento esterno è misurata con le micropipette a suzione, per convenzione la corrente al buio si indica come negativa, in condizioni di saturazione la corrente si porta a 0 (una volta chiusi tutti i canali non se ne possono chiudere altri).

In un bastoncello di anfibio (molto più grande) la risposta è molto più lenta (perché la stessa velocità delle reazioni in un volume maggiore impiega più tempo a produrre la stessa depolarizzazione).

La risposta alla luce dei recettori ha andamento quadratico (il grafico è una parabola), nella pratica questo comportamento è seguito solo dalla primissima fase di attivazione, poi si ha una deviazione della quale è responsabile il meccanismo di spegnimento della risposta.

Elettroretinogramma(ERG)

Si applica un elettrodo alla cornea (tramite lente a contatto) ed un altro in un'altra parte del corpo e si misura la differenza di potenziale transretinica (tra versante corneale e versante sclerale). La genesi del segnale è complessa per via delle correnti in gioco che prendono percorsi diversi.

Per flash deboli si ottiene solo un'onda positiva detta **onda b**, per flash più intensi la risposta è bifasica, si presenta prima un'**onda a** negativa e poi l'onda b positiva.

L'onda a è dovuta ai fotorecettori ed alle loro correnti generate dalla catena trasduttiva, l'onda b è generata dalle cellule bipolari.

Perché con flash deboli si vede solo l'onda b? Perché grazie alla grande convergenza le cellule bipolari si attivano già per stimolazioni sparse dei bastoncelli.

ERG scotopico: studia solo i bastoncelli.

ERG fotopico: studia i coni.

L'andamento iniziale dell'onda a ha andamento parabolico, dopo un certo tempo la risposta reale diverge da quella prevista dal modello, da ciò deduciamo che nel modello manchi la descrizione di una parte del fenomeno reale, tale parte è la **terminazione della risposta alla luce**.

Terminazione della risposta alla luce:

Dobbiamo spegnere la rodopsina attivata, se ne occupa la rodopsina chinasi, la rodopsina si può fosforilare in più punti, ogni fosfato aggiunto rallenta la risposta della rodopsina. L'arrestina blocca completamente l'attività della rodopsina. In un occhio adattato al buio l'emivita della rodopsina è di circa 36 ms.

Per spegnere la fosfodiesterasi la trsdicina idrolizza il suo GTP e si stacca dalla fosfodiesterasi, la quale interrompe la sua attività.

Al contempo cala la concentrazione intracellulare di calcio a seguito della chiusura dei canali CNG, ciò porta a:

- Dissociazione della recoverina dalla rodopsina chinasi (disinibizione dell'rodopsina chinasi)
- Modifica conformazionale della GCAP (guanylate cyclase activating protein, sensore di calcio) con facilitazione della guanilato ciclasi.
- Dissociazione della calmodulina dai canali CNG (aumento della loro sensibilità al cGMP).

Al buio l'attività della rodopsina chinasi è tenuta bassa dal calcio, quando cala la concentrazione di calcio aumenta l'attività della chinasi che riduce l'attività della rodopsina.

La guanilato ciclasi è costitutivamente (poco) attiva perché inibita dalla GCAP, in caso di bassa concentrazione di calcio la GCAP è meno attiva perciò aumenta l'attività della guanilato ciclasi che ripristina la concentrazione di cGMP (che era calata in risposta allo stimolo luminoso).

La calmodulina in presenza di calcio inibisce l'apertura dei canali CNG, in carenza di calcio i canali CNG si aprono.

Se lo stimolo luminoso è molto forte si ha un plateau più lungo (saturazione) perché il calo di concentrazione di cGMP è importante ed è necessario più tempo perché venga ripristinata.

I coni hanno meccanismi più efficienti di recupero quindi resistono meglio alla saturazione.

Nel grafico della risposta ai flash saturanti si osserva un picco di iperpolarizzazione, a cosa è dovuto? (#TODO)

I coni hanno una sensibilità alla luce minore di circa due ordini di grandezza inferiore a quella dei bastoncelli. Cos'è che conferisce ai bastoncelli di operare così tanto al di sotto della soglia del sistema dei coni? La convergenza delle vie nervose.

Grazie ai meccanismi di terminazione l'emivita dell'opsina attivata è di circa 36 ms nei bastoncelli e 3 ms nei coni.

La variazione di potenziale in risposta ad un singolo fotone è di circa 2 mV nei coni e inferiore a 0.2 mV nei coni. Il problema nella ricerca sui coni è che la loro risposta è inferiore al rumore biologico (la fosfodiesterasi è termicamente instabile).

Nella maggior parte dei casi però il nostro sistema visivo non è attivato da flash luminosi, è continuamente esposto ad una intensità luminosa di base. Esperimento: manteniamo una luce costante ed esponiamo i recettori a flash.

La presenza del background luminoso implica una continua attivazione della catena fototrasduttiva. Il calcio in presenza del background luminoso non è al suo valore al buio ma è più basso.

Come abbiamo visto il calo di $[Ca]$ promuove la terminazione della risposta, in questo caso la risposta è continuamente terminata. A parità di densità di fotoni che colpiscono la retina al momento del flash si hanno infatti risposte che terminano più rapidamente, però sono anche più piccole, ciò succede perché durando meno hanno anche meno tempo per essere amplificate.

I meccanismi di adattamento alla luce lavorano sul meccanismo di terminazione più che su quello di risposta, così facendo si riduce anche la sensibilità.

La capacità di discriminare stimoli molto vicini nel tempo (flicker) migliora all'aumentare del background luminoso.

Aumenta anche la soglia differenziale.

Uscita dalla saturazione

Il passaggio dal buio alla luce intensa può temporaneamente chiudere tutti i canali CNG. La diminuzione di calcio fa parzialmente riaprire i canali CNG grazie ai tre meccanismi di terminazione visti prima. Il fotorecettore esce dalla saturazione.

La corrente in uscita dal bastoncello si attesta attorno ad un certo valore al buio, in risposta allo stimolo luminoso tende a zero. In condizioni di luce saturante ci si aspetta che la corrente vada a zero e rimanga lì, rendendo il recettore incapace di rispondere ad ulteriori stimoli. In realtà i meccanismi di adattamento riaprono parzialmente i canali CNG riportando il recettore rapidamente in una condizione in cui è in grado di rispondere ad ulteriori stimoli. In queste condizioni (adattato alla luce) uno stimolo pari al primo non è più in grado di mandare il recettore in saturazione.

All'aumentare del background luminoso il potenziale a riposo si abbassa e sono necessari stimoli più intensi per produrre la stessa variazione di potenziale.

Per studiare la sensibilità dei bastoncelli in un contesto psicofisico si usano pazienti affetti da acromatopsia congenita completa che non hanno funzionalità dei coni.

Si osserva che per un ampio range di intensità la legge di Weber è rispettata, ci si discosta solo per intensità molto alte o molto basse.

Per intensità molto basse abbiamo la soglia percettiva determinata dal rumore termico (attivazioni spontanee). In realtà la rodopsina è abbastanza stabile, il problema è che in un bastoncello se ne trovano decine di milioni, quindi statisticamente ogni qualche decina di secondi al massimo una si attiva spontaneamente, l'attivazione termica è indistinguibile dalla fotoattivazione.

Date queste proprietà statistiche **si può trattare il tasso di attivazione termica come una debole fonte luminosa**. Inserendo questa luce teorica nel modello della legge di Weber ("dark light") si

ottiene un modello che descrive bene il comportamento reale del paziente anche a livelli molto bassi di illuminazione.

Per intensità molto alte la curva sale tendendo ad infinito, i bastoncelli a questo livello sono saturi e non possono rispondere a stimoli ulteriormente più forti.

Lo stesso esperimento è difficile da fare in un soggetto con visione complementare, ad esempio la localizzazione dello stimolo modifica i risultati (a seconda che lo stimolo cada sulla fovea o sulla retina periferica). Si osserva, combinando i dati di più esperimenti, che entrambi i sistemi (coni e bastoncelli) seguono la legge di Weber ed hanno una propria soglia assoluta. Le porzioni che seguono la legge di Weber “classica” non sono sovrapposte. La costante di Weber dei coni è più piccola rispetto a quella dei bastoncelli, se potessimo confrontare la risposta dei coni e dei bastoncelli “ad armi pari” i coni avrebbero una soglia incrementale più bassa.

Nel fotorecettore i dischi contenenti le opsine vengono continuamente sostituiti: inseriti alla base e fagocitati all’apice. Il ciclo vitale del disco è stimato in circa 15-20gg. Mazzolini et al. nel 2015 hanno dimostrato che con l’invecchiamento i dischi perdono progressivamente efficienza.

Ruolo dell’epitelio pigmentato

Assorbendo fotoni il colore della rodopsina vira dal rosso-viola (spettro della luce bianca a cui vanno sottratte le lunghezze d’onda assorbite) al giallo chiaro (bleaching) a causa della isomerizzazione del retinale. Continuamente è sostituito dal retinale 11-cis (ciclo visivo). L’enzima limitante è RPE65. I coni sfruttano anche un ciclo parallelo mediato dalle cellule di Muller (perciò sono più resistenti alla saturazione).

Adattamento al buio

Non si tratta di una semplice inversione dell’adattamento alla luce (cambiare il livello di calcio). Quando si pone il paziente al buio i meccanismi visti prima reagiscono entro pochi secondi, però l’adattamento è molto più lento. Nell’adattamento si osserva un plateau: il miglioramento iniziale avviene grazie ai coni che si adattano, poi si adattano i bastoncelli.

Quando veniamo da un ambiente ad alta intensità luminosa abbiamo una retina parzialmente “bleached”, le rodopsine “bleached” devono essere rigenerate prima che sia possibile adattarsi a nuovi livelli luminosi.

Es. domanda d’esame: se ho il 90% delle rodopsine “bleached” di quanto aumenta la soglia? 10 volte perché ho solo il 10% di rodopsine capaci di rispondere allo stimolo luminoso. In realtà non è così, da esperimenti si è visto che in realtà il fattore è molto più grande.

L’adattamento al buio dei coni dura pochi minuti, quello dei bastoncelli dura anche mezz’ora.

Bleaching adaptation: teoria sviluppata negli anni ‘90 secondo cui anche la rodopsina in forma bleached o in forma di apoproteina (priva di retinale) ha una debole attività catalitica generando lo stesso effetto della “dark light” virtuale vista prima addizionandosi a questo e contribuendo ad innalzare la soglia percettiva. L’elemento limitante nell’adattamento al buio diventa quindi il ripristino delle opsine legate a retinale fotosensibile.

Riassumendo questo fenomeno propone che l’adattamento alla luce dipenda dal parziale bleaching di rodopsine (aggiungendo attivazioni non foto-dipendenti) riduca il tempo di inattivazione e quindi ci adatti alla luce mentre una frazione di opsine “bleached” rallenti l’adattamento al buio.

Perché l’adattamento dei coni è molto più rapido? Perché le conopsine possono essere rigenerate da un meccanismo parallelo grazie alle cellule di Muller.

L’adattamento alla luce coinvolge anche le vie nervose superiori alla retina (vale per tutte le vie sensoriali).

La Retina

Lo strato più esterno è l'epitelio pigmentato.

Più internamente si trova lo strato dei segmenti esterni.

Poi si ha lo strato nucleare esterno che contiene i segmenti interni dei fotorecettori.

Strato plessiforme esterno: sinapsi.

Strato nucleare interno: Corpi delle cellule bipolari ed amacrine.

Strato plessiforme interno: sinapsi tra bipolari, amacrine e gangliari.

Cellule gangliari.

Lo strato plessiforme interno è molto spesso a causa della presenza di complessi circuiti neuronali preposti all'elaborazione dei segnali visivi.

Citotipi presenti:

- Fotorecettori (4 tipi)
- Bipolari (>10)
- Orizzontali (2-3)
- Amacrine (>30)
- Gangliari (>15)

Le cellule amacrine non hanno assone.

Campi ON e campi OFF

Centro: Si definisce in funzione della cellule (neuroni diversi hanno centri diversi). È centro la zona del campo recettivo del neurone la cui stimolazione porta a variare il potenziale del neurone per via diretta. Il centro del campo recettivo della gangliare è più grande del centro del campo recettivo della cellula bipolare. Il centro del cono coincide con il suo segmento esterno.

I recettori normalmente vivono in un “mare” di luce ambientale, la visione è quindi l'effetto della modulazione del livello di illuminazione, e quindi di potenziale di membrana, del fotorecettore.

Passando da una situazione di luce ambientale normale (non buio!) ad una di illuminazione più alta il cono riduce il suo rilascio di glutammato, che a sua volta riduce la sua azione di “freno” sulla conduttanza ionica della cellula bipolare (tramite recettori metabotropici). Aumenta la corrente ionica che entra nelle cellule bipolari (depolarizzazione) si ha così inversione di polarità del segnale dal fotorecettore alla cellula bipolare. A sua volta la cellula bipolare rilascia glutammato che interagisce con recettori ionotropici sulla cellula gangliare. La cellula gangliare di centro ON che viene stimolata nel centro del suo campo recettivo aumenta la sua frequenza di scarica (codifica in frequenza). Nella cellula gangliare si osserva il fenomeno dell'adattamento.

Se invece il centro del campo recettivo viene stimolato di meno la cellula bipolare si iperpolarizza e la cellula gangliare si silenzia (temporaneamente).

La via centro ON ha la caratteristica porta le gangliari centro ON a segnalare l'aumento di stimolo del proprio centro tramite aumento della frequenza di scarica.

Nella retina sono disposti due circuiti paralleli nella via dei cono.

Nella via centro OFF la differenza fondamentale è che le cellule bipolari presentano recettori ionotropici, quindi all'aumento dello stimolo la cellula bipolare si iperpolarizza e silenzia la cellula gangliare, mentre alla riduzione dello stimolo la cellula gangliare aumenta la sua frequenza di scarica.

Le differenze nei tempi di risposta dei recettori metabotropici o ionotropici sono troppo piccole rispetto alle scale temporali della visione per essere rilevanti.

Nelle cellule gangliari non si hanno differenze costitutive tra centri ON e OFF, le nicchie differenze (funzionali) stanno solo nelle cellule gangliari con cui sinaptano. La distinzione avviene durante lo sviluppo embrionale.

A differenza delle cellule gangliari il cono sinapta sia con cellule bipolari ON che con cellule bipolari OFF contemporaneamente. Visto che esistono vari tipi di cellule bipolari è plausibile che ogni singolo cono sinapti con tutti i sottotipi di cellule bipolari ON e con tutti i sottotipi di cellule bipolari OFF (divergente, sinapsi estremamente complessa).

E la periferia?

Generata dalle cellule orizzontali, che sono cellule dotate di un'arborizzazione assonica molto ampia, la loro funzione è trasferire l'effetto della luce su una zona in una zona della retina che non è stata illuminata (generano comunicazione orizzontale nella retina). L'effetto è un feedback negativo: se un cono stimolato si iperpolarizza, gli altri coni con cui sinapta la cellula orizzontale vengono depolarizzati. È dibattuto se esista o meno un effetto di rigenerazione del potenziale lungo le arborizzazioni della cellula orizzontale.

La **periferia** è la zona di campo recettivo che ha un effetto sul neurone per via indiretta, si trova attorno al centro (forma una "corona"). Dipende dalle interazioni laterali mediate dalle cellule orizzontali.

Se la luce aumenta nella periferia di un cono (ma non nel suo centro) i coni nella periferia si iperpolarizzano mentre il cono preso in esame, grazie alle cellule orizzontali, si depolarizza.

Se analizziamo la risposta di un cono al flash si vede una (quasi) immediata iperpolarizzazione dovuta all'attivazione della catena fototrasduttiva, poi si ha una leggera iperpolarizzazione dovuta al segnale trasmesso dalla periferia (anch'essa fatta di coni stimolati dal flash) tramite le cellule orizzontali. È ritardata a causa della catena di cellule e meccanismi che trasmettono l'impulso. Non è possibile che in caso di stimoli diffusi la stimolazione della periferia annulli lo stimolo nel centro? No perché c'è uno sfasamento temporale e la stimolazione della periferia produce un effetto più debole rispetto al centro.

Prendendo per riferimento il campo recettivo di una cellula gangliare ON:

L'attivazione della via periferica senza stimolazione del centro causa depolarizzazione dei coni al centro (non stimolati), quindi iperpolarizzazione della cellula bipolare ON e diminuzione della frequenza di scarica della cellula gangliare ON.

Tutti i discorsi fatti prima sono ovviamente una semplificazione perché un tasso di convergenza (anche se piccolo) c'è.

L'utilità del sistema organizzato in questo modo è dare risalto ai bordi degli oggetti, i campi ON rispondono al passaggio di un bordo da scuro a chiaro, i campi OFF viceversa.

E le vie dei bastoncelli?

Prendono almeno due vie:

Via primaria dei bastoncelli Comunicano con una singola bipolare di tipo ON la quale non comunica con le gangliari (non esiste la via diretta) ma comunica con le cellule amacrine AII, che sono cellule che rilasciano GABA e glicina, tra di loro formano un sincizio elettrico (gap junctions), le gap junctions non sono costitutivamente attive ma dipendono dall'adattamento al buio. Dalle cellule AII il segnale passa alle cellule gangliari dei coni, sia ON che OFF. Con le ON tramite gap junctions, con le gangliari OFF tramite rilascio di Glicina e GABA, si ha inversione di risposta, il risultato è che con un aumento della luce si depolarizzano le gangliari ON e si iperpolarizzano le OFF e viceversa. Elevatissima convergenza. Dalla struttura si evince che le vie dei bastoncelli siano più recenti delle vie dei coni e si siano collegate al sistema preesistente delle vie dei coni.

Le due unità logaritmiche di differenza nella sensibilità del sistema dei bastoncelli derivano dalla estrema convergenza della loro via di trasmissione.

La saturazione dei bastoncelli di giorno non perturba la trasmissione del segnale dei coni grazie all'adattamento delle sinapsi.

Via secondaria: I bastoncelli comunicano con i coni tramite gap junctions, da lì si procede con le vie ON e OFF come già descritto.

La prevalenza della via primaria o secondaria dipende dall'intensità della luce, più debole e si usa la via primaria (maggiore convergenza, maggiore sensibilità, ad un certo punto satura), più forte e si usa la via secondaria.

In condizioni di luce debole ma già sufficienti per usare la visione dei coni (ad esempio con cielo annuvolato) la percezione dei colori risulta meno vivida, e la luce sembra avere tonalità più fredde (bluastre), una teoria sul perché questo accada è che in queste condizioni i bastoncelli sono attivi così come sono attive le gap junctions che li collegano ai coni (via secondaria) e lo spettro di sensibilità dei bastoncelli è più spostato verso il blu/verde.

Dalle sinapsi dei coni partono prolungamenti molto sottili che contattano con le sferule dei bastoncelli vicini tramite gap junctions.

Se non si lavora con cellule isolate si nota che la membrana del cono si iperpolarizza anche ad intensità a cui non dovrebbe, grazie alle gap junctions con i coni. Ad intensità maggiori si osserva un picco molto veloce (dovuto alla catena trasduttiva del cono stesso) seguito da un plateau dovuto alle gap junctions con i bastoncelli vicini. Ad un background più alto i bastoncelli sono saturi e non interferiscono con i coni.