

BIOELETRICITÀ

Classe IVA Liceo scientifico
Istituto Statale “Lorenzini”, PESCIA

Anno scolastico 2004-2005

Di:
Bimbi, Nicola
Mazzoni, Luca
Pieve, Alessandro

Luminescenza

La luminescenza è un termine utilizzato per indicare generalmente diverse tipologie di emissione di luce. Questo avviene quando un atomo si trova in uno stato elettronico eccitato, gli elettroni non potendo mantenerlo, decadono naturalmente allo stato fondamentale liberando energia sotto forma di fotoni, e quindi di luce.

Il colore della luce che si differenzia secondo la frequenza della radiazione luminosa, dipende dall'energia somministrata, più si fornisce energia, più il colore si avvicina al violetto, vale a dire la radiazione con la frequenza più alta. Riguardo a questo fenomeno si può applicare la teoria di Einstein per giustificare la regola di Stokes (la frequenza della luce emessa da una sostanza luminescente non può essere maggiore di quella della luce incidente), la quale non poteva essere giustificata dalle precedenti teorie.

"Ogni quanto di energia emettente, di frequenza f_1 , viene assorbito e porta di per sé alla costituzione di un quanto di energia di frequenza f_2 ; durante il processo di assorbimento del quanto di luce emettente possono eventualmente costituirsi simultaneamente altri quanti di luce di frequenza f_3, f_4 , ecc., così come può svilupparsi energia di natura diversa (termica, ad esempio). La natura dei processi di transizione non incide sul risultato finale.

Se la sostanza fotoluminescente non va considerata sorgente continua di energia, l'energia di un quanto di energia non può essere, in base al principio della conservazione dell'energia, più grande di quella di un quanto di energia emettente..."

inoltre Einstein accenna a due possibili eccezioni alla regola di Stokes:

- il numero dei quanti di luce incidente è tale che un quanto di energia della luce emessa può aver acquistato la sua energia da più di un singolo quanto di luce incidente (per cui non è più valido il processo elementare di trasformazione precedentemente spiegato nel caso di densità ridotta della radiazione);
- la luce incidente (o la luce emessa), anche se di densità energetica ridotta, non corrisponde alla radiazione di corpo nero (come può accadere, ad esempio, quando la luce viene emessa da un corpo a temperatura alta).

Chemiluminescenza e Bioluminescenza

Una particolare tipologia di fenomeni luminescenti sono quelli chemiluminescenti; essi avvengono quando uno dei prodotti si trova in uno stato elettronico eccitato a seguito di una reazione chimica, che deve essere obbligatoriamente esotermica. L'energia liberata dalla reazione deve essere molto consistente, essendo necessari 200.000 J per ogni mole all'emissione di fotoni.

In particolare le reazioni coinvolte sono quelle di ossidoriduzione, ed implicano ossigeno, perossidi o altri forti ossidanti. Nel caso in cui un fenomeno chemiluminescente avvenga all'interno di un organismo vivente allora si tratta di bioluminescenza. Queste particolari reazioni devono avvenire in soluzione acquosa (di cui gli organismi sono costituiti in gran parte) nella quale molte reazioni chemiluminescenti non possono svolgersi, e sono catalizzate da un enzima, la luciferasi, che pur non reagendo con le altre sostanze, tra cui la luciferina, diminuisce l'energia necessaria affinché la reazione possa completarsi. Luciferasi e luciferina sono due termini coniatati da Dubois nel 1880.

Le specie che usufruiscono della bioluminescenza a scopo della sopravvivenza sono numerose e comprendono batteri, funghi, crostacei, molluschi, insetti e pesci.

Ma i meccanismi di emissione di luce dei viventi sono vari e a volte molto differenti tra loro. È plausibile dunque che la bioluminescenza sia una caratteristica analoga ma non omologa di molte specie (seguendo percorsi evolutivi diversi si è giunti alla medesima conclusione).

... e nei batteri

Nel caso dei batteri la bioluminescenza si può considerare una naturale deviazione dalla respirazione cellulare (invece di ottenere come prodotto della reazione ATP si ha emissione di luce), infatti è associato al consumo di ossigeno per questo la luminescenza può avvenire solo in condizione di aerobiosi. Nei batteri la produzione di luciferasi presenta un sistema di regolazione detto autoinduzione. I batteri producono una sostanza specifica chiamata autoinduttore che solo quando è presente in grandi quantità in una colonia batterica rende possibile la bioluminescenza. Esso varia a seconda della specie. La luminescenza batterica può dunque svolgersi solo in presenza di una grande densità di batteri. Ma perché la bioluminescenza batterica dipende dalla densità degli organismi? Il motivo va ricercato nella teoria dell'evoluzione di Darwin questi batteri per sopravvivere in numerose colonie necessitano di emettere luce, per esempio i batteri simbiotici stabilitisi in un organo fotoforo in cambio di emissione di luce "ricevono" sostanze nutritive, oppure per quei batteri che si sviluppano su pesci in decomposizione si ha emissione di luce al fine di essere individuati più facilmente ed essere ingeriti da un altro pesce, trovando così un habitat più favorevole.

BIOELETTICITÀ

Con bioelettricità si intendono tutti quei fenomeni di natura elettrica che avvengono nella materia vivente. I fenomeni bioelettrici si svolgono nei vari tessuti con le stesse modalità, perciò possono essere descritti sulla base di un modello elementare: la membrana della cellula e i suoi comportamenti. Affinché avvengano fenomeni di questo tipo però è necessario che si verifichi una differenza di potenziale, che può essere data da ioni sciolti in una soluzione acquosa (come il citoplasma all'interno della cellula e il liquido interstiziale al suo esterno), ioni limitati però nella loro mobilità, in modo da formare differenze di potenziale fra le diverse zone della soluzione. Tornando alla cellula, gli ioni si muovono dall'esterno all'interno della stessa e viceversa, la limitazione è dovuta alla membrana cellulare selettivamente impermeabile, che fa in modo di provocare una distribuzione diseguale di ioni alle superfici interne ed esterne di essa.

Nell'interno delle cellule, infatti, vi è un'elevata concentrazione di ioni potassio K^+ e di proteinati, assieme a quantità minori di altri ioni. Nel liquido extracellulare abbondano invece ioni sodio Na^+ e cloro Cl^- , e altri ioni a minori concentrazioni. Se non esistessero limiti alla mobilità ionica, si raggiungerebbe ben presto l'equilibrio tra l'interno e l'esterno della cellula, con lo spostamento dei singoli ioni dovuto al gradiente di concentrazione, cioè verso il compartimento in cui la loro quantità è minore. Ma la membrana cellulare è impermeabile ai proteinati, i quali non possono quindi uscire dalla cellula, ed è funzionalmente impermeabile al sodio, nel senso che gli ioni sodio che entrano nella cellula (secondo il gradiente di concentrazione) ne vengono immediatamente espulsi con un meccanismo di trasporto attivo endoenergetico (pompa del sodio). La membrana è invece liberamente permeabile al K^+ e al Cl^- . Gli ioni potassio sono più concentrati all'interno che all'esterno della cellula, per cui tendono a uscirne secondo gradiente. In tale movimento non possono essere tuttavia accompagnati da alcuno ione di segno opposto, in quanto i proteinati non passano attraverso la membrana e il Cl^- non può spostarsi contro gradiente. Pertanto, con l'uscita del potassio

dalla cellula diminuisce il suo gradiente di concentrazione ma si stabilisce un gradiente elettrico, cioè una differenza di potenziale tra la parte extracellulare (positiva) e quella intracellulare (negativa). La fuoriuscita di K^+ è autolimitante, cioè progressivamente ostacolata dalla positività elettrica extracellulare. Esiste pertanto una condizione di equilibrio osmotico-elettrico che prende il nome di potenziale di membrana o di riposo.

Nelle strutture eccitabili l'applicazione di stimoli meccanici, chimici o elettrici di intensità sufficiente provoca un repentino aumento della permeabilità di membrana al sodio: ciò annulla la differenza di cariche tra l'interno e l'esterno della cellula (depolarizzazione) per poi invertire il segno della polarizzazione di membrana (è l'interno a diventare positivo). Si produce in tal modo un potenziale d'azione, che nelle cellule muscolari e nervose corrisponde alla generazione di un impulso. Questo può trasmettersi alle cellule circostanti come onda di depolarizzazione. Analogamente a quanto avviene per il potassio, anche il passaggio del sodio è autolimitante; infatti, con il suo ingresso nella cellula durante il potenziale d'azione la membrana perde progressivamente la permeabilità allo ione. In tal modo si ripristina rapidamente il potenziale di riposo, con l'ulteriore fuoriuscita di potassio secondo gradiente e la contemporanea espulsione attiva del sodio dall'interno della cellula.

Particolarmente interessante è la capacità di molti Pesci di generare scariche elettriche (a volte sensibili all'uomo) e l'uso che ne fanno. In questi animali gli impulsi elettrici si propagano a partire da un apposito organo, detto organo elettrico, per poi trasmettersi come spiegato sopra.

Gli organi elettrici sono sempre costituiti da tessuto muscolare modificato e corrispondono a muscoli presenti in altri Pesci; essi si osservano, fra i Selaci, nelle torpedini (*Torpedo ocellata* e altre) dei nostri mari e, fra i Teleostei, nel gimnoto (*Gymnotus electricus*) dei fiumi dell'America Meridionale e nel malapteruro (*Malapterurus electricus*) dei fiumi africani. In altri Selaci (*Raja*) e Teleostei (*Mormyrus*, *Gymnarchus*) vi sono organi simili, chiamati pseudoelettrici o meglio organi elettrici deboli, perché sono molto meno potenti degli organi elettrici veri e propri.

Gli organi elettrici sono distribuiti a livello dell'apparato cutaneo a seconda della specie. Sono generalmente quattro (nel *Gymnarchus* arrivano a otto), due dorsali e due ventrali, disposti sul peduncolo caudale dove formano una specie di cilindretto che, in sezione, appare costituito da una guaina esterna di tessuto connettivo fibroso, al cui interno trova posto un gran numero di particolari cellule muscolari che producono gli impulsi elettrici. Questi elementi particolarmente appiattiti (1/100 di mm di spessore), sono impilati a colonna uno sopra l'altro, fino a 200-400 per ogni organo elettrico; ciascuno di essi è in grado di fornire una differenza di potenziale di 0,14 V ed è posto in serie con gli altri elementi formanti la colonna, mentre le varie colonne sono collegate tra di loro in parallelo. Ogni placca elettrica viene innervata sulla superficie posteriore da motoneuroni della linea laterale.

Si ipotizza che l'energia elettrica prodotta da queste cellule serva ad attivare particolari recettori sensoriali (mormiroblasti) che nei Mormiriformi sono disposti nello spesso strato mucoso che riveste l'epidermide. Questi agirebbero da stazioni di rilevamento del campo elettrico: il pesce, tramite continue scariche, crea intorno a sé un campo elettrico al cui interno può avvertire la presenza di elementi conduttori e non conduttori. Ogni volta che un corpo con conduttività diversa da quella dell'acqua gli si avvicina, le linee di forza del campo elettrico del pesce subiscono una modificazione: i buoni conduttori producono una convergenza delle linee di forza del campo, mentre i cattivi conduttori le fanno divergere. Tale variazione viene quindi captata dai recettori sensoriali cutanei, che consentono all'animale di reagire ai cambiamenti della distribuzione del potenziale elettrico sulla sua superficie corporea, avvertendolo della presenza di ostacoli, prede o predatori, anche in acque visibilmente impenetrabili, questo processo è detto "elettrolocalizzazione attiva", perché viene usata l'elettricità prodotta da loro stessi.

È probabile che la funzione dell'organo elettrico sia stata primariamente di natura difensiva ed offensiva (stordimento e cattura delle prede), evolutasi poi come strumento in grado di fornire utili informazioni sull'ambiente circostante nei pesci con abitudini notturne o viventi in acque torbide. La capacità che hanno certi Pesci di orientarsi attraverso variazioni del campo elettrico rappresenterebbe quindi una forma di convergenza evolutiva sviluppata in specie sistematicamente

lontane fra di loro (le torpedini, per esempio, sono Pesci cartilaginei, mentre i Gimnotidi ed i Mormiriformi sono Pesci ossei), che hanno però adottato la stessa soluzione per sopravvivere sui fondali melmosi, dove possono cacciare anche di notte.

Esistono pesci dotati di scariche forti, per lo più usate per la difesa e per predare, e pesci dotati di debole scarica per la comunicazione sociale. I primi emettono scariche ad impulso, i secondi ad onde, sebbene esistano delle specie con scariche a impulsi anche fra i Pesci a debole scarica. Combinando la capacità di generare e di ricevere elettricità, alcuni pesci sono in grado di comunicare tra loro. Nei pesci del tipo "a onde", ogni individuo ha una sua lunghezza d'onda definita, come ogni stazione radio ha una sua frequenza fissa. Quando due individui con frequenza simile si incontrano, i loro campi elettrici interferiscono, provocando disturbi nella elettrolocazione. Per evitare confusione, i pesci cambiano la loro frequenza, fino a separarle in maniera sufficiente per non avere interferenze. Il meccanismo alla base dell'interferenza nella elettrolocazione fu scoperto da Watanabe e Takeda nel 1963 ed è alla base di importanti studi sui modelli di riconoscimento spaziale e temporale e sulla raccolta di informazioni sensoriali.

Fotoelettricità

Hertz scoprì fortuitamente nel 1887 che la luce ultravioletta aveva la proprietà di diminuire la tensione necessaria a far scoccare la scintilla fra due elettrodi nell'aria. Questa scoperta fu il punto di partenza delle ricerche di W. Hallwachs, J. Elster, H. Geitel, ecc., che permisero ben presto di riconoscere che l'azione di questa luce consisteva essenzialmente nel provocare un'emissione di elettroni da parte delle superfici metalliche da essa investite. A questo fenomeno, che si riduceva ad uno scambio di energia fra la radiazione incidente e gli elettroni del metallo, si diede il nome di effetto fotoelettrico.

Fu nel 1913 che A. Einstein ebbe l'idea geniale di applicare a questo scambio la concezione dei quanti di energia, nata per opera di M. Planck nel tentativo felice di conciliare la teoria della radiazione con la termodinamica. In quel tempo le modalità del fenomeno più o meno precisamente stabilite erano le seguenti: 1. il fenomeno era indipendente dalla temperatura e quindi era da escludere che questa potesse essere la sorgente da cui gli elettroni ricavavano la loro energia; 2. la velocità media con la quale questi ultimi venivano emessi dalla superficie metallica dipendeva dalla frequenza della luce eccitatrice, aumentando regolarmente con questa, mentre era assolutamente indipendente dalla sua intensità; 3. il numero degli elettroni emessi dipendevano invece da questa intensità d'illuminazione, ossia dall'energia luminosa incidente per unità di superficie in un secondo sul metallo, e per una data lunghezza d'onda variava proporzionalmente con questa; però, a parità d'intensità d'illuminazione l'emissione elettronica, oltre ad essere, come abbiamo detto, caratterizzata da una maggiore

velocità media, era tanto più intensa quanto più piccola era la lunghezza d'onda della luce incidente, poiché quanto più piccola era quest'onda tanto più profondo era lo strato superficiale del metallo che partecipava al fenomeno; 4. Infine il fenomeno fotoelettrico era istantaneo o per lo meno aveva luogo in un tempo brevissimo (inferiore a $1/2000$ di secondo) a partire dal momento in cui la luce ultravioletta irradiava la superficie.

Queste caratteristiche inducevano a pensare che gli strati superficiali del metallo fossero la sede di scambi energetici tanto più numerosi quanto più intensa era l'illuminazione, avendo luogo ogni scambio elementare indipendentemente dagli altri secondo una legge che era la stessa per qualunque lunghezza d'onda. Su questi elementi ancora incerti, antivedendo nell'intima natura del fenomeno, l'ipotesi formulata da Einstein fu la seguente:

tutte le volte che, per parte della materia, avviene emissione o assorbimento di radiazioni di frequenza " ν ", la quantità di energia " e " assorbita o emessa in ogni atto elementare è legata alla frequenza della radiazione dalla seguente legge fondamentale: $e = h\nu$ (dove " h " è la costante universale di Planck, il cui valore è $h = 6,54 \times 10^{-27}$ erg sec.). In particolare, nell'effetto fotoelettrico gli elettroni del metallo assorbono l'energia della radiazione incidente, trasformando integralmente ogni quanto " e " in energia cinetica, così che se si indica con " m " la massa dell'elettrone e con " v_0 " la velocità da esso acquisita all'atto dell'assorbimento vale la relazione $e = mv^2/2$.

Però essendo l'elettrone trattenuto nell'interno del metallo da un campo di forze dovuto alla costituzione del metallo stesso, per estrarlo occorre compiere un certo lavoro " \mathcal{P} " a spese di una parte dell'energia cinetica acquistata dal metallo non con la velocità " v_0 ", ma con una minore, data dalla relazione:

$$mv_m^2/2 = mv_0^2/2 - \mathcal{P}$$

ma essendo $mv_0^2/2 = h\nu$ l'energia del quanto incidente, si avrà:

$$mv_m^2/2 = h\nu - \mathcal{P}$$

Luminescenza nei vegetali

L'emissione di luce da parte delle piante spesso è dovuta ad associazioni simbiotiche con particolari fotobatteri. Tra i funghi i casi non rari di luminosità si possono riunire in due gruppi:

1. L'emissione di luce è limitata agli organi riproduttori, per esempio al "cappello", e più spesso alla parte inferiore di questo, dove si trova l'imenio portante le spore: tipico è, a questo riguardo, il *Pleurotus olearius* che cresce sulle vecchie ceppaie di olivo. In tal modo gli insetti notturni, attirati dall'emissione di luce del fungo, si fanno trasportatori di spore, di cui si imbrattano posandosi sulle parti luminose.
2. L'emissione di luce proviene dall'apparato vegetativo: nei boschi i vecchi tronchi abbattuti e imputriditi, sono spesso luminescenti a causa dell'invasione di funghi.



Le lamelle di questo fungo mangereccio nel buio brillano di una luce verde-azzurra

Biotecnologie

Un esperimento genetico condotto dagli studiosi dell'Istituto Sperimentale per la Floricoltura, ha dato origine ad un fiore luminescente. È stato presentato in anteprima assoluta mondiale alla Biennale del Fiore di Pescia che si è tenuta

dal 31 agosto al 8 settembre. Già nel 1955, 1962 e 1971 alcuni scienziati osservavano che cellule della medusa *Aequorea victoria* emettevano luce fosforescente se irradiate da raggi ultravioletti.

Lisianthus
luminescente



La fluorescenza è dovuta ad una proteina denominata GFP (Green Fluorescent Protein, proteina fluorescente verde) codificata dal un gene che è stato isolato dal DNA della medusa nel 1994. Con sofisticate tecnologie genetiche, per mezzo di un vettore batterico, i ricercatori hanno indotto una pianta di *Lisianthus* a produrre autonomamente la proteina GFP.

Il risultato ? Un fiore apparentemente normale, nella forme nel colore, che irradiato da luce ultravioletta o blu (non visibile dall'occhio umano) emette una brillante luminescenza verde. Al momento non si intravedono applicazioni pratiche della tecnologia, poiché non avrebbe alcun senso la produzione industriale e la commercializzazione di fiori che "brillano" solo se illuminati da luce ultravioletta, tuttavia l'esperimento mette in luce

(è proprio il caso di dirlo...) l'alta qualità della ricerca italiana in campo florovivaistico.

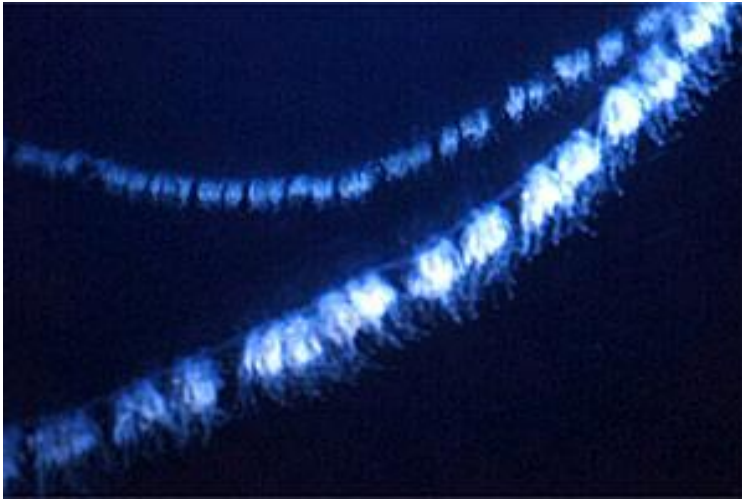
Luminescenza negli animali

Tra gli animali si possono annoverare circa 36 ordini diversi comprendenti forme luminose. Essi appartengono ai vari tipi di Invertebrati nonché ai *Selaci* ed ai *Teleostei*, fra i Vertebrati eterotermi. Assenti totalmente le specie luminose nella fauna (come del resto nella flora) delle acque dolci; poche e sporadiche nella fauna terrestre, rappresentate, oltre che da alcune specie di Anellidi e di Miriapodi, a secrezioni cutanee luminescenti, soprattutto da insetti. È la fauna marina quella nella quale il fenomeno della luminescenza acquista il suo splendore e la sua ricchezza. Ad esempio le *Noctiluche* (5 cm di diametro) sono le vere protagoniste della fosforescenza superficiale. I loro piccoli guizzi luminosi, facilmente provocati da stimoli soprattutto meccanici, si fondono (quando questi minuti organismi si trovano a popolare, addensati in una sorta di strato gelatinoso superficiale, un ampio tratto di mare),

in quello splendore argenteo, apparentemente uniforme, che in quello splendore argenteo, apparentemente uniforme, che costituisce uno degli affascinanti



nanti aspetti della luminescenza marina. Ma la lieve agitazione delle accende alla superficie altri e talora più luminosi bagliori: sono varie specie di radiolari, Sifonofori e altri idrozoï, grandi dischi rilucenti di Meduse, Cinti di Venere (Foto sottostante),

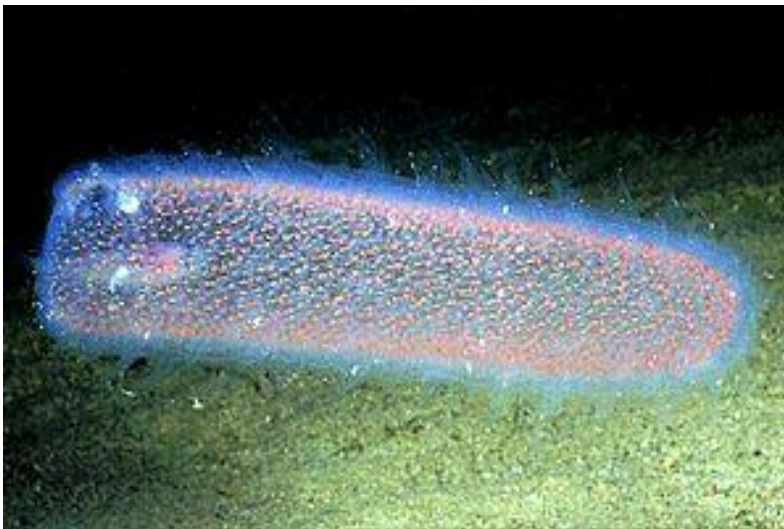


Ctenofori, Crostacei del plancton alcune specie di Gasteropodi come le *Phillyrhoe*, le *Tomopteridi* (Anellidi), mentre le più splendide

e le più vive luci arrivano dalle accese colonie dei Pterosomi (Tunicati).

Molti animali luminescenti scaricano all'esterno le loro sostanze generatrici di luce. I molluschi producono un muco luminoso che lasciano strisciando sul terreno; alcuni vermi terrestri espellono una sostanza vischiosa luminosa, e alcuni calamari, quando sono disturbati, emettono una nuvola di fluido. Altri, come lucciole, protozoi, gamberi e pesci, generano la luce per mezzo di reazioni che avvengono all'interno delle loro cellule. Il meccanismo di emanazione della luce è complicato e non ancora ben spiegato; l'acqua sembra indispensabile, in quanto gli organismi fosforescenti o i loro prodotti perdono la luminosità quando sono troppo all'asciutto e la riacquistano con l'aggiunta di acqua. La maggior parte degli animali, poi, ha bisogno di ossigeno per produrre luce, anche se talvolta è sufficiente una minima quantità. L'emissione di luce è causata da due diverse sostanze: la *luciferina*, termoresistente, e la *luciferasi* proteica e tremolabile. La luce, che si

manifesta quando questi due corpi vengono mescolati in presenza di acqua e ossigeno, sarebbe l'espressione di un'azione ossidoriduttiva. La luce prodotta dagli organismi è caratterizzata da uno spettro continuo, ma notevolmente più corto, ai due estremi, di quello solare. L'emissione di luce assume la colorazione giallo-verde, tuttavia in molti casi, specialmente nei cefalopodi e nei teleostei, provvisti di organi luminosi assai complessi, nell'effetto cromatico interviene l'azione di apparati riflettori, di lenti o di schermi di cromatofori, che modificano il colore iniziale, per fenomeni di interferenza o di assorbimento, in modo tale che un animale può emettere diversi colori differenti.



Esemplare di
Planaria
luminescente
(verme piatto)

Organi fotogeni:

Diffusa su tutta la superficie del corpo o localizzata in determinati territori, la fotogenesi appare essenzialmente legata a cellule di natura ghiandolare, che, in tutta la serie animale, costituiscono l'elemento fondamentale per lo sviluppo di veri e propri organi luminosi. In varie forme (in alcune meduse e anellidi, e nelle foladi) la sostanza fotogena, secreta dalle cellule

ghiandolari, viene eliminata all'esterno, dove il contatto con l'acqua marina è, talora condizione necessaria per la produzione di luminosità



Talvolta essa è in quantità limitata e rimane aderente alla superficie del corpo; in altri casi, invece, sono vere nubecole luminose, che vengono lanciate all'esterno. Nei protozoi, crostacei, cefalopodi, insetti e teleostei, la luminescenza è intracellulare e l'ossidazione del fitogeno avviene entro le stesse cellule elaboratrici. Organi luminosi relativamente semplici sono quelli degli insetti, nei quali lo strato di cellule fotogene poggia, verso l'interno, sopra un tessuto a strati, funzionante da riflettore, e si affaccia, verso l'esterno, al di sotto della chitina che in questa zona è trasparente. Tali organi sono attraversati da una fitta rete di trachee, che assicura un abbondante rifornimento d'ossigeno. Nei crostacei, nei cefalopodi e nei teleostei, abbiamo la più

ricca varietà di organi luminosi, con tutti i gradi diversi di complessità e di passaggio progressivo dagli organi aperti a dotto escretore differenziato, a quelli luminosi

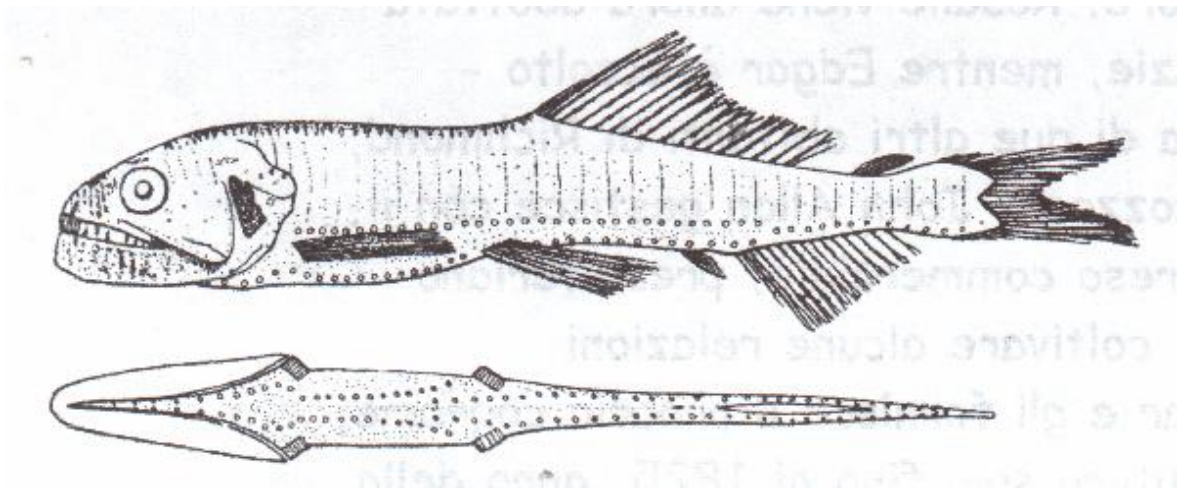


Cefalopode luminescente

Dinoflagellato con gocce oleose

luminescenti nel citoplasma

chiusi delle specie abissali con dotto escretore rudimentale.



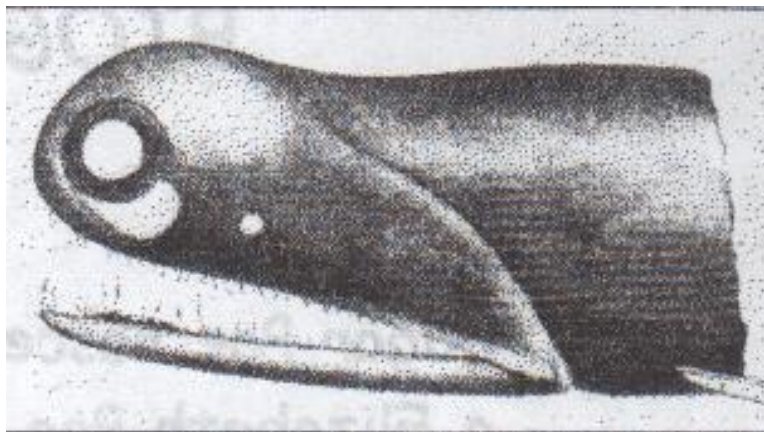
Pesce abissale (Batylychnus cyaneus) visto di fianco e dal ventre, per mostrare la disposizione degli organi luminescenti.

L'organo luminescente solitamente è avvolto dalla propria estensione, da un involucro pigmentario, all'interno del quale si trova uno strato riflettore, e da lenti che modificano la direzione e il colore dei raggi luminosi.

Dagli studi di Pierantoni è stato scoperto che negli organi luminosi di cefalopodi di superficie, entro le cellule della porzione fotogena ghiandolare, sono presenti elementi di natura batterica.

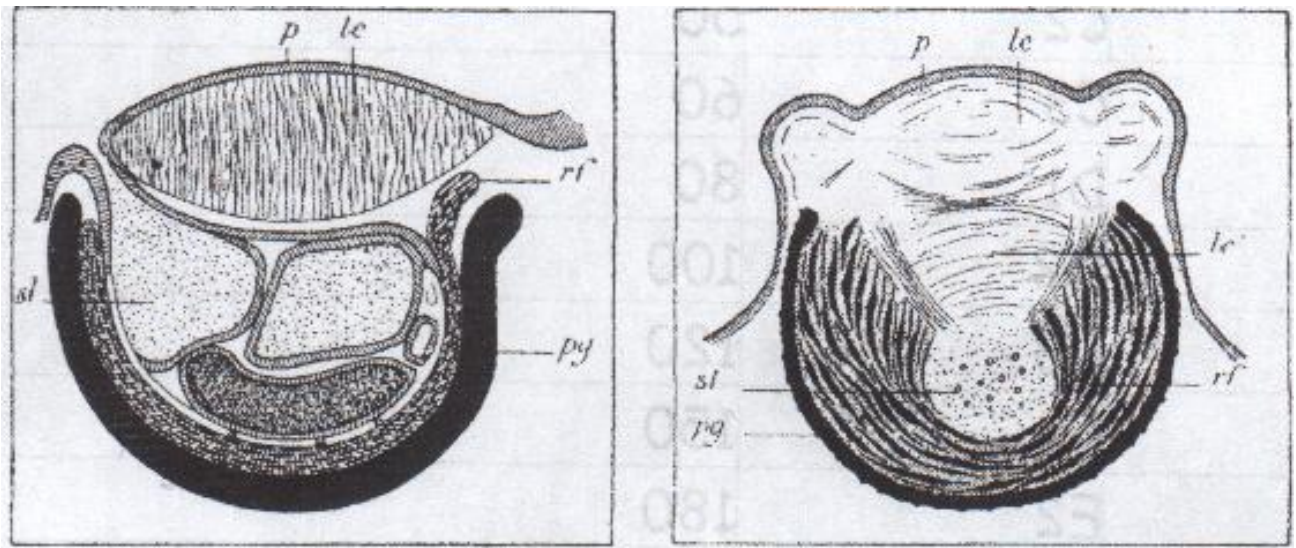
Anche la cosiddetta ghiandola nidimentale accessoria della femmina di Miopsidi (*Loligo*, *Sepia*, *Rondeletia*) risulta un organo a simbiosi batterica.

Per mezzo dell'emissione di luce molti animali probabilmente riescono a procurarsi il cibo oppure ad ingannare o ad impaurire il nemico. Per esempio l'estremità della coda di un verme marino è luminescente: i nemici cercano di afferrare la coda, mentre la parte anteriore del verme, che contiene gli organi vitali, fugge illesa.



*Estremità anteriore di un pesce abissale (Malacosteus indicus) con due
paia di organi luminosi. Quello posto dietro l'occhio emette luce rossa;
quello caudale, di struttura simile ad un occhio, emette luce verde.*

Sezioni di organi fotogeni di Cefalopodi



Legenda:

le, le': lenti; *pg*: pigmento; *rf*: riflettore; *sl*, sostanza luminosa batterica; *p*, pelle

Simbiosi tra fotobatteri, fauna e flora marina

Per simbiosi si intende un'associazione di organismi appartenenti a specie diverse che interagiscono tra loro. Estremamente interessanti sono le simbiosi presenti nell'ambiente marino. Nel caso dei batteri bioluminescenti si parla di simbiosi mutualistica perché entrambe le specie traggono beneficio l'una dall'altra. Un elevato numero di animali marini hanno complicati organi dove la luce prodotta è originata da batteri bioluminescenti come *Photobacterium*, *V. fischeri* e alcune specie del genere *Pseudomonas*.

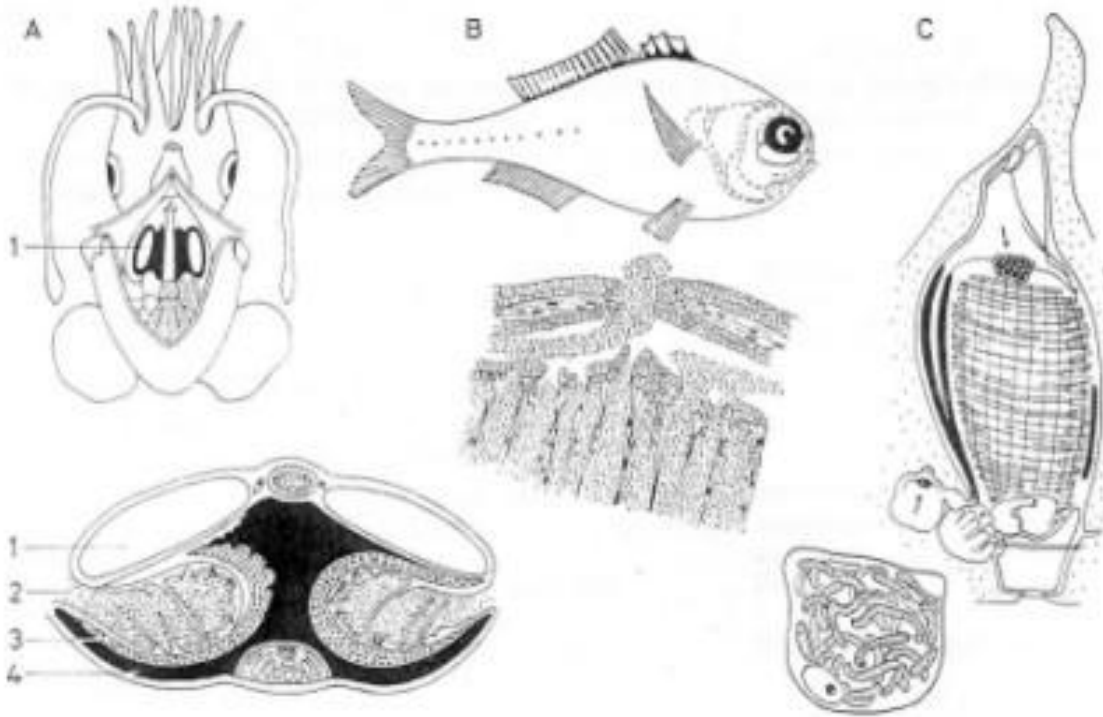


Essi hanno incominciato ad associarsi con i pesci tropicali o addirittura con coralli. Gli organi in cui risiedono hanno funzione di nutrimento come se fosse un terreno di cultura.

A differenza di quei pesci che producono loro la luce e possono controllare la sua emissione direttamente con il sistema nervoso, questi, che dipendono da batteri bioluminescenti, hanno sviluppato complesse "saracinesche" per aprire e chiudere i loro organi luminosi (fotofori).

Gli organi luminosi del *Pirosoma* sono relativamente semplici: questi organi, che giacciono in coppie nella regione branchiale dell'intestino, consistono in un agglomerato di cellule mononucleate chiamato *mycetocita*, il quale all'interno contiene i

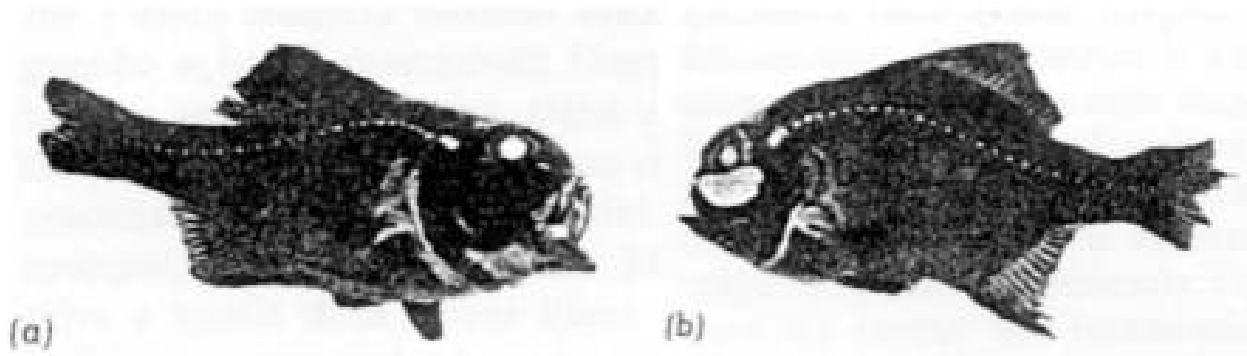
batteri luminescenti. Non sono presenti altre strutture accessorie. In molti altri casi i batteri sono situati in cavità che sono originate da dei ripiegamenti della superficie del corpo e dell'intestino, questi sono sempre esposti all'esterno.



Simbiosi luminose. (A) *Euprymna morsei* con in evidenza i fotofori. Sotto una loro sezione: 1. lenti, 2. invaginazione in cui sono contenuti i batteri, 3. riflettori, 4. sacca del nero. (B) *nomalops katropton*, con i fotofori, localizzati sotto gli occhi, come nel *Photoblepharon*; sotto una sezione del fotoforo mostrante i batteri in esso contenuti. (C) *Pterosoma*, con gli organi luminosi (freccia); sotto un *mycetocita*.

Alcuni cefalopodi però hanno altamente sviluppato organi che aumentano considerevolmente la luminescenza. In *Euprymna scolopes*, per esempio, gli organi luminosi, disposti a coppie, sono immersi nella sacca del nero. Nella parte sottostante sono circondati da riflettori e dal lato esterno sono presenti vere e proprie lenti, le quali fanno acquistare la maggiore luminescenza possibile. In queste simbiosi gli animali provvedono al cibo e probabilmente la regolare necessità di ossigeno dei batteri, loro controllano la bioluminescenza. Alcuni

ricercatori nel 1917 trovarono 4000-12000 milioni di batteri luminosi in un grammo di tessuto dell'organo luminoso del pony fish, ne consegue che il 10-25 % dei fotofori consiste di batteri luminosi.



Nel *Photoblepharon*, il fotoforo, l'organo che contiene i batteri bioluminescenti, può essere chiuso (a) o aperto (b) mediante un meccanismo a saracinesca.

La bioluminescenza ha diversi scopi: prima di tutto sembra un meccanismo di riconoscimento, favorendo il raggruppamento e l'accoppiamento; la funzione di predazione attirando la preda (come nella rana pescatrice); ma anche di difesa: l'organismo, disturbato, emette o mostra la luce spaventando disorientando il possibile predatore; un'altra di difesa è il mimetismo: infatti l'animale possiede questi organi nella zona superiore così che un predatore, sotto di lui, lo confonde con la luce che proviene dall'alto. Un tipico esempio è il *Photoblepharon*, un pesce tropicale, dotato di un meccanismo che gli permette di emettere, o no, luce, coprendo gli organi luminosi posti sotto gli occhi. Così facendo, può comunicare con animali della stessa specie fornendo indicazioni circa la possibilità di riunirsi in banchi oppure di spaventare eventuali predatori, o ancora, spingere in una trappola le possibili prede. A dimostrazione di ciò i pescatori di alcune isole dei mari del Sud, utilizzano i fotofori del *Photoblepharon* come esca, poiché luminosi anche qualche tempo dopo la morte del pesce.



Esempio di come gli organismi marini, come il Photoblefaron, si sono evoluti con batteri luminescenti.

La luminescenza nelle lucciole

Le lucciole sono degli insetti appartenenti all'ordine dei coleotteri e alla famiglia dei Lampiridi. Le dimensioni variano a seconda della specie dai 5 mm ai 2 cm e la testa è caratteristicamente sovrastata dal pronoto, un'estensione del torace. Solitamente volano di notte e si nascondono di giorno nella vegetazione. Hanno antenne filiformi, inserite nel capo una vicina all'altra. Le femmine di varie specie sono prive di ali e sono simile alle larve, che hanno anch'essi organi luminescenti. Gli organi produttori di luce sono localizzati sull'addome, talvolta su un solo segmento, altre volte su parecchi. Mentre la maggior parte dell'energia impiegata da una lampadina elettrica produce calore oltre che luce, il meccanismo generatore di luce di questi insetti ha un rendimento effettivo del 100%. Ogni specie emana luce ad una particolare frequenza. Ciò serve da richiamo sessuale e permette il rapido incontro tra maschi e femmine.

La luce è prodotta da organi costituiti da tre strati: il più interno è composto da cellule con citoplasma ricco di cristalli di acido urico e ha la funzione di "riflettore"; lo strato intermedio è composto da cellule luminose con il citoplasma molto ricco di mitocondri nei quali si sviluppano le reazioni chimiche che portano alla emissione di luce; il terzo strato è costituito da un velo trasparente. La luminosità deriva da una serie di reazioni che utilizzando l'energia che deriva dall'ATP (adenosintrifosfato) quando si trasforma in ADP (adenosindifosfato), portano alla trasformazione del sistema luciferina-luciferasi in un composto instabile che tende a ritornare allo stato fondamentale con la liberazione di un fotone. Questi coleotteri possono regolare la frequenza dei loro raggi luminosi controllando il rifornimento d'aria dei loro organi fosforescenti (o fotogenetici).

La luce emessa è fredda, manca sia di raggi infrarossi che di raggi ultravioletti ed ha una lunghezza d'onda oscillante tra i 500 ed i 650 millimicron. Per dare un'idea dell'intensità luminosa, si

pensi che occorrono circa 6.000 insetti per avere una luce uguale a quella di una candela.

Malotteruro

Il malotteruro o malatteruro (*Malopterurus electricus*), è l'unica specie della famiglia, e l'unico siluroideo attualmente noto per essere dotato di attività elettrica. Può superare, per quanto eccezionalmente la lunghezza totale massima di 1 m, ha sei barbigli e sul dorso reca una piccola pinna adiposa, e soltanto quella.

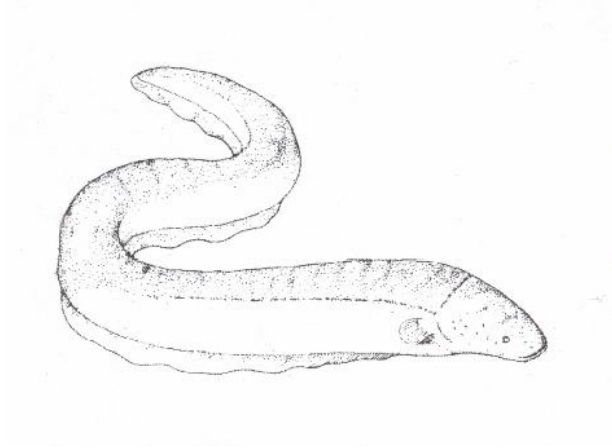


Questo animale emette scariche elettriche di un centinaio di volts, che sono dirette dalla testa alla coda, perché, al contrario degli elettrofori, il polo positivo è in posizione caudale, quello negativo cefalica. Inoltre, mentre nei pesci elettrici, perlopiù, i tessuti dell'organo elettrico ha certamente origine muscolare, nel malotteruro ha

probabilmente derivazione ghiandolare, cutanea, almeno secondo alcuni studiosi. Comunque, tale organo appare come un molle involucro che avvolge quasi tutto il corpo. Il malotteruro è diffuso nell'Africa centrale e nella vallata del Nilo; predilige i fondali bassi, melmosi, ricchi di vegetazione ed è attivo particolarmente di notte.

Gimnoto

Il Gimnoto appartiene all'ordine dei Gimnotidi; hanno una struttura allungata, senza pinna dorsale né ventrali, e la maggior parte di essi è dotata di organi elettrici capaci di creare nell'acqua ambiente dei veri e propri campi elettrici atti a favorire



L'individuazione di eventuali nemici, prede od ostacoli, così da costituire un'efficace arma di difesa od offesa. La distribuzione geografica della cinquantina di specie

e costituiscono il gruppo va complessivamente dal Guatemala al Rio de la Plata. Degli elettroforidi è unico rappresentante l'elettroforo elettrico (*Electrophorus electricus*), dell'America meridionale, che assume ossigeno dall'aria, quindi deve portarsi a respirare in superficie una volta ogni quarto d'ora. L'ossigeno atmosferico viene respirato tramite un tessuto vascolare presente nella bocca.