

CLAUDIO PERNECHELE

Il primo occhio

La straordinaria evoluzione
della vista negli animali

SAGGI

*A mia moglie
Francesca*

Indice

- p. 9 *Il senso della vista*
Cos'è un occhio?, 11
Cos'è una lente?, 16
Cos'è una retina?, 20
Gli occhi negli animali, 28
- 34 *Nascita ed evoluzione dell'occhio*
Tracce fossili: alla caccia del primo occhio, 35
Vertebrati, lamprede e pesci ago, 38
Il mistero del Nautilus, 40
I conti non tornano: gli occhi dei pesci, 43
- 47 *La natura della luce*
Le particelle della luce, 49
Corpi neri e buchi neri, 51
- 57 *Le proprietà della vista*
Aberrazione e diffrazione, 58
Sensibilità, 61
Risoluzione, 66
La visione dei colori, 69
Occhiali polaroid: gli occhi delle api, 76
Pupilla: gli occhi del geko, 80
Tapetum: gli occhi dei felini, 83
Campo di vista: predatori e prede, 84
Frequenza visiva: gli occhi della libellula, 87

- p. 89 *Riflessioni senza specchi*
Riflessione totale, 93
Diamanti negli occhi, 99
- 101 *Occhi singoli*
Lo sbarco sulla Terra, 102
Mare o montagna? Gli occhi degli anfibi, 103
Teleobiettivi: gli occhi delle aquile, 109
Quando due occhi sono pochi: gli occhi dei ragni, 114
Quando sei occhi sono pochi: le cubomeduse, 119
Quando 24 occhi sono pochi: la pelle dei polpi, 122
Ottiche a specchi: gli occhi delle capesante, 125
Obiettivi ottici complessi, 128
Occhi negli abissi marini, 130
Evoluzione convergente, 139
- 140 *Occhi apposti*
Gli occhi composti, 140
Gli occhi degli insetti, 141
Sovrapposizione neurale: gli occhi delle mosche, 145
Ottiche afocali: gli occhi delle farfalle, 147
- 150 *Occhi sovrapposti*
Gli occhi a rifrazione delle lucciole, 151
Gli occhi a riflessione delle aragoste, 154
Gli occhi catadiottrici dei granchi, 158
- 160 Conclusioni
- 167 Bibliografia essenziale
- 169 Glossario
- 173 Ringraziamenti

Il senso della vista

Il senso della vista è indubbiamente uno dei più potenti mezzi di cui siamo dotati per conoscere e navigare l'ambiente che ci circonda. L'abilità di percepire la luce è abbastanza comune a molte forme di vita, ma la capacità di stabilire anche la direzione della sua provenienza è sinora stata scoperta solo in alcuni animali. L'occhio è un organo biologico in grado non solo di percepire la luce (ovvero i fotoni, le particelle di cui la luce è composta) ma anche di stabilire la direzione da cui essa proviene, grazie alla presenza di un sistema ottico posto al suo interno. È questa capacità di discernere la direzione di provenienza della luce che chiamiamo *vista*.

Il mondo animale è modernamente suddiviso e classificato in tipologie, phylum, che li distingue in base alla loro struttura corporale. Dei trentatré phyla animali esistenti, solamente cinque hanno sviluppato dei veri e propri occhi, in grado di generare un'immagine. Gli animali appartenenti agli altri phyla non possiedono alcun organo specializzato nella rilevazione della luce, o, quelli che ce l'hanno, non hanno sviluppato delle ottiche in grado di formare una immagine (e quindi non sono dotati di vista).

Alla base della fotosensibilità vi sono alcune proteine chiamate *opsine*. Le opsine sono proteine che ospitano dei *cromofori*, molecole “parenti” della vitamina A. Questi reagiscono all’impatto dei fotoni modificando la propria forma chimica e inducendo dei segnali che saranno poi spediti al cervello per l’elaborazione. Questo sistema basilare proteina+cromoforo è presente in tutti gli organismi fotosensibili (non solo negli animali, ma anche nelle piante).

Nelle piante, i recettori fotosensibili sono responsabili di alcune funzioni importanti, come la fotosintesi della clorofilla. Esistono anche altre molecole fotosensibili non proteiche, le più conosciute delle quali sono le melanine, molecole polimeriche che ci proteggono dalla radiazione solare e responsabili dell’abbronzatura.

Alcuni rettili e anfibi alloggiano, sulla cima della loro testa, un organo parietale fotosensibile. Questo organo è in grado di percepire la luce e serve a informare la ghiandola pineale per permettere la regolazione dei cicli circadiano e termico. È chiamato anche, impropriamente, occhio pineale ma non possiede un’ottica e quindi non è “capace” di vedere. Un pannello fotovoltaico è composto da elementi fotosensibili, che riescono a percepire l’energia della luce che riceve e a trasformarla in un segnale, proprio come i cromofori della nostra retina. Ma, essendo privo di ottica, non riesce a stabilire la provenienza della luce; non riesce, quindi, a individuare dove è il Sole: sente solo l’energia che gli arriva, proprio come l’occhio pineale.

Il pannello fotovoltaico, come l’occhio pineale, è dotato di *fotosensibilità* ma non di *vista*.

È quindi la presenza di un sistema ottico che trasforma un tessuto fotosensibile in un occhio, ed è di queste ottiche

che parlerò in questo libro. Non parlerò né della biologia né della fisiologia dell'occhio, ma descriverò l'organo della vista da un punto di vista puramente ottico, cioè di come esso riesca a formare una immagine e non di come questa venga poi spedita ed elaborata dal cervello. Vedremo delle strabilianti configurazioni e le molte vie che l'evoluzione ha percorso per sviluppare dei sistemi ottici che si sono ottimizzati adeguandosi alle necessità dei vari habitat.

Cos'è un occhio?

La strategia evolutiva che ha permesso agli animali di sviluppare un sistema (l'occhio) che riesce a discriminare la direzione di provenienza della luce (la vista), ha previsto la formazione di una matrice composta da numerose piccole celle fotosensibili (o fotorecettori, possiamo paragonarli ai pixel delle nostre fotocamere digitali), in cui l'opsina si distribuisce. Un occhio ha due componenti essenziali e distintive (vedi figura 1):

- l'*ottica*, che serve a formare una immagine dell'ambiente circostante e
- la *retina* (una matrice di fotorecettori, o pixel), che serve a rilevare quella immagine.

Non è eccessivo chiamare “ottica” la semplice struttura con un buco (la pupilla) mostrata in figura 1a. Essa è davvero un autentico sistema ottico: è esattamente il foro stenopeico (dal greco foro piccolissimo), conosciuto da molto tempo e applicato, ad esempio, dai pittori vedutisti

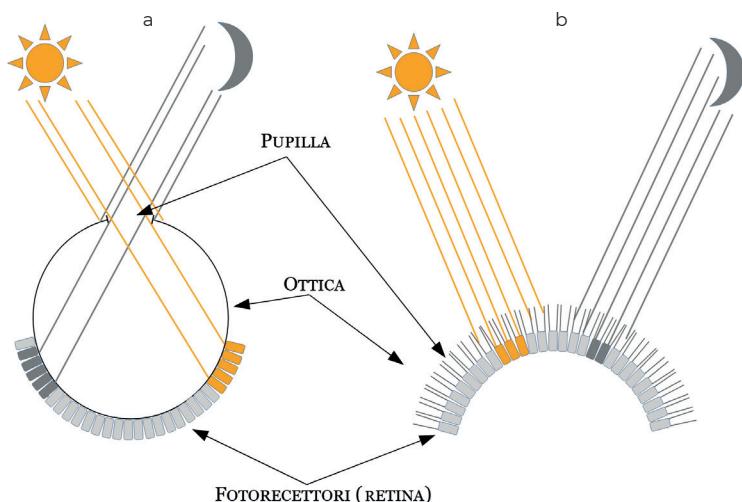


Figura 1. Occhio singolo e occhio composto.

per proiettare nella loro camera oscura il paesaggio circostante. Più piccolo è il foro, maggiore è la definizione (o nitidezza) dell'immagine, ma minore sarà la luce che entra nella camera oscura, che nel nostro caso è l'occhio. Il principio del foro stenopeico funziona bene solo in presenza di un panorama ben illuminato, in cui possiamo permetterci di "sprecare" una grande quantità di luce per ottenere una maggiore nitidezza dell'immagine dell'ambiente esterno. Per questo non vedrete mai un paesaggio notturno nei quadri dei pittori vedutisti! L'occhio primordiale mostrato in figura 1a adotta esattamente lo stesso principio. Il termine *camera oscura* è stato introdotto per la prima volta da Keplero nel 1604, e i moderni termini *camera fotografica* o *fotocamera* sono chiaramente sopravvissuti alla sua originaria definizione.

Possiamo dividere in due macrocategorie strutturali gli occhi da noi finora conosciuti: gli occhi *singoli* e gli occhi *composti*.

Nell'occhio singolo (figura 1a) la matrice di cellule fotosensibili è disposta in una struttura concava ove è presente una piccola apertura (pupilla o diaframma, l'equivalente del foro stenopeico). Questo sistema, come si può vedere in figura, comparando simultaneamente l'intensità della luce percepita dalle varie celle, permette di determinare la direzione di provenienza della luce ambientale. Guardando la figura 1a, i recettori di destra risultano maggiormente illuminati di quelli di sinistra e questo consente di stabilire che l'ambiente sulla sinistra è più luminoso di quello di destra. Quindi il sistema è in grado di stabilire (con una certa approssimazione) la direzione di provenienza della luce nella scena circostante. La precisione con cui l'ottica riesce a selezionare gli angoli di vista dipende dalla dimensione della pupilla: più piccola è la pupilla, maggiore è la precisione nell'identificare la posizione degli oggetti della scena. Chiamiamo questa qualità *risoluzione* dell'occhio: maggiore è la risoluzione, maggiore sarà la nitidezza dell'immagine. Chiamiamo invece *sensibilità* la capacità di registrare la quantità di luce ambientale: più grande è la sensibilità, maggiore è la capacità di vedere in ambienti scarsamente illuminati. Entrambe queste qualità fondamentali di un occhio, risoluzione e sensibilità, sono soggetti all'evoluzione, come vedremo più avanti. Come già detto, più piccola è la pupilla, maggiore sarà la nitidezza, ma minore sarà la sensibilità.

Il tipo di occhio che un animale adotta è selezionato dall'evoluzione e sarà un compromesso fra risoluzione e sensibilità. In ambienti luminosi possiamo permetterci di ave-

re una pupilla piccola (e quindi guadagnare in risoluzione), mentre in ambienti più bui (ad esempio i fondali marini, le grotte o durante la notte) la sensibilità potrebbe essere una dote più importante della risoluzione. Sebbene l'occhio singolo, così come mostrato nella sua forma primitiva in figura 1a, si sia notevolmente evoluto, sopravvive ancora in alcuni vermi, anellidi, molluschi e in molte forme larvali. Sorprendentemente esso sopravvive anche in un animale ben più complesso come il Nautilus (un mollusco), di cui parlerò più avanti. L'occhio singolo a struttura concava è il preferito dagli animali vertebrati e da alcuni importanti invertebrati come i cefalopodi e i ragni.

La seconda macrocategoria, l'occhio composto, diffuso invece fra insetti, crostacei e alcuni molluschi, adotta un'altra strategia, come visibile in figura 1b. In questo caso le celle fotosensibili sono distribuite lungo una curva convessa anziché concava e ogni cella possiede uno schermo di luce (possiamo immaginarlo come un tubetto, chiamato ommatidio) che incanala la luce proveniente da una determinata direzione, escludendo quella proveniente da tutte le altre. Come si vede, anche in questo caso la comparazione simultanea dei segnali luminosi ricevuti dalle varie celle permette di discriminare la direzione di provenienza della luce e anche in questo caso il sistema sarà in grado di percepire che un oggetto sulla sinistra è più luminoso di quello sulla destra. Anche l'occhio composto, come quello singolo, si è evoluto notevolmente nel tempo rispetto alla forma primigenia mostrata in figura 1b, ma esso si trova ancora in questa forma basilare in alcune vongole e in alcuni anellidi marini.

Una cosa importante da notare in figura 1 è che avrà delle ripercussioni durante le prime ricerche sugli occhi

degli animali, iniziate con l'invenzione del microscopio, è che nell'occhio singolo l'immagine è rovesciata (l'ambiente a sinistra viene immaginato nella parte destra della retina), mentre in quello composto è dritta.

Le due morfologie descritte consentono di stabilire cosa sia un occhio rispetto a un organo dotato di sole cellule fotosensibili: quest'ultimo, come il già citato e fuorviante occhio pineale, non ha la capacità di determinare la direzione di provenienza della luce.

Una prima evoluzione dell'occhio, che vedremo più avanti in maggior dettaglio, è quella che ha permesso di aumentarne sia la risoluzione che la sensibilità, mantenendo la struttura di partenza mostrata in figura 1.

Questa ha previsto la costruzione di una lente (formata anch'essa da proteine, come i fotorecettori, ma questa volta trasparenti alla luce) posta in prossimità della pupilla, come illustrato schematicamente in figura 2. Come si vede nel

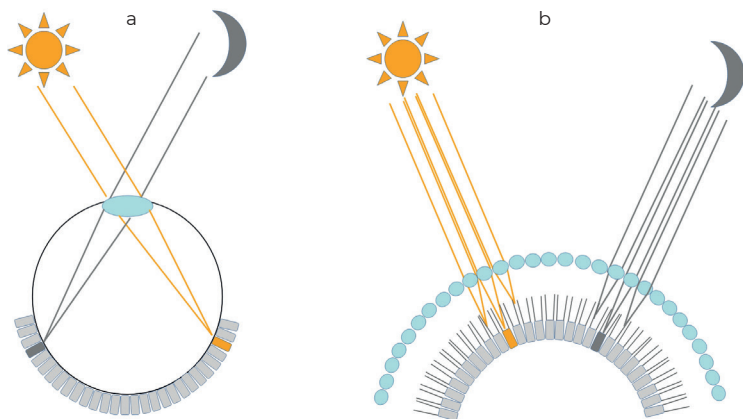


Figura 2. *Effetto della nascita della lente.*

caso dell'occhio singolo (a sinistra), la presenza della lente permette di guadagnare in risoluzione ottica (il fascio viene concentrato in un solo fotorecettore, si confronti la figura 2a con la 1a) senza perdere in sensibilità (la dimensione della pupilla rimane invariata). Il guadagno è minore nel caso dell'occhio composto poiché sia la risoluzione che la sensibilità aumentano di poco.

Alcuni ricercatori hanno stimato, considerando la biologia dei fotorecettori e la pressione di selezione, che l'evoluzione, partendo da una matrice di fotorecettori (figura 1) fino alla produzione di una lente focalizzante (figura 2), richieda circa 400.000 generazioni. Per animali con intervallo generazionale di un anno, questo significa che tale evoluzione si compie in circa mezzo milione di anni. Se il gap generazionale fosse di vent'anni, l'evoluzione si compirebbe in 10 milioni di anni. Sono tempi veramente brevi se consideriamo la scala temporale evolutiva degli animali (vedi figura 7).

Nonostante tutto, quindi, generare un occhio sembrerebbe una faccenda abbastanza semplice.

Cos'è una lente?

A questo punto dobbiamo cercare di capire come una lente riesca a deviare, ed eventualmente anche concentrare, i raggi luminosi. Questa capacità è strettamente legata al concetto di *indice di rifrazione* (che si indica con la lettera n). L'indice di rifrazione di un mezzo (un materiale) è un valore relativo che indica la velocità della luce in quel mezzo rispetto a quella nel vuoto. In pratica è il rapporto fra la velocità della luce nel vuoto (300.000 km/s) e quella nel mezzo. Siccome la velocità della

luce nel vuoto è la massima possibile, l'indice di rifrazione di qualsiasi materiale (vetro, acqua, aria ecc.) sarà maggiore di 1. Se un mezzo trasparente (ad esempio un vetro) ha $n = 2$, significa che la velocità della luce in quel mezzo è la metà di quella nel vuoto (quindi 150.000 km/s). L'aria ha circa $n = 1,0003$ e possiamo paragonarla al vuoto per i nostri fini (quindi $n = 1$) mentre l'acqua ha $n = 1,34$, anche se può variare un po' in base alla salinità e alla temperatura. L'indice di rifrazione delle proteine di cui è fatta la lente in un occhio animale può variare da $n = 1,4$ a $n = 1,68$ circa (nelle anguille gialle, n varia nel corso della loro vita, come vedremo). La guanina, molecola con cui alcuni animali si costruiscono dei veri e propri specchi, ha $n = 1,83$. Teniamo a mente questi valori perché saranno molto importanti per capire come un occhio funziona in acqua (per i pesci e gli altri vertebrati e animali marini) e in aria (per i vertebrati e altri animali terrestri). Quando un raggio di luce passa da un mezzo con indice di rifrazione n_1 a un altro con un diverso indice n_2 , esso viene deflesso (fenomeno di rifrazione) secondo una legge descritta da Snell e dai suoi coevi nel diciassettesimo secolo. Ci basti ricordare che maggiore è la differenza fra i due indici di rifrazione, maggiore sarà l'angolo di deflessione. Nel caso in cui il secondo mezzo abbia una superficie curva, il fenomeno della rifrazione consente di concentrare in un punto (il fuoco) il fascio luminoso incidente su di essa ed è questo che definisce una lente.

Il fuoco della lente si forma come mostrato schematicamente in figura 3. La distanza fra la lente e il punto di fuoco è detta lunghezza focale e si indica con f .

Nel passaggio attraverso una lente il raggio subisce due deflessioni: la prima quando entra nella lente e la seconda quando ne esce. Si noti che gli indici di rifrazione possono

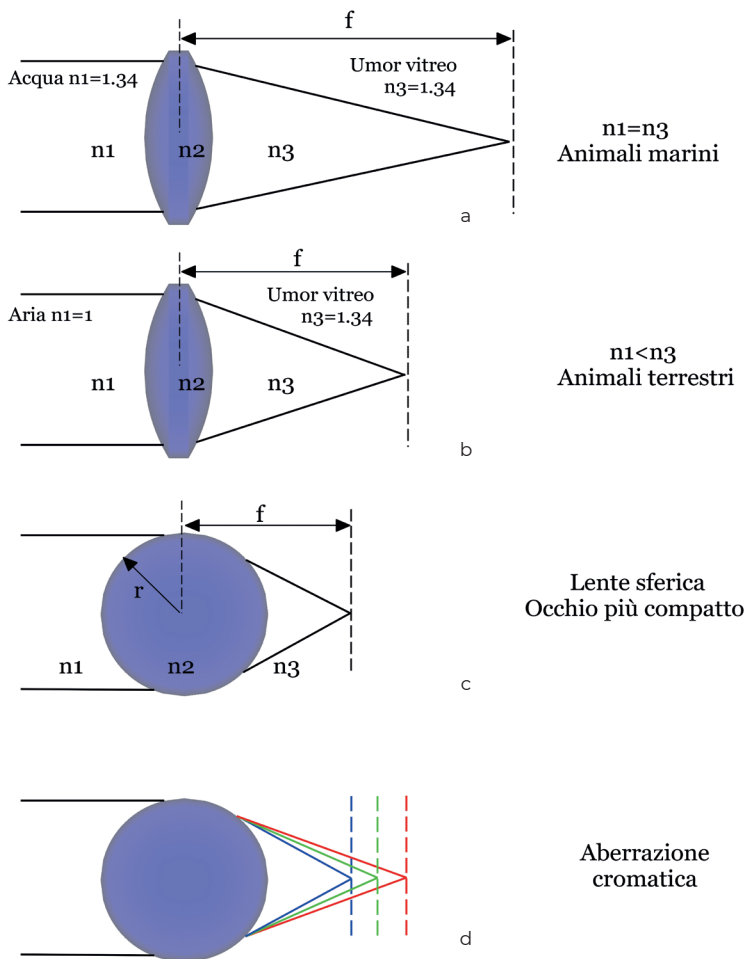


Figura 3. Funzionamento di una lente.

essere diversi a sinistra e a destra della lente. Questo è il caso di un animale terrestre, mentre per un animale marino i due indici sono uguali ($n_1 = n_3$). Questo ha avuto una grande importanza nell'evoluzione dell'occhio, quando i vertebrati

hanno iniziato a muovere i primi passi sulla terraferma, ma lo vedremo più avanti.

La lunghezza focale di una lente (che è una misura di distanza) dipende quindi essenzialmente da due fattori: la differenza fra gli indici di rifrazione dei due mezzi in cui la lente è immersa e la curvatura delle sue superfici. La lunghezza focale sarà tanto minore quanto maggiore è la differenza fra gli indici di rifrazione e quanto maggiore è la curvatura delle superfici della lente.

Attenzione! Il raggio di curvatura di una superficie è l'inverso della sua curvatura: quanto più grande è il raggio di curvatura, tanto minore è la curvatura. Il raggio di curvatura di una superficie piana (ad esempio il vetro di una finestra di casa) è infinito (la sua curvatura è zero) e anche la sua lunghezza focale è infinita. Infatti, le finestre non producono una immagine, altrimenti rischieremo di ustionarci nel punto di fuoco, ovunque esso sia. Il minimo raggio di curvatura possibile è quello della sfera, che ha la massima curvatura possibile e di conseguenza ha la lunghezza focale più corta possibile per una lente.

La figura 3a mostra una lente con bassa curvatura e indice di rifrazione $n_2 = 1,53$ immersa in acqua ($n_1 = n_3 = 1,34$). Nel riquadro 1b la stessa lente è messa in aria ($n_1 = 1$) mentre la parte retrostante la lente è in acqua ($n_3 = 1,34$). Come si vede la lunghezza focale in quest'ultimo caso è più corta, in accordo con la regola detta sopra. Il riquadro 1c mostra una lente con la maggiore curvatura possibile, ossia completamente sferica. Possiamo ragionevolmente pensare che un buon punto di arrivo evolutivo sia quello di avere un occhio più compatto possibile, poiché sarà meno esposto a possibili danneggiamenti dovuti a urti fortuiti e offrirà un bersaglio

più difficile da attaccare per eventuali predatori. Di conseguenza è logico ritenere che una buona strategia evolutiva debba portare a un occhio il più compatto possibile e quindi a una lente sferica, come in figura 1c. E infatti è ciò che è avvenuto nel mondo animale, anche se nel secolo in cui sono iniziati i primi studi scientifici sugli animali, il diciottesimo, è sorto un mistero di cui parlerò più avanti.

Una ultima cosa da considerare è che l'indice di rifrazione varia al variare della lunghezza d'onda della luce. Questo fatto implica che la posizione del fuoco di una lente è diversa a seconda del colore della luce. Con riferimento alla figura 3d, il fuoco di un colore, ad esempio il rosso, giace in un piano diverso di quello del punto di fuoco di altri colori, ad esempio il verde e il blu. Questa caratteristica peggiora la qualità dell'immagine fornita dalla lente e si chiama aberrazione cromatica.

Le strategie adottate dagli animali per mitigare questa fastidiosa aberrazione sono molteplici. I ragni hanno adottato un ingegnoso sistema per correggere l'aberrazione cromatica, che vedremo nel capitolo a loro dedicato. Anche i pesci, e tutti gli altri vertebrati hanno sviluppato un sistema per mitigare il cromatismo. Vedremo che esso ha anche influenza sulla pupilla a fessura adottata dai felini.

Cos'è una retina?

La retina è la matrice di fotorecettori sensibili alla luce, in pratica l'equivalente del sensore d'immagine inserito nei nostri smartphone o nelle nostre fotocamere digitali.