

L'EVOLUZIONE DEGLI ANIMALI TRA AUTONOMIA E DIPENDENZA

di Giorgio Bavestrello*

«La vita non si è evoluta combattendo, ma cooperando». L'autore, profondo conoscitore dell'ambiente marino, protagonista di campagne di ricerca nel Mediterraneo, in Asia e nell'Artide, svolge un'affascinante ricostruzione del cammino evolutivo degli invertebrati solo apparentemente più semplici. Anche con immagini suggestive documenta l'apparente contrapposizione tra «difesa di sé e apertura all'ambiente». Per esempio: i fosfolipidi delimitano la cellula, ma le proteine permettono gli scambi con l'ambiente; l'epitelio delle prime spugne segna il confine dell'organismo, ma presenta pori che garantiscono il rapporto con il mondo esterno. In prospettiva, uno studio degli ecosistemi che interpreta anche la complessità e la biodiversità come esito della interazione tra fenomeni competitivi e cooperativi.

* Professore Ordinario di Zoologia presso il Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita dell'Università di Genova

Quattro miliardi di anni fa, quando la superficie del nostro pianeta aveva raggiunto una temperatura compatibile con la presenza di acqua liquida, le molecole organiche cominciarono ad accumularsi, provenendo dallo spazio cosmico o prodotte in loco, grazie a reazioni che sono state messe in luce dal fatidico esperimento di Miller, più volte ripetuto, perfezionato e ampiamente discusso (Lazcano and Bada, 2003). D'altra parte, il passo che connette la formazione degli ingredienti con la comparsa del fenomeno «vita» è ancora molto misterioso, ma certamente ha incluso un momento nel quale i componenti della materia vivente si sono raggruppati e sono stati compartimentati in uno spazio definito. In fondo, il nome di cellula (piccola cella) che, in pieno Seicento, Robert Hooke attribuì al modulo base degli organismi viventi, richiama per l'appunto la delimitazione spaziale.

Questa delimitazione è stata ottenuta attraverso un sistema di membrane composte da fosfolipidi che, in ambiente acquoso, si chiudono spontaneamente su se stesse. Se si escludono una serie di composti lipofili e alcune molecole molto piccole, queste membrane sono ampiamente impermeabili e non consentono il passaggio delle molecole strutturali e di quelle necessarie al metabolismo cellulare. E così le antiche membrane si arricchirono di nuovi componenti, prevalentemente di natura proteica, che garantirono, in modo variamente selettivo, i passaggi dall'interno all'esterno della cellula.

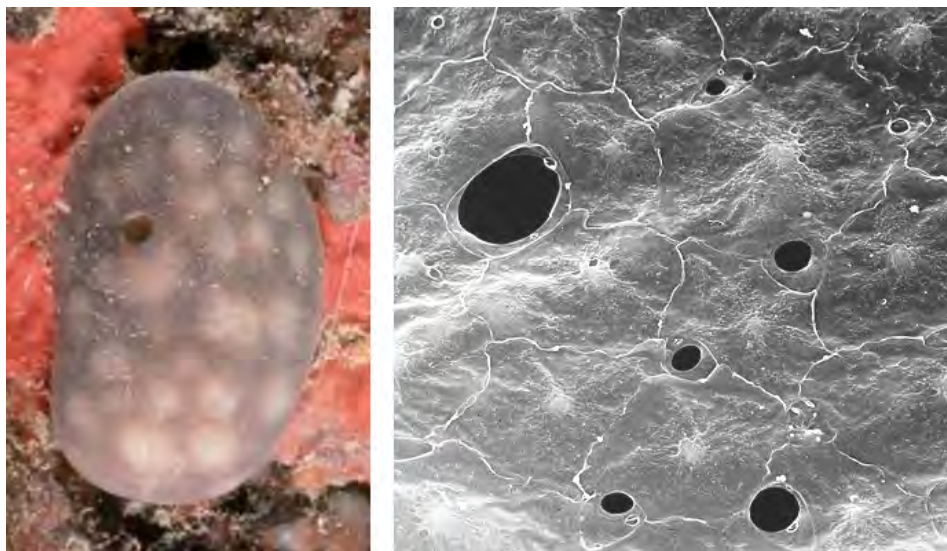
Le proteine connesse con le membrane non hanno solo funzioni di trasporto ma anche di riconoscimento così che, molto precocemente, ogni cellula riesce a riconoscere sé dal resto. Insomma, l'antica cellula vive un compromesso tra una spasmodica ricerca di autonomia e delimitazione e una necessaria dipendenza con l'ambiente circostante sia nella sua componente inanimata che con quella vivente. Se posso azzardare un paragone elementare, le cellule mi fanno pensare a un castello medioevale, cinto di mura e torri che lo delimitano e proteggono, di bandiere e stendardi che lo identificano ma anche al centro di un flusso bi-direzionale di prodotti e servizi, da e verso il circostante contado, che devono attraversare il pur ben difeso cancello.

Autonomia e cooperazione

Questa costante ricerca di compromesso, che caratterizzerà l'intera evoluzione biologica, ha un suo snodo essenziale 1.5 miliardi di anni fa quando la documentazione fossile ci indica sia comparsa la cellula eucariotica. Bisogna ricordare che, nel frattempo, le condizioni ambientali sul pianeta erano profondamente cambiate, in gran parte a causa degli stessi organismi viventi. Il cambiamento più drammatico era stato causato dalla fotosintesi clorofilliana che aveva arricchito l'atmosfera di un suo sottoprodotto, l'ossigeno. Il cambiamento da un'atmosfera riducente a una ossidante apriva nuove sfide ma rappresentava, innanzitutto, un problema all'autonomia della cellula andando a minare, a causa dell'estrema reattività dell'ossigeno elementare e dei suoi temibili radicali, la struttura delle membrane fosfolipidiche. È molto probabile che, proprio in quel frangente, sia iniziato il processo evolutivo che ha portato allo sviluppo delle cellule eucariotiche con il loro corredo di complessi organelli in gran parte legati al metabolismo energetico. Sembra proprio che batteri fotosintetici e altri capaci di metabolismo ossidativo siano stati inglobati all'interno di vacuoli nel citoplasma di altri batteri dando origine a strutture molto più complesse e metabolicamente coordinate. Ancora oggi possiamo trovare il marchio di questa antica inclusione nella doppia membrana che avvolge cloroplasti e mitocondri e nel DNA batterico che, indipendentemente da quello nucleare, ancora sovrintende alla duplicazione di questi organelli. Il lavoro di Lynn Margulis e colleghi ha rischiarato le fasi di questo fenomeno mostrando, in modo difficilmente confutabile, come, ancora una volta, l'autonomia cellulare sia stata salvata da processi cooperativi (Margulis, 1981).

Coordinamento

Un miliardo di anni fa gruppi di cellule prodotte per clonazione e costituenti colonie di organismi unicellulari hanno cominciato a intrattenere rapporti più coordinati riconoscendosi l'una con l'altra grazie agli antigeni di superficie. Il coordinamento tra le cellule risulta in un secondo livello di compartimentazione verso l'esterno. Il primo organismo pluricellulare si isola dall'ambiente grazie a uno strato di cellule specializzate che formano il primo epitelio.



A sinistra la comune spugna Chondrosia reniformis, tipica delle scogliere mediterranee. A destra l'epitelio della spugna visto al microscopio a scansione; sono ben visibili le cellule appiattite e i pori che permettono l'ingresso dell'acqua.

Per quanto ci ha tramandato la documentazione fossile, i primi organismi che hanno seguito questa strada erano simili alle attuali spugne, viventi nelle acque basse dei mari ediacariani. Ancora una volta la struttura che segna il confine tra l'organismo e il mondo esterno è il frutto di un compromesso tra isolamento/protezione e dipendenza dal mondo esterno. Infatti, lo strato cellulare non è continuo ma variamente traforato da aperture che permettono il passaggio dell'acqua che fluisce continuamente

all'interno del corpo della spugna, foriera di sostanze alimentari sia particellate che disciolte.

In fondo l'epitelio monostratificato, costituito da cellule appiattite e attraversato da innumerevoli pori (il nome di poriferi, che caratterizza i componenti del phylum delle spugne, si deve proprio a questo) non sembra rappresentare una grande barriera protettiva e le spugne si sono dovute attrezzare in altri modi per far fronte agli attacchi di microrganismi, protozoi, batteri e virus che così facilmente possono accedere ai loro organismi blandamente protetti. Esse hanno perciò evoluto un impressionante arsenale di difese chimiche, composto da un'infinita varietà di molecole che sono continuamente sversate nell'ambiente circostante.

Comunicazione

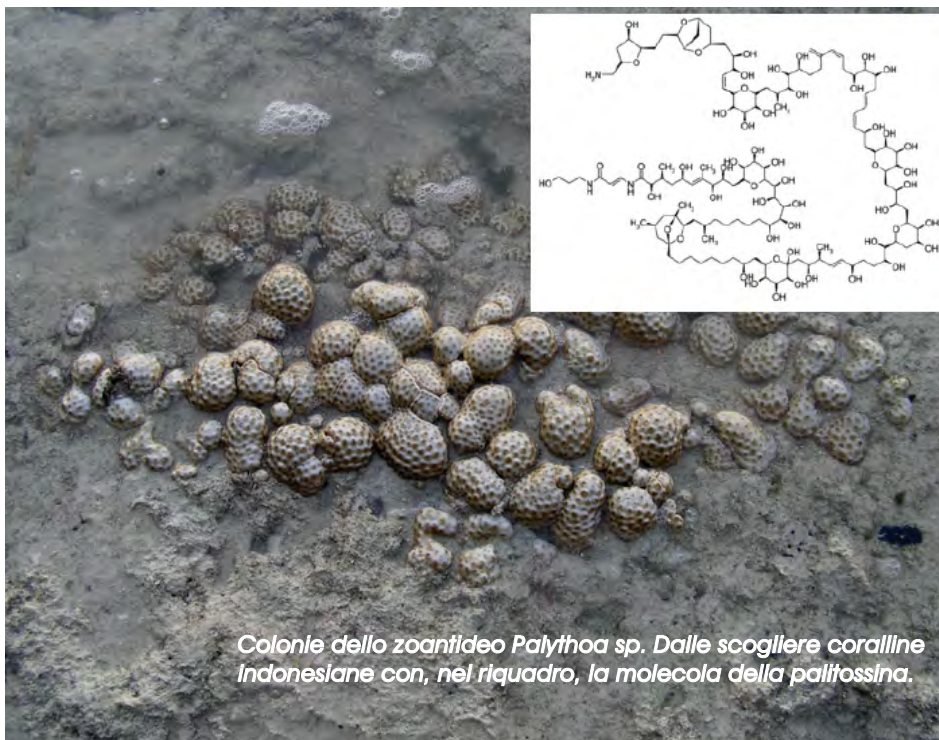
Da un punto di vista pratico ci siamo accorti, veramente da poco tempo, di quale tesoro di biodiversità chimica le spugne siano portatrici: l'industria farmaceutica si sta largamente ispirando ai composti antibatterici, antivirali, antiproliferativi presenti in questi primitivi metazoi per la costruzione di nuove molecole farmacologicamente attive (Sipkema et al., 2005). Da un punto di vista più generale è molto suggestiva la scoperta che la produzione di queste molecole non dipende solo dal metabolismo delle cellule delle spugne ma dalla cooperazione tra queste e popolazioni di batteri simbiotici che vivono nei loro tessuti: il rapporto tra batteri e spugne è talmente importante che è stato calcolato che, almeno in alcune specie, la biomassa batterica è superiore a quella delle cellule della spugna stessa. Con tutta probabilità non saremmo molto lontani dal vero affermando l'origine dei metazoi, così come quella della cellula eucariotica, ha avuto come base un fenomeno cooperativo. I batteri, infatti, associandosi ai protozoi, avrebbero contribuito a produrre la matrice extracellulare necessaria per garantire l'adesione di numerose cellule e la loro organizzazione tissutale.

L'arsenale di sostanze chimiche a disposizione delle spugne non viene utilizzato soltanto contro microbi patogeni o saprofiti ma, in animali sessili, nei quali il territorio equivale alla proiezione del corpo, ha anche la funzione di arma nella conquista di uno spazio vitale nel quale insediarsi e crescere. Le spugne inaugurano così quei fenomeni di competizione spaziale che rappresentano uno dei temi più affascinanti della biologia marina moderna (Pawlik, 2011).

In senso lato queste molecole rappresentano anche la base della nascita della comunicazione chimica: segnali che gli organismi emettono e percepiscono e che li inducono a comportamenti specifici.

Due esempi. Nelle scogliere tropicali dove la biodiversità è incredibilmente elevata e la competizione spaziale è massima, le larve delle spugne del genere *Dysidea* riconoscono gli esemplari di *Cacospongia* sui quali si insediano, progressivamente uccidendole con il sesquiterpene 7-deacetoxylepupane e occupandone lo spazio così liberato. Un caso molto diverso riguarda diverse coppie di spugne che hanno relazioni obbligate tra di loro.

Per esempio, nel Mare di Cortez, *Haliclona sonorensis* vive esclusivamente su grandi esemplari di *Geodia media*. La spugna epibionte ricopre quella sottostante lasciando libere le aperture del sistema acquifero in modo da permettere il flusso dell'acqua. Inoltre è stato dimostrato che, mentre la spugna epibionte è ricca di composti che la difendono dai predatori, quella che viene ricoperta, crescendo da sola, sarebbe una preda appetibile e scarsamente difesa.



Colonia dello zoantideo *Palythoa* sp. Dalle scogliere coralline Indonesiane con, nel riquadro, la molecola della paltossina.

L'armamentario molecolare presente nelle spugne viene ereditato da polipi e meduse che compongono il grande gruppo degli cnidari.

Questi organismi, pur nella loro semplicità morfologica, sviluppano comportamenti estremamente complessi basati su segnalazioni chimiche che coprono un'ampia banda semantica. In questo gruppo troviamo per esempio i polipi coloniali del genere *Palythoa* che difendono il loro territorio emanando nell'ambiente la palitossina, una delle sostanze tossiche più potenti prodotte nell'intero regno animale.

Per contro, sempre all'interno di questo gruppo, è stata isolata l'antopleurina, un feromone d'allarme tipico dell'anemone *Anthopleura elegantissima*.



Queste anemoni vivono in grandi aggregazioni di centinaia di individui che sono spesso utilizzate come pascolo da parte di voraci molluschi.

Le prime anemoni a essere attaccate liberano nell'acqua il feromone che induce gli altri polipi a retrarre i tentacoli.

Gli cnidari hanno un altro primato, sono i primi metazoi che utilizzano, nella comunicazione, i canali visivi. In particolare, le cubomeduse del genere *Carybdea* hanno occhi molto sviluppati, con un cristallino in grado di accomodare l'immagine al variare della distanza. In acque libere queste meduse individuano le loro prede a vista e le cacciano attivamente. Ma la possibilità di accedere al canale visivo fa sì che, per la prima volta, anche la scelta del partner per la riproduzione sessuale avvenga a vista. I maschi di molte specie riescono a riconoscere le femmine mature e si accoppiano solo con esse trasferendo lunghe spermatofores nella loro cavità sub-ombrellare.

Riconoscimento di sé e competizione

Con spugne e cnidari si assiste anche al riconoscimento del «sé» e alla sua difesa nei confronti di altri organismi conspecifici ma con diverso genotipo. Questi animali coloniali, nei quali la clonazione assume una rilevanza straordinaria nel ciclo vitale, hanno fornito straordinari modelli per lo studio dell'evoluzione dei sistemi immunitari nei metazoi. Le cellule delle spugne possono essere dissociate per semplice azione meccanica e, una volta deposte su un substrato, sono in grado di muoversi tramite pseudopodi tendendo a riaggregarsi nuovamente. Questo semplice fenomeno permette di testare cellule derivanti da diversi ceppi genetici della stessa specie così come cellule derivanti da specie diverse. Una lunga serie di osservazioni ha dimostrato che, quando le cellule derivano dallo stesso individuo sono in grado di riaggregare assieme mentre, al contrario si allontanano l'una dall'altra, dopo che le loro membrane sono entrate in contatto, quando appartengono a individui o specie differenti (Gaino et al., 1999).

Anche le colonie di idrozoi insediate sul fondale mostrano peculiari fenomeni quando, crescendo, entrano in contatto. In caso di compatibilità genetica le colonie si fondono mentre, negli altri casi producono, nel punto di contatto, un bordo inspessito ricco in cnidociti, le cellule urticanti tipiche del gruppo. In seguito alla riproduzione sessuale le larve prodotte occupano rapidamente una piccola porzione di substrato e poi ciascuna comincia a crescere, tramite riproduzione asessuale di nuovi polipi, fino a quando le colonie entrano in contatto. In alcuni casi i substrati rocciosi sono completamente ricoperti dalle colonie che si fronteggiano lungo tortuosi confini dando l'impressione di una carta geografica stampata sulla scogliera (Betti et al., 2017).

*Colonie dell'idrozoo **Paracoryne huvei**, sulle scogliere superficiali del Mar Ligure. Le bande bianche sono i bordi delle singole colonie ciascuna derivata da una larva.*



Ovviamente il compromesso tra autonomia e dipendenza non è un punto fisso ma si sposta ampiamente a seconda delle condizioni al contorno. Nei super affollati ambienti di fondo duro la difesa del territorio è un'esigenza vitale e gli organismi che vi abitano hanno evoluto le più efficienti strategie per proteggere i sacri confini. D'altra parte, l'ambiente marino offre ben altre situazioni. Le acque libere rappresentano uno spazio tridimensionale sconfinato nel quale le interazioni tra individui sono ridotte al minimo e dove le spinte evolutive sono particolarmente tese allo sfruttamento delle risorse talvolta molto scarse. In organismi semplici, caratterizzati da scarsi blocchi morfogenetici, il risultato di queste spinte può dare origine a risultati incredibilmente spettacolari. Gli organismi del plancton gelatinoso, liberi dai vincoli della gravità, possono aumentare in modo imprevedibile la loro superficie esterna. Nelle forme individuali questo avviene tramite la produzione di espansioni e tentacoli che possono raggiungere lunghezze impensabili.

Nella caravella portoghese *Physalia physalis*, i tentacoli, spessi pochi millimetri, si estendono nell'acqua per molti metri aspettando di intercettare gli organismi planctonici di cui questo sifonforo si nutre.

Ancora più impressionante la medusa criniera di leone *Cyanea capillata*, resa celebre anche da una avventura di Sherlock Holmes (*The Adventure of the Lion's Mane*), che estende, al di sotto della sua ombrella, una massa intricata di centinaia di sottilissimi tentacoli aggrovigliati.

Ricordo molto bene, il mio primo incontro con questo straordinario animale nelle fredde e buie profondità di un fiordo norvegese: la medusa, totalmente immobile ma trascinata dalla corrente, forniva la sensazione di un grande velo da sposa che teso e gonfio passasse lento e maestoso davanti a me.

Il tentativo di ampliare la propria superficie è altrettanto evidente negli organismi che assorbono la sostanza organica disciolta presente nell'acqua.

Un bell'esempio ci viene dagli ottocoralli, ai quali appartiene il corallo rosso del mediterraneo, che aumentano la superficie dei loro tentacoli grazie ad una serie di espansioni laterali dette pinnule.



*La grande medusa **Cyanea capillata** dalle acque di un fiordo norvegese*



*Una colonia del corallo nobile, **Corallium rubrum**, in cui sono evidenti i polipi bianchi caratterizzati da otto tentacoli pinnulati.*



*La medusa **Cotylorhiza tuberculata**, una delle più grandi presenti nel Mediterraneo.*

Riproduzione sessuale come cooperazione

La vita nell'ambiente marino, con il sostegno offerto dalla densità dell'acqua e la capacità di mantenere sostanze in soluzione, offre le migliori condizioni per quello che è il più impressionante e misterioso fenomeno cooperativo che attraversa, dalla sua più remota origine, l'intera storia della vita sulla terra: la riproduzione sessuale in cui due individui mettono in comune alcuni dei loro geni nella produzione di un genotipo diverso da quello di entrambi.

L'origine acquatica degli organismi pluricellulari è adombrata anche nei sistemi riproduttivi che i più primitivi di essi adottano.

I fenomeni di fecondazione esterna presenti nei poriferi e in gran parte degli cnidari sono permessi dalla densità dell'acqua che sostiene i gameti e ne consente l'incontro. Proprio nei bassi metazoi sono stati descritti fenomeni riproduttivi estremamente spettacolari come l'emissione di nuvole di spermatozoi da parte delle grandi spugne tropicali per le quali è stato coniato il termine *smoking-sponge*.

Ancor più grandioso, per la sua simultaneità e le biomasse in gioco, è l'emissione dei gameti da parte delle madrepora della barriera corallina australiana. La massa di uova e spermatozoi si estende per chilometri tingendo il mare di diverse sfumature del rosa (Babcock et al., 1986).

Cooperazione e biodiversità negli ecosistemi

Riconoscimento e difesa di sé e apertura all'altro e all'ambiente sono aspetti di uno stesso fenomeno vitale e attraversano l'intera storia della vita sulla Terra. Le modalità con cui il compromesso tra queste tendenze si attua sono mediate dalle condizioni in cui ogni organismo si trova a vivere.

Eppure, nell'interpretazione dei processi evolutivi negli animali i fenomeni legati alla ricerca di autonomia, probabilmente a causa di motivazioni sociali e storiche, sono stati ampiamente considerati e spesso sopravvalutati mentre poca importanza è stata data alla necessità di dipendenza che si esprime in fenomeni cooperativi.

Questa visione parziale ha fatto sì che, per lungo tempo, i fenomeni cooperativi (simbiotici in senso lato) fossero ampiamente esclusi dalle teorie ecologiche ed evuzionistiche e considerati alla stregua di curiosità biologiche. D'altra parte i lavori di Lynn Margulis e collaboratori hanno ampiamente dimostrato che la vita non si è evoluta combattendo, ma cooperando grazie a processi simbiotici a livello cellulare che hanno portato alla radiazione evolutiva della cellula eucariotica.

Lo studio approfondito degli invertebrati marini ha mostrato che, non solo la cooperazione avviene a livello cellulare, ma coinvolge numerosi metazoi producendo una straordinaria gamma di rapporti tra organismi che, nei casi più estremi, vivono condividendo in modo stabile ed inestricabile alcuni processi metabolici. A un livello sistemico, i fenomeni cooperativi si interpongono tra le maglie delle reti di fenomeni competitivi in vario modo modulandoli. Il risultato finale è un incremento della biodiversità, una maggiore possibilità di convivenza tra specie, la produzione di novità evolutive e una maggiore complessità ed efficienza nel funzionamento degli ecosistemi stessi.

Giorgio Bavestrello

(Professore Ordinario di Zoologia presso il Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita dell'Università di Genova)



Una "smoking sponge", un esemplare maschile della grande spugna tropicale Xestospongia sp. mentre emette una nuvola di spermatozoi.



Una madrepora tropicale mentre emette le uova

Indicazioni bibliografiche

1. Babcock, R. C., Bull, G. D., Harrison, P. L., Heyward, A. J., Oliver, J. K., Wallace, C. C., & Willis, B. L. (1986). Synchronous spawnings of 105 scleractinian coral species on the Great Barrier Reef. *Marine Biology*, 90(3), 379-394.
2. Betti, F., Bavestrello, G., Bianchi, C. N., Morri, C., Righetti, E., Bava, S., & Bo, M. (2017). Long-term life cycle and massive blooms of the intertidal hydroid *Paracoryne huvei* in the North-western Mediterranean Sea. *Marine Biology Research*, 13(5), 538-550.
3. Gaino, E., Bavestrello, G., & Magnino, G. (1999). Self/non-self recognition in sponges. *Italian Journal of Zoology*, 66(4), 299-315.
4. Lazcano A, Bada JL (2003) The 1953 Stanley L. Miller Experiment: Fifty Years of Prebiotic Organic Chemistry. *Origins Life Evol Biosph* 33:235-242.
5. Margulis, L. (1981). Symbiosis in cell evolution: Life and its environment on the early earth.
6. Pawlik, J. R. (2011). The chemical ecology of sponges on Caribbean reefs: natural products shape natural systems. *Bioscience*, 61(11), 888-898.
7. Sipkema, D., Franssen, M. C., Osinga, R., Tramper, J., & Wijffels, R. H. (2005). Marine sponges as pharmacy. *Marine biotechnology*, 7(3), 142.