

Coevoluzione

Piergiacomo Pagano

Introduzione

Un vecchio proverbio africano dice: “Ogni mattina una gazzella si sveglia, sa che dovrà correre più veloce del leone o verrà uccisa. Ogni mattina anche un leone si sveglia, sa che dovrà correre più della gazzella o morirà di fame. Quando il sole sorge, non importa se sei leone o gazzella: inizia a correre”. Come spesso accade, la saggezza popolare ha radici concrete e anche in questo caso un principio fondamentale dell’ecologia è stato compreso attraverso la semplice osservazione della natura.

Questo legame tra leone e gazzella, in termini scientifici, si chiama “interazione tra specie” ed è solo uno, forse il più evidente, fra le miriadi di esempi che si potrebbero portare. In realtà tutte le specie viventi sono interconnesse in una fitta rete di relazioni e parlare di un singolo individuo, o anche di una singola specie, in puro isolamento non ha semplicemente senso. Un individuo o una specie ha significato nell’ambiente in cui vive, nell’ambiente biotico e abiotico cui deve confrontarsi nella vita di ogni giorno.

Fin qui nulla di nuovo. Chi si intende di ecologia sa bene che predazione, dipendenza, parassitismo, mutualismo ecc. sono la regola e non l’eccezione. Meno conosciuto è il fatto che queste interazioni si estendono oltre che in senso sincronico anche in senso diacronico. E questo perché le specie non solo interagiscono le une con le altre influenzandosi in un dato momento, ma interferiscono in maniera spesso molto attiva anche con i geni altrui e quindi con l’altrui futuro. Il risultato è che una specie finisce col “selezionare” la discendenza di altre specie, quella più consona ai propri interessi e subisce, essa stessa, una evoluzione “voluta” da altre specie. Detto in modo più colloquiale una specie può “scegliere” quali figli far fare agli altri e gli altri possono “scegliere” quali figli farle fare. In questo, e in altri modi, molte specie incanalano l’altrui evoluzione in una direttrice piuttosto che in un’altra. Quando questo è il caso, l’interazione fra specie dà vita ad un processo che viene detto “coevoluzione”.

Quando si parla di evoluzione viene spesso alla mente un processo di selezione naturale determinato da eventi inorganici. Durante un periodo di siccità, ad esempio, sappiamo che gli individui più resistenti alla carenza d’acqua si salvano mentre quelli più deboli soffrono e, nelle peggiori situazioni, soccombono. I primi hanno una maggiore probabilità di mettere al mondo una prole più numerosa dei secondi. Prole che diffonderà i caratteri di resistenza alla siccità nelle generazioni successive. A lungo andare variabilità genetica e selezione naturale determinano la trasformazione delle specie nel tempo.

Ma limitando il ragionamento ai soli eventi inorganici, siano essi geologici, astronomici, atmosferici, ecc., ci si dimentica di quanto siano importanti le interazioni biologiche. Anzi, per alcuni sono queste ultime che determinano la gran parte dell’evoluzione. John N. Thompson, professore alla Washington State University, uno dei maggiori esperti di interazioni biologiche, sostiene che: “più conosciamo la diversità della vita e le strutture dei genomi e più sembra chiaro

che la maggior parte della evoluzione della biodiversità sia dovuta alla manipolazione su altre specie -guadagnare risorse e, a sua volta, evitare di essere manipolati.”¹

Le modalità di evoluzione biologica risentono anche della profonda differenza tra le interazioni col mondo inorganico e con quello organico. In genere, infatti, i processi inorganici sono o rapidi o lentissimi, mentre quelli biologici possono avere una “velocità intermedia” che produce un continuo ed incessante “martellamento genetico” ed un ininterrotto lavoro evolutivo.

Sofferamoci a pensare ai processi geologici. Alcuni sono rapidi e violenti, come un terremoto o una eruzione vulcanica che può determinare l'improvvisa estinzione di specie autoctone; altri sono lentissimi, impercettibili: ad esempio la deriva dei continenti che ha portato all'aprirsi della Rift Valley e che sembra sia implicata nella evoluzione dell'uomo. Anche gli eventi astronomici possono essere o rapidi o lentissimi. La caduta dell'asteroide avvenuta 65 milioni di anni fa, e che ha portato all'estinzione i dinosauri, è parte degli episodi violenti, mentre la circolarità dell'orbita, l'inclinazione dell'asse e la precessione terrestre sono da annoverare fra le modificazioni impercettibili. Infine, anche gli eventi atmosferici non hanno una velocità intermedia. Un uragano, un'inondazione, un vasto incendio sono rapidi e violenti mentre una desertificazione o una glaciazione richiedono spesso migliaia di anni per verificarsi. Mi si scusi se ho trattato separatamente, quasi avessero un confine netto, eventi geologici, astronomici e atmosferici. Ovviamente le glaciazioni sono influenzate anche da eventi esterni, astronomici; il fuoco non può essere considerato un evento atmosferico, ecc. Quello che, però, mi premeva sottolineare era la mancanza, per tutti questi eventi, di una “velocità intermedia” comparata ai tempi dell'evoluzione biologica.

Gli eventi inorganici rapidi hanno una grande importanza evolutiva nella nascita e nella morte delle specie in quanto possono essere causa di repentini sconvolgimenti dell'ecosistema tanto da lasciare inabitate grandi nicchie ecologiche, tuttavia sono abbastanza rari. Quelli lentissimi vedono invece una trasformazione graduale delle specie che hanno tutto il tempo di adattarsi alle cambiate condizioni in maniera del tutto impercettibile, non traumatica, senza che il singolo individuo ne abbia sentore. Gli eventi a velocità intermedia, dovuti alle interazioni biologiche, invece, lavorano direttamente sull'individuo e sulla sua discendenza, andando a modificare le dinamiche di trasformazione genetica della popolazione.

Se tralasciamo gli eventi rapidi e traumatici, una specie può far fronte al cambiare dell'ambiente inorganico modificandosi (evolvendo) lentamente, al passo delle modificazioni esterne. Nelle interazioni organiche, invece, una specie deve accelerare la sua evoluzione per rispondere “colpo su colpo” all'evolversi delle altre specie con cui interagisce. Sto parlando di quello che in gergo viene detto “corsa agli armamenti” (arms races). Ovviamente le velocità della coevoluzione sono variabili e dipendono dal tipo di interazione; Bergstrom e Lachmann, ad esempio, sostengono che nella cooperazione interspecifica, vengano favoriti i fattori associati alla coevoluzione lenta, mentre le relazioni antagoniste portano ad una evoluzione più rapida.²

In biologia l'accezione più comune del termine coevoluzione ha come significato: “influenza mutua evolutiva tra due o più specie”. Ogni parte in una relazione coevolutiva esercita una pressione selettiva sull'altra influenzando la sua evoluzione. Il termine “coevoluzione” ha però altri significati e viene usato nel mondo scientifico a più livelli. Andando verso il mondo microscopico “coevoluzione” significa anche interazione di molecole e di geni all'interno della stessa specie, andando verso il macroscopico il termine viene usato per denotare, in maniera corretta, la stessa evoluzione della vita sulla Terra.

¹ Thompson J.N., “The Evolution of Species Interactions”, Science, Vol. 284, pp. 2116-8, 1999

² Citato in: Trivers R., “Mutual Benefits at All Levels of Life”, Science, Vol. 304, pp.964-5, 2004

1 La coevoluzione molecolare argomenta contro l'ipotesi del disegno intelligente

Come abbiamo appena accennato il termine “coevoluzione” viene utilizzato anche in riferimento alle interazioni tra molecole biologiche che, influenzandosi vicendevolmente, giocano un ruolo determinante nella evoluzione degli organismi. Per alcuni, questa “evoluzione molecolare” sarebbe addirittura una “terza forza evolutiva” oltre alla selezione naturale e alla deriva genetica.³

La coevoluzione molecolare è doppiamente importante. Da un lato contribuisce a spiegare i meccanismi evolutivi del mondo microscopico, d'altra parte può analizzare, nel fino, la riducibilità del complesso. Quest'ultimo aspetto è particolarmente rilevante nel dibattito sullo “Intelligent Design”. Come sappiamo lo “Intelligent Design” può essere considerato un Nuovo Creazionismo il quale sostiene che i fenomeni biologici sono troppo complessi per essere ridotti a mero caso e necessità. Gli esseri viventi sarebbero, quindi, il prodotto di una Mente Superiore, un Progettista, un Dio, un Creatore, al di sopra di ogni cosa. Entrando nel particolare i Nuovi Creazionisti si appellano ad una stessa autocritica di Darwin il quale aveva sostenuto che, qualora fosse stata scoperta una proprietà di un essere vivente che non fosse spiegabile in termini di lenti mutamenti nel tempo, l'intera teoria dell'evoluzione per selezione naturale sarebbe risultata errata.⁴

Michael J. Behe, biologo e biochimico, famoso per il suo libro “Darwin's black box”⁵, sostiene che il mondo vivente è composto da strutture “irriducibilmente complesse”. Non solo gli organismi viventi più evoluti, come i mammiferi o lo stesso uomo, sono troppo complessi per essere spiegati in termini meccanicistici, ma anche le stesse cellule sono strutture irriducibilmente complesse; se manca qualcosa, una loro qualsiasi piccola parte, non potrebbero vivere. Lo spiega con l'esempio della trappola per topi. Quest'ultima è composta da una piattaforma, una molla, un gancio, un martelletto e una barra di metallo. Qualora mancasse anche solo una di queste parti la trappola non funzionerebbe più. Non solo peggiorerebbe il suo rendimento, ma l'intera sua funzione verrebbe completamente annullata. Il flagello di alcuni batteri è ancora più complesso della trappola, non lo si può negare, essendo composto da parti disposte in un ordine preciso, ciascuna con un ruolo esatto. Se venisse a mancare anche solo una proteina, delle trenta che compongono il meccanismo, il batterio sarebbe immobile e morirebbe. Morale, sostiene Behe, come nel caso della trappola per topi, qualcuno deve avere progettato il flagello. Ci deve essere stato un Creatore che ha pensato e costruito la prima cellula. Solo allora l'evoluzione avrebbe potuto procedere, più o meno, secondo il modello darwiniano.⁶

Riguardo alla irriducibile complessità del flagello, Kenneth R. Miller della Brown University di Rhode Island, USA, ha confutato l'ipotesi di Behe dimostrando che è possibile rinunciare a gran parte delle strutture del flagello per ottenere un meccanismo che porterebbe, comunque, ad un vantaggio evolutivo.⁷ Ora anche lo studio delle interazioni molecolari dà il proprio contributo nel respingere le argomentazioni dell'Intelligent Design mostrando come una certa complessità molecolare possa essere riducibile. La coevoluzione molecolare descrive, infatti, i passaggi

3 Vedi: Korthof G., “Molecular Drive: the Third Force in evolution”, <http://home.planet.nl/~gkorthof/korthof51.htm>. Vedi anche: Dover G.A., “Dear Mr. Darwin: Letters on the Evolution of Life and Human Nature”, Weidenfeld & Nicolson, London, 2000

4 Darwin C., “On the Origin of Species by means of natural selection”, 1859, cap VI (Difficulties on Theory).

5 Behe M.J., “Darwin's Black Box: The Biochemical Challenge to Evolution”, Free Press, New Jersey, 1994, 2006

6 Orr H.A., “DEVOLUTION: Why intelligent design isn't”, The New Yorker, Issue of 2005-05-30. Traduzione italiana in: Le scienze, 446, ottobre 2005, pp.36-43

7 Miller K.R., “The Flagellum Unspun: The Collapse of «Irreducible Complexity»”, In “Debating Design: From Darwin to DNA”, William A. Dembski, Michael Ruse (Edt), Cambridge University Press, 2004, pp.81-97

evolutivi che possono essersi compiuti per produrre una funzione all'apparenza irriducibile. E' questo il caso della complessità della interazione ormone-recettore. Sappiamo infatti che nei vertebrati la regolazione di molti processi cellulari è controllata da interazioni steroide-recettore che sono altamente specifiche.

Semplificando il ragionamento, possiamo dire che la coppia ormone-recettore costituisca una sorta di lucchetto-chiave, nel senso che uno è l'esatto complementare dell'altro. Così come una chiave apre un proprio lucchetto, così un determinato ormone si incastra specificamente al suo recettore. Se osserviamo un lucchetto ed una chiave che lo apre, pensiamo immediatamente che esista qualcuno che lo ha concepito, perché sembra impossibile che tale coppia lucchetto-chiave possa essersi evoluta attraverso un processo darwiniano. Necessiterebbero, a riguardo, almeno due variazioni complementari simultanee. Secondo Behe, i sistemi di natura lucchetto-chiave non possono evolversi e sono così "irriducibilmente complessi". Ma c'è dell'altro, perché se è già difficile pensare ad un lucchetto ed una chiave che si adattano lentamente l'uno all'altro, attraverso piccole variazioni negli incastrati in una interazione costante, ancora più difficile è credere che sia possibile che si siano evoluti separatamente e a distanza di tempo l'uno dall'altro. E' questo il caso dell'ormone adosterone che si sarebbe evoluto molto più tardi del suo recettore mineralcorticoide.

In un recentissimo numero di *Science*, un articolo di Christoph Adami⁸ e uno di Jamie T. Bridgham e coll.⁹ analizzano la coevoluzione di molecole ormonali e recettori che sembra, all'apparenza, irriducibile. Questi i dati:

- Il cortisolo attiva il recettore glucocorticoide al fine di regolare il metabolismo, l'infiammazione, l'immunità.
- L'aldosterone attiva il recettore mineralcorticoide che controlla (tra l'altro) l'omeostasi elettrolitica.
- La specificità è importante perché l'attivazione del glucocorticoide (invece del mineralcorticoide) da parte dell'aldosterone sarebbe estremamente nociva.
- Studi filogenetici dicono che i due recettori (glucocorticoide e mineralcorticoide) si sono evoluti da un antenato recettore corticoide comune, attraverso un evento di duplicazione genica, circa 450 milioni di anni fa, mentre l'aldosterone si è evoluto successivamente.

La domanda è quindi chiara: Come è possibile che senza la presenza dell'aldosterone (la chiave) si sia potuto evolvere un ormone mineralcorticoide (il suo lucchetto)? Come si sarebbe plasmata la loro incredibile specificità?

Il metodo da seguire per venire a capo di questo dilemma è quello di fare i passi a ritroso nel tempo. Si studiano le proprietà delle molecole (attraverso i moderni metodi filogenetici) e si cerca di ricostruire gli eventi. In questo modo i ricercatori hanno trovato che il recettore corticoide ancestrale (l'antenato sia del glucocorticoide che del mineralcorticoide) è attivato, come previsto, dal cortisolo ma anche, sorprendentemente, dall'aldosterone che a quei tempi non esisteva ancora. E' molto probabile che allora, al posto dell'aldosterone, ci fosse una molecola (un altro steroide) con caratteristiche ibride. Aharoni A. e coll.¹⁰ ritengono di avere trovato questa molecola: si tratta del 11-deossicorticosterone (DOC) in quanto attiva, anch'essa, il recettore corticoide ancestrale.

Ma quali sono stati i passi evolutivi di questa coevoluzione molecolare? Approfondendo le analisi filogenetiche si è scoperto che il corticoide ancestrale è stato soggetto a due mutazioni: la sostituzione della leucina-111 con la glutamina (L111Q) e la sostituzione della serina-106 con la prolina (S106P). Se, come abbiamo già detto, è molto improbabile che due mutazioni accadano contemporaneamente si deve essere verificato un percorso coevolutivo particolare (vedi figura).

8 Adami C., "Evolution: reducible complexity", *Science* 7-4-2006, n 312, n. 5770, pp.61-3

9 Jamie T. Bridgham, Sean M. Carroll, Joseph W. Thornton, "Evolution of Hormone-Receptor Complexity by Molecular Exploitation", *Science* 7 April 2006: Vol. 312. no. 5770, pp. 97 – 101

10 Aharoni A. et al., "The 'evolvability' of promiscuous protein functions", *Nat Genet.*, 2005 Jan, 37(1), pp.9-10

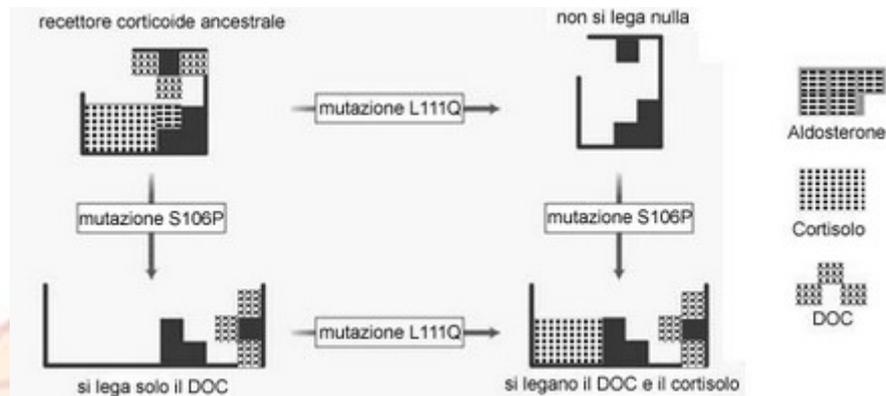


Figura 1. Evoluzione molecolare di un lucchetto e di una chiave biologica. Disegno schematico di un recettore di ormone ancestrale che lega l'aldosterone, il cortisolo e il DOC. La mutazione L111Q nel recettore è drastica perché elimina l'attivazione del recettore per ognuna delle tre molecole, modellata da una ostruzione della tasca di legame. La mutazione S106P, d'altra parte, non influenza il legame col DOC, mentre sia l'aldosterone che il cortisolo possono legarsi molto debolmente. Tuttavia, la presenza di entrambe le mutazioni permette al cortisolo di legarsi ancora fortemente, mentre l'aldosterone non si lega più. (modificata da: Adami C., "Evolution: reducible complexity", Science, vol. 312, pp.61-3)

In sintesi Bridgham e coll. sostengono che l'insensibilità del recettore glucocorticoide all'aldosterone si è evoluta attraverso la mutazione S106P seguita dalla mutazione L111Q in quanto il fenotipo intermedio è ancora vitale. Come si può notare, infatti, la mutazione L111Q non può essere avvenuta per prima in quanto non permette il legame con nessuno degli ormoni. Al contrario potrebbe essersi verificata per prima la mutazione S106P che porta ad un recettore che non lega né l'aldosterone né il cortisolo ma lega il DOC. A questo punto si sarebbe verificata la mutazione L111Q che (se preceduta dalla S106P) rimuove tutta la sensibilità all'aldosterone e viene a costituire il fenotipo recettore glucocorticoide. Le due mutazioni così sono diventate fortemente epistatiche: entrambe riducono la fitness del sistema (la L111Q molto fortemente) ma assieme il loro effetto è neutrale o migliore.

Se da un lato Bridgham e coll. sono convinti che la sequenza di eventi mutazionali da loro descritta sia la più probabile, dall'altro c'è chi ritiene che anche l'altra sequenza non possa essere esclusa a priori. Lenski e coll.¹¹ hanno mostrato che mutazioni molto deleterie possono essere salvate, sebbene di rado, da un'altra mutazione che le conferisce un beneficio caratteriale. Così la mutazione altamente deleteria può davvero apparire per prima, sempre che la seconda mutazione non avvenga troppo tardi. In ogni caso questi studi recenti indicano che queste "caratteristiche multiresidue" possono evolversi per davvero. La conoscenza di come si evolvono richiede lo studio di complesse interazioni epistatiche che permettono la comparsa di stati intermedi non letali i quali, a prima vista, non sembrano ovvi.

2 Coevoluzione tra specie e speciazione

Abbiamo già accennato che la coevoluzione, a differenza degli eventi inorganici non traumatici, favorisce spesso una rapida accelerazione delle dinamiche evolutive che possono procedere molto

¹¹ Lenski R.E. et al., "The evolutionary origin of complex features", Nature. 2003 May 8;423(6936):139-44

più velocemente di quanto ci si aspetti, modificando le interazioni nell'arco di pochi decenni. Durante gli ultimi 100 anni si sono coevolute decine di specie,¹² alcune delle quali verificatesi nell'arco del decennio 1990-99.¹³

La ricerca all'interno delle comunità naturali ha rivelato che l'interazione tra specie può svilupparsi in maniera molto diversa nei diversi territori. La selezione, infatti, può favorire alcuni caratteri rispetto ad altri e procedere più o meno velocemente a seconda delle variabili locali in gioco. In questi casi si parla di "mosaici di selezione", con punti caldi di coevoluzione (regioni dove agisce una vera selezione reciproca sulla interazione) immersi in una matrice (o lungo un gradiente) di punti freddi coevolutivi. L'interazione agisce sempre in uno scenario genetico in continuo cambiamento secondo i flussi genici, la deriva genetica casuale e l'estinzione locale delle popolazioni.

Un chiaro esempio viene fornito da uno studio empirico.¹⁴ I pini lodgepole (*Pinus contorta*) differiscono lungo il versante nordoccidentale del Nord America riguardo le dimensioni e la forma delle pigne che si sono adattate per contrastare due fattori di disturbo: il fuoco e i due principali predatori di semi, lo scoiattolo del genere *Tamiasciurus*, e un passeraceo chiamato red crossbill e che ha nome scientifico *Loxia curvirostra*. In alcune regioni delle montagne rocciose è evidente che i pini sono stati forzati ad una coevoluzione con i crossbill: le pigne si sono fatte più larghe in modo da ostacolare la raccolta dei semi da parte degli uccelli e, come contromisura, gli uccelli si sono modificati per contrastare il cambiamento delle pigne. In altre zone geografiche, il pino è stato soggetto a forze selettive differenti essendo costretto a fare i conti con la presenza di un considerevole numero di scoiattoli che predano i suoi semi. Studi recenti indicano che i punti caldi di coevoluzione tra i crossbill e i pini sono stati il risultato di eventi accaduti nel periodo post-pleistocene, dove c'erano regioni senza scoiattoli e abbondanti crossbill. Questo tipo di mosaico di selezione è probabilmente più comune quando le specie coinvolte nell'interazione sono i parassiti e i loro ospiti in quanto il loro flusso genico è limitato spazialmente.

E proprio l'interazione tra un ospite ed un endosimbionte mostra come la coevoluzione può essere così potente da portare alla speciazione. Sembra infatti, che il batterio *Wolbachia*, un endosimbionte di molte specie di insetti, sia in grado di influenzare l'evoluzione dei suoi ospiti e addirittura causare la nascita di nuove specie.^{15 16}

Se andiamo nel dettaglio, troviamo che *Wolbachia* vive nel citoplasma delle cellule delle vespe senza causare loro un danno evidente. Tuttavia l'esito della riproduzione di questi imenotteri è diverso se sono "infetti" o meno. Ovviamente, vespe (maschi e femmine) senza *Wolbachia* danno origine ad una prole normalmente vitale. Lo stesso accade quando gli individui maschi (sia "sani" che "infetti") si accoppiano con femmine "infette". In questo caso, però, tutti i figli contengono *Wolbachia* in quanto l'endosimbionte abita il citoplasma delle cellule uovo. Il fatto sorprendente è che i maschi "infetti" non riescono a fecondare le femmine "sane" per una sorta di incompatibilità tra il citoplasma degli spermatozoi e il citoplasma "sano" delle cellule uovo. In sostanza è sufficiente che uno dei due genitori ospiti *Wolbachia* affinché la prole sia sempre "infetta". Come risultato il batterio si diffonde rapidamente nella specie ospite.

Questo parziale isolamento riproduttivo potrebbe essere sufficiente a fare emergere una nuova specie di insetto. Bordenstein e collaboratori sostengono che se una popolazione di insetti ospiti

¹² Thompson J.N., "Rapid evolution as an ecological process", Trends Ecol. Evol. 13, 329 (1998).

¹³ *ivi*

¹⁴ Citato in: Thompson J.N., "The Evolution of Species Interactions", cit.

¹⁵ Bordenstein S.R., Patrick O'Hara F., Werren John H., "Wolbachia-induced incompatibility precedes other hybrid incompatibilities in *Nasonia*", Nature 409, 2001, p. 707-10

¹⁶ Dedeine F., Boulactreau M., Vavre F., "Wolbachia requirement for oogenesis: occurrence within the genus *Asobara* (Hymenoptera, Braconidae) and evidence for intraspecific variation in *A. tabida*", Heredity 95, 2005, pp.394-400

viene “infettata” con ceppi differenti di *Wolbachia* incompatibili fra loro in modo che gli ospiti “infettati” con un ceppo non possano produrre una prole con gli ospiti “infettati” con un altro ceppo, allora questa doppia barriera riproduttiva può essere sufficiente a portare ad una speciazione.

Questa situazione esiste veramente in natura ed esattamente nelle due vespe *Nasonia giraulti* (che vive nella parte est del Nord America) e *Nasonia longicornis* (che abita la parte ovest). Tra le due specie non esistono barriere riproduttive genetiche e quindi, se abitassero nella stessa zona geografica, potrebbero appartenere alla stessa specie (ma, come vedremo, solo in assenza di *Wolbachia*). Si sa, infatti, che la condizione di base per l'appartenenza a due specie diverse è l'isolamento riproduttivo che si esplica con una ridotta interfertilità, ma anche con la sterilità degli ibridi.

In particolare l'incrocio fra le due specie, *giraulti* e *longicornis*, non porta né a una riduzione del numero di uova fecondate depositate e neppure ad una produzione minore di prole vitale. Insomma, gli spermatozoi di una specie sono perfettamente compatibili con le uova dell'altra specie e le fertilizzano in maniera del tutto normale. Inoltre i nuovi nati ibridi non sono sterili e neppure i maschi ibridi presentano un corteggiamento anormale o una fertilità ridotta nei confronti delle femmine sia ibride che di entrambe le specie. Quanto detto riguarda solo gli individui delle due specie che non ospitano *Wolbachia*.

In natura le cose stanno in modo diverso e le due specie rimangono separate fra loro, non solo grazie alla distanza geografica, ma anche a causa della presenza del batterio *Wolbachia*. Bordenstein e collaboratori hanno scoperto che gli individui delle due specie vengono “infettati” da due ceppi diversi di *Wolbachia* e allora diventano incompatibili, in entrambe le direzioni, nella loro riproduzione. Vale a dire che in genere gli accoppiamenti tra i maschi di *longicornis* e le femmine di *giraulti* e, viceversa tra i maschi di *giraulti* e femmine di *longicornis*, producono una prole ibrida minima o addirittura non ne producono affatto. La prova definitiva che sia *Wolbachia* a mantenere la barriera riproduttiva fra le due specie di insetto è data dal fatto che se si trattano gli individui “infetti” di entrambe le specie con degli antibiotici per eliminare i *Wolbachia* presenti, allora gli accoppiamenti tra le due specie tornano a dare origine ad un numero normale di prole ibrida e vitale. Da quanto esposto è chiaro che *Wolbachia* induce un isolamento riproduttivo, evidente in *longicornis* e *giraulti*, prima ancora che si formino delle barriere riproduttive genetiche. La barriera riproduttiva non genetica introdotta forzatamente dal batterio *Wolbachia* può essere il primo passo per allontanare (geneticamente) una popolazione da un'altra così da indirizzarle lungo linee evolutive differenti.

In generale, un primo isolamento di questo tipo, dovuto cioè a fattori biotici esterni alla specie, col passare del tempo può consolidarsi con l'accumularsi di ulteriori barriere riproduttive genetiche interne (dovute alla sequenza evolutiva “classica”: mutazioni, variabilità e selezione darwiniana) così che le due popolazioni della stessa specie possono divergere fino a diventare due specie differenti anche in assenza di barriere geografiche.

Quanto detto non prova che la storia evolutiva di *giraulti* e di *longicornis* si sia realizzata in questo modo e che la speciazione di *Nasonia* sia imputabile a *Wolbachia*. Quanto detto vuol solo sottolineare come sia possibile portare a compimento una speciazione partendo da una situazione di interazione tra specie ben conosciuta in natura. Può apparire strano, ma un endosimbionte apparentemente innocuo può alterare, per davvero, il corso dell'evoluzione.

3 La coevoluzione globale porta a Solaris

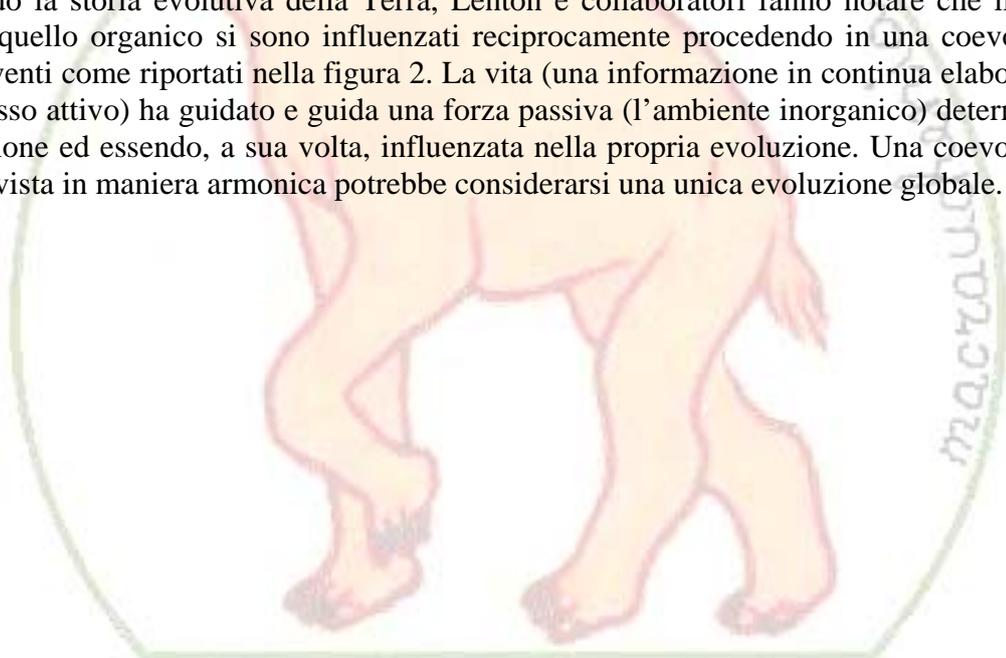
La storia del nostro pianeta ci insegna che anch'esso è stato testimone di una coevoluzione, per così dire, “globale”. Da un lato il mondo inorganico ha conosciuto enormi modificazioni, dall'altra il mondo organico ha percorso una propria evoluzione biologica. Da “palla di fuoco” bombardata da

asteroidi, con eruzioni vulcaniche e terremoti su scala planetaria, atmosfera riducente con forte presenza di elementi quali zolfo e cloro, temperature ben sopra i 100°C ecc., la Terra si è trasformata in quella che conosciamo oggi: un globo fatto di rocce e oceani con una atmosfera in cui l'ossigeno è abbondante e una temperatura superficiale media intorno ai 15°C: un mondo adatto a sostenere la vita. L'evoluzione biologica, dalla sua, si è indirizzata verso un aumento della complessità. Partendo da un brodo primordiale in cui fluttuava in modo caotico una enorme quantità di molecole organiche, la vita si è sempre più strutturata. Sono nati nuovi organismi in una scala di complessità sempre maggiore, organismi che si sono interrelati in comunità ed ecosistemi caratterizzati da un continuo scambio di materia ed energia.

Le trasformazioni avvenute nel mondo inorganico e nel mondo organico non sono indipendenti fra loro. Se la trasformazione del mondo inorganico ha indubbiamente influito sulla evoluzione biologica è anche vero che la Terra di oggi non sarebbe così com'è se la vita non l'avesse modificata. In sostanza, si è verificata una coevoluzione fra mondo organico e mondo inorganico, mondi che si sono trasformati e influenzati a vicenda nel corso delle ere geologiche.

Lenton e collaboratori lo hanno sottolineato in un articolo apparso su Nature dal titolo "Salire la scala della co-evoluzione"¹⁷ dove ampliano la teoria di "Gaia" fino a ipotizzare che la Terra sia destinata a trasformarsi in un pianeta simile a quello immaginato da Stanislav Lem nel romanzo fantascientifico "Solaris" e visto nell'omonimo film diretto da Steven Soderbergh. Proprio come Solaris la Terra si starebbe trasformando in un tremendo super-organismo super-intelligente.

Analizzando la storia evolutiva della Terra, Lenton e collaboratori fanno notare che il mondo inorganico e quello organico si sono influenzati reciprocamente procedendo in una coevoluzione scandita da eventi come riportati nella figura 2. La vita (una informazione in continua elaborazione, cioè un processo attivo) ha guidato e guida una forza passiva (l'ambiente inorganico) determinando la sua evoluzione ed essendo, a sua volta, influenzata nella propria evoluzione. Una coevoluzione, appunto, che vista in maniera armonica potrebbe considerarsi una unica evoluzione globale.



¹⁷ Lenton T.M., Schellnhuber H.J., Szathmáry E., "Climbing the co-evolution ladder", Nature 431, p.913, 2004

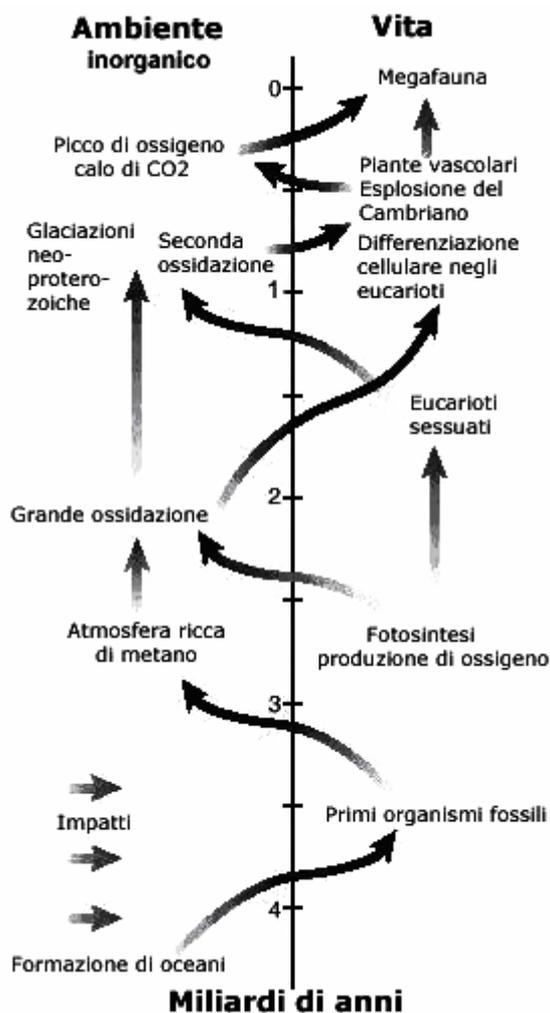


Figura 2. Le influenze reciproche tra ambiente e informazione hanno caratterizzato la storia evolutiva della Terra sin dai 4 miliardi di anni fa quando cessarono gli impatti degli asteroidi che la sterilizzavano e la temperatura si abbassò sotto la soglia dei 100°C. Il vapore acqueo condensò e la conseguente formazione degli oceani primordiali (mondo inorganico) permise la nascita del mondo organico e dei primi esseri viventi. Questi ultimi trassero dall'ambiente sia l'energia che i composti strutturalmente utili scaricando all'esterno i prodotti di rifiuto. L'evoluzione delle prime forme viventi permise la nascita di altri organismi che iniziarono a cibarsi dei loro prodotti di scarto. "Questi cicli sono manifestazioni in grande scala della natura auto-catalitica della cellula, nucleo centrale del «metabolismo» globale ancora in essere."

La vita rimase energeticamente limitata fino alla nascita della fotosintesi che cambiò il volto dell'atmosfera iniziando a rilasciare ossigeno. La fotosintesi aumentò l'energia disponibile per i processi organici che si estesero a livello globale. Tuttavia la fotosintesi fu solo uno dei fattori, sebbene il principale, a portare alla grande ossidazione dell'atmosfera che si completò circa 2,2 miliardi di anni fa. Probabilmente sono risultati determinanti anche i cambiamenti tettonici che modificarono la «anatomia» della Terra facilitando la comparsa dei mari continentali dove il carbonio organico ridotto poteva raggiungere i sedimenti ed essere sepolto. Sebbene lo stato energetico fosse sufficiente affinché gli eucarioti dominassero il pianeta, dovevano ancora svilupparsi una membrana elastica che avvolgesse la cellula, uno scheletro cellulare e un sistema di divisione cellulare che permettesse una più efficiente produzione di variabilità. Sembra chiaro che questi cambiamenti furono lenti e difficili in quanto richiesero la fissazione di migliaia di mutazioni rare. (Modificata da: Lenton T.M., Schellnhuber H.J., Szathmáry E., "Climbing the co-evolution ladder", Nature, Vol. 431, p.913, 2004)

Le cellule eucariote, profondamente coinvolte nelle severe glaciazioni Neoproterozoiche di 800-600 milioni di anni fa e che furono accompagnate da un secondo innalzamento dell'ossigeno, in seguito iniziarono a colonizzare le terre emerse. E' probabile che da allora incominciarono ad agire le forti selezioni per quei caratteri che accelerarono l'accesso ai nutrienti legati alle rocce. La disponibilità dei silicati avrebbe automaticamente rimosso l'anidride carbonica dalla atmosfera e raffreddato il pianeta mentre la disponibilità del fosforo avrebbe aumentato la produttività globale e contribuito all'aumento dell'ossigeno atmosferico. Questo aumento diede il via all'esplosione del cambriano: ovvero a una diversificazione di animali di dimensioni sempre maggiori. In seguito il successo delle piante di terra vascolari, che causò un'ulteriore crescita di ossigeno e una diminuzione di CO2 in atmosfera, giocò un ruolo importante nel creare le condizioni ambientali in cui si sviluppò la megafauna che esiste attualmente.

La continua interazione mondo inorganico/organico sta continuando ai giorni nostri nella interazione uomo/ambiente. La nostra comparsa e la nostra evoluzione è stata scandita da eventi inorganici. Sembra che la nascita della nostra specie sia dovuta all'aprirsi della Rift Valley, un fatto puramente geologico, e la nostra trasformazione da nomadi cacciatori-raccoglitori a sedentari agricoltori-allevatori sia da imputare ad una estesa siccità che avrebbe costretto i nostri antenati a insediarsi sulle rive dei fiumi più grandi quali il Nilo, il Tigri, l'Eufrate, l'Indo. D'altra parte l'uomo ha influito nel corso della storia del pianeta. Sin da quando era primitivo è stato probabilmente la

causa principale della estinzione di massa della megafauna preistorica.¹⁸ Poi il suo impatto sul territorio è andato sempre più aggravandosi subendo una accelerazione dall'epoca della rivoluzione industriale in avanti. Oggi, sia a causa della alta densità demografica che per i consumi dei paesi più industrializzati, la situazione è divenuta critica.

Lenton e collaboratori sostengono che, sebbene non si sia ancora arrivati ad una situazione simile a Solaris (“non abbiamo ancora raggiunto questo punto evanescente della storia evolutiva”, scrivono) la condizione attuale della Terra comincia ad essergli paragonabile (“La civiltà moderna perturba -per non dire domina- i processi e i componenti su grandi scale, del pianeta”). “Il «metabolismo» globale (i cicli degli elementi essenziali, compresi il carbonio, l'azoto, il fosforo e lo zolfo) e le caratteristiche della «anatomia» globale (la conformazione strutturale del territorio dei continenti abitabili) sono in gran parte un prodotto della incessante azione socio-economica.”

4 Conclusioni

Come si può capire da questo breve excursus, il termine coevoluzione è ormai diventato di uso comune a più livelli, da quello molecolare fino a quello globale, comprendendo, oltre ai significati evidenziati in questo scritto, altri quali la coevoluzione culturale.¹⁹

Riguardo la coevoluzione molecolare abbiamo avuto modo di sottolineare l'interesse scientifico, e non solo. Ripercorrere le strade coevolutive del passato ci insegna che il complesso potrebbe essere riducibile. Al momento è una questione di mancanza di conoscenza. Esorterei quindi i sostenitori del disegno intelligente a riflettere sulle parole di Darwin riguardo la “sospensione del giudizio”.²⁰ Darwin, molto intelligentemente, era un agnostico e professava lo “esercizio del dubbio in campo naturalistico”. Ma non ci si deve confondere: Darwin non era ateo, non escludeva la possibilità che esistesse un Dio, d'altra parte era consapevole che non potesse essere dimostrata né la sua esistenza né la sua non esistenza. Al giorno d'oggi mi pare che la sospensione del giudizio rimanga la posizione più saggia da tenere. Questo non limita i fedeli ad essere credenti e neppure nega la possibilità agli incerti di non credere. La scienza non può ancora, nel caso del “intelligent design”, esprimersi compiutamente decretando che il complesso può essere riducibile o meno. Così sono scientificamente sterili le diatribe del creazionismo riguardo all'intervento di Dio come creatore globale, come descritto nel Genesi, o come creatore speciale che di tanto in tanto interviene a creare una specie o un'altra qui e là nel mondo. Queste diatribe riguardano esclusivamente la fede, non la scienza. La ragione ci dice, senza ombra di dubbio che, più avanza la conoscenza e più il complesso sembra riducibile.

Riguardo la coevoluzione delle specie bisogna sottolineare l'importanza pratica oltre a quella teorica. La conoscenza dei meccanismi di interazione fra specie diventa fondamentale soprattutto quando si pensa alla salute pubblica e alla salvaguardia ambientale. Come esempi, nel primo caso cito le relazioni intime fra ospiti e parassiti in quanto la competizione all'interno dell'ospite guida l'evoluzione della virulenza,²¹ nel secondo caso lo studio delle dinamiche coevolutive per il mantenimento della biodiversità²² e il ripristino degli ecosistemi in seguito ad eventi distruttivi.²³

¹⁸ Pagano P., “Uomo e biodiversità: la preistoria e il massacro della megafauna”, *Naturalmente*, anno 12, numero 1, feb 1999, pp.30-36, 1999

¹⁹ Marzluff J.M., Angell T., “In the Company of Crows and Ravens”, Yale Uni Press, 2005, citato in: Dally J., “Crowing About Culture”, *Science*, vol. 310, p.1433, 2005

²⁰ Barsanti G., “Il pluralismo di Darwin”, in: Scapini F. (a cura di), “La logica dell'evoluzione dei viventi”, Firenze Uni Press, 2005, pp.7-10

²¹ Ebert D., “Experimental Evolution of Parasites”, *Science*, vol. 282, pp.1432-15, 1998

²² Bascompte J, Jordano P, Olesen JM, “Asymmetric Coevolutionary Networks Facilitate Biodiversity Maintenance”, *Science*, vol. 312, pp.431-3, 2006

Altri argomenti esaminano le interazioni e l'evoluzione del sesso²⁴ e, infine, l'importanza della plasticità fenotipica nella interazione e nella evoluzione delle specie.²⁵

E proprio la plasticità fenotipica dà sostegno a quella che il compianto Michele Sarà chiama "evoluzione costruttiva".²⁶ Questa ipotesi, che mira ad una nuova visione della evoluzione discostandosi notevolmente dal paradigma attualmente più accreditato della Sintesi, tratta l'evoluzione come una caratteristica universale e non solo legata al mondo vivente. Ma, a differenza di quanto scritto da Lenton e collaboratori che parlano in maniera pessimistica della Terra come una spaventosa Solaris, l'evoluzione costruttiva si presenta come una visione olistica decisamente ottimista e armonica.

Secondo Michele Sarà, un'evoluzione biologica fondata, come il neo-darwinismo, sulla selezione e sulle mutazioni causali è un'evoluzione selettiva. Ma se "si considera che gli adattamenti sono prodotti *in nuce* durante lo sviluppo degli organismi in rapporto con gli altri caratteri e le richieste ambientali è lecito parlare di evoluzione costruttiva perché l'aspetto costruttivo diventa predominante."²⁷ "Mentre la teoria evoluzionistica della Sintesi [...] può riferirsi solo ai viventi, la teoria costruttiva può essere estesa a tutti i processi del cosmo, a partire dalla formazione degli atomi e delle molecole per proseguire, dopo l'evoluzione biologica, con l'evoluzione culturale e psico-spirituale dell'uomo". Ecco allora che l'evoluzione costruttiva si propone come un nuovo paradigma evolutivo in contrapposizione alla Sintesi. Perché, mentre la visione classica della Sintesi è ancora legata allo "steccato eretto da Weissman sulla separazione delle cellule somatica e germinale" che negava in modo assoluto l'eredità dei caratteri acquisiti teorizzata per la prima volta da Lamarck, la visione costruttivista implica la possibilità che l'ambiente possa essere determinante nella "scelta" e nella fissazione dei caratteri ereditabili, visione che è evidentemente di stampo lamarckiano. I filoni su cui si basa questa influenza dell'ambiente sugli organismi (stiamo parlando di coevoluzione) riguardano l'epigenetica, le mutazioni adattative e infine quello della plasticità fenotipica. Il tutto a formare un "complesso e olistico supersistema evolutivo".

Tuttavia, se da un lato questa visione olistica ha il pregio di stimolare la mente degli scienziati, gli ancora scarsi studi scientifici a suo sostegno lasciano prevedere che molto ci vorrà perché possa essere riconosciuta appieno. Rimaniamo quindi in attesa di nuove scoperte a supporto di questa nuova visione del mondo, ma per il momento rimaniamo legati al pensiero classico neo-darwiniano.

²³ Brown J.H., Whitham T.G., Ernest S.K.M., Gehring C.A., "Complex Species Interactions and the Dynamics of Ecological Systems: Long-Term Experiments", *Science*, vol. 293, pp. 643-50, 2001

²⁴ Otto S.P., Nuismer S.L., "Species Interactions and the Evolution of Sex", *Science*, vol. 304, pp.1018-20, 2004

²⁵ Agrawal A.A., "Phenotypic Plasticity in the Interactions and Evolution of Species", vol. 294, pp.321-6, 2001

²⁶ Sarà M., "L'evoluzione costruttiva. I fattori d'interazione, cooperazione ed organizzazione", UTET libreria, 2005

²⁷ Sarà M., "Una teoria d'evoluzione costruttiva estesa a biologia, fisica e cultura", in: Scapini F. (a cura di), "La logica dell'evoluzione dei viventi", Firenze Uni Press, 2005, pp.11-24