

Oltre la “Sintesi Moderna”: la soluzione delle antinomie della Biologia del Ventesimo secolo*

Marcello Buiatti

mbuiatti@dbag.unifi.it

Abstract

The aim of this paper is to outline the way biological sciences study the living state of matter. First of all, the relation between biology and reductionistic methodologies is addressed. Reductionism is viewed as directly tied with a mechanistic way of thinking. Second, the *Modern Synthesis* and the *Central Dogma* are critically exposed and discussed. The attention then focuses on alternative research programs such as Lewontin's, Kimura's and Waddington's theoretical and methodological proposals. Moreover, new results in the fields of both Genetics and Molecular Biology allow the author to switch from the informational paradigm to the metaphor of the *network*. Epistemological conclusions are finally drawn in favour of the overcoming of traditional dichotomies, such as chance-necessity, continuous-discrete, dependence-independence, and reductionism-antireductionism.

Keywords: Darwin, evolution, Modern Synthesis, Central Dogma of Biology, Genetics.

1. Darwin e la sua immagine “moderna”

Il dibattito sull'evoluzionismo attualmente in corso e in particolare lo scontro, quasi inedito nel nostro Paese, fra evoluzionisti e creazionisti, ha del surreale perché è tutto centrato su un Darwin che non è mai esistito, attaccato da sedicenti sostenitori di un non meglio specificato “disegno intelligente”. Il lato peggiore della situazione sta nel fatto che tanto chi appoggia Darwin come chi lo combatte, nella maggior parte dei casi o non ha letto bene le sue opere o ne rimuove alcuni contenuti che non sono coerenti con la visione della evoluzione che nel nostro Paese è ancora dominante. Quando non si arriva ad affermare che Darwin attribuiva l'evoluzione ad eventi casuali, si confonde comunque la teoria darwiniana con il neo-darwinismo o, ancora più spesso, con una delle diverse correnti presenti nel grande insieme teorico della “sintesi moderna”, per usare il termine introdotto da Julian Huxley nel volume dallo stesso titolo del 1942.

Charles Darwin, lui, era molto diverso dall'immagine che se ne dà nel dibattito attuale. Era, come è noto, un naturalista ottocentesco non contaminato ancora dalla rivoluzione

* Il presente saggio è tratto dal volume, *Il futuro di Darwin. L'individuo*, a cura di Lorenzo Calabi UTET, Torino 2008.



metodologica e concettuale moderna a cui le Scienze della vita approdarono compiutamente solo nel Novecento. Di conseguenza Darwin basava le sue teorie essenzialmente sulla osservazione della natura in cui le singole unità (organismi, specie) venivano studiate dall'esterno, nella loro interezza. Molto raramente Darwin ha condotto esperimenti allo scopo di dimostrare o eventualmente modificare una sua ipotesi e comunque in quei pochi casi in cui li ha condotti non ha cercato di trarne leggi universali. Anche per questo Darwin rifuggiva dall'uso della matematica o di qualsiasi genere di modellizzazione come si evince da una serie di esempi in cui ha effettuato esperimenti ma non sembra essere stato capace di trarre conseguenze dai dati ottenuti.

È questo il caso di quelli sulla fecondazione di piante provenienti da linee diverse in cui senza rendersene conto ha scoperto il fenomeno del "vigore degli ibridi" ("eterosi") dimostrando che i figli avevano valori di altezza maggiori di ambedue i ceppi parentali. La sua assoluta apertura mentale risulta evidente dalla seguente affermazione nella sua autobiografia:

Per quanto io possa giudicare.... Ho sempre cercato di mantenere la mia mente libera in modo da poter abbandonare qualsiasi ipotesi a prescindere da quanto amata.... Non so ricordare nessuna ipotesi che io abbia formulato che non abbia poi dovuto abbandonare o modificare radicalmente.

Questo atteggiamento ha permesso a Darwin di lasciarci più che una teoria, completa in tutti i suoi dettagli, una visione complessiva della vita e delle sue dinamiche con aspetti che per lui erano facce complementari di sistemi viventi "multiversi" e per questo non facilmente definibili in modo univoco. Non a caso, come è noto, per Darwin le "leggi" della evoluzione, così come sono enunciate nella edizione del 1872 della "Origine" sono:

- La legge dell'accrescimento attraverso la riproduzione
- La eredità praticamente implicita nelle riproduzione
- La variabilità, dovuta all'azione diretta ed indiretta delle condizioni di vita e dell'uso e disuso degli organi
- Un ritmo di accrescimento così alto che porta ad una lotta per la vita e di conseguenza alla selezione naturale.

Diversamente dai neo-darwinisti quindi, Darwin attribuiva un ruolo importante agli effetti dell'ambiente sulla evoluzione senza trovarli contraddittori con la sua originale scoperta della selezione naturale direttamente collegabile con la ereditarietà. Per questo, sempre nella edizione del 1872 della "Origine", si è difeso energicamente dalla accusa di limitare alla selezione naturale le cause del cambiamento degli esseri viventi affermando:

Dato che le mie conclusioni sono state riportate in modo sbagliato ed è stato detto che io attribuisco la modificazione delle specie solo alla selezione naturale mi permetto di notare che nella prima edizione di questo lavoro e dopo, io ho scritto in un brano significativo e cioè alla fine della introduzione, le seguenti parole: Io sono convinto che la selezione naturale sia stata il più importante ma non il solo processo di modificazione.

E ancora, nel 1880, su *Nature* ribadiva lo stesso concetto:

Per quanto mi riguarda io credo che nessuno abbia mai descritto tante osservazioni sull'effetto dell'uso e del disuso quante ne ho riportate io nel mio *La variazione negli animali e nelle piante*, e del resto quelle



osservazioni hanno prodotto una quantità di fatti che provano l'effetto diretto sugli organismi delle condizioni esterne.

Analogamente anche se è probabilmente in parte vero che per Darwin vi è del caso nella generazione della variazione, senza dubbio il caso non la governa interamente se non altro perché i componenti degli esseri viventi non sono indipendenti l'uno dall'altro ma collegati fra di loro e inevitabilmente il legame fra componenti di un sistema costituisce di per sé un vincolo alla casualità. Proprio nella "Variazione" Darwin chiarisce questa questione scrivendo:

La variabilità è regolata da molte leggi sconosciute, la più importante delle quali può essere considerata la legge dello sviluppo correlato. Con questa definizione io intendo dire che le diverse parti di un organismo sono così strettamente connesse che quando avvengono piccole variazioni in una qualche parte e vengono accumulate dalla selezione naturale, le altre parti sono soggette a modificazione.

Un organismo quindi non è il risultato della semplice somma delle sue parti ma un insieme di elementi collegati che costituiscono un contesto e che rispondono a contesti esterni. La variazione di uno degli elementi quindi, comporta effetti anche sugli altri alterando la struttura complessiva dell'organismo. Questa affermazione a mio parere è di grande importanza perché smentisce il postulato "moderno" che definisce un organismo come semplice somma delle parti mentre invece è anche determinato, secondo Darwin, dalla loro interazione e dalla interazione del sistema con il contesto esterno. La variazione non è quindi interamente casuale né del resto completamente deterministica in quanto il risultato di un singolo cambiamento a livello dell'organismo è influenzato dagli altri elementi componenti e dall'esterno ed è quindi almeno in parte imprevedibile. La dipendenza dell'effetto del cambiamento di un componente dalla presenza degli altri apre la strada al concetto di "selezione interna" enunciato molto tempo dopo Darwin da Gregory Bateson nel suo "Mente e Natura". È infatti logico pensare che una modificazione come una mutazione che non sia bene integrata nel contesto pre-esistente può provocare danni all'organismo in cui avviene e comunque diminuirne la fitness per cause "interne" non direttamente legate l'azione selettiva operata dall'ambiente (la selezione naturale).

La concezione che Darwin aveva della vita era quindi unitaria e integrata e non basata su antinomie (caso e necessità, interno ed esterno, eredità e ambiente, indipendenza e connessione ecc.) come invece tuttora si sostiene e appare nella "controfigura" di Darwin che ci viene presentata in gran parte dei testi scolastici ed universitari del nostro tempo.

2. Il processo di frammentazione del ventesimo secolo e la nascita delle antinomie

La "rottura" della concezione unitaria darwiniana e in genere del naturalismo ottocentesco basato sulla osservazione non è di ora ma è avvenuta non a caso all'inizio del Novecento, il secolo appunto della rottura della armonia, della frammentazione, della estensione del metodo riduzionistico già usato in fisica e chimica, alle scienze della vita. Probabilmente anche a causa della mentalità dominante nel periodo delle rivoluzioni industriali, in molti campi dello scibile si tende nel secolo scorso, ad abbandonare la ricerca di teorie unificanti, di sintesi integrate delle conoscenze e ci si rivolge invece alla scomposizione dei sistemi in componenti ed al loro studio come base per l'acquisizione di conoscenza, con l'idea che questo processo



possa portare a comprendere più rapidamente e in modo più approfondito i sistemi naturali. Questo anche per acquisire una maggiore capacità di prevedibilità e soprattutto un controllo migliore della natura, paragonabile a quello che si ha sulle macchine o, in genere sui prodotti materiali dell'ingegno umano. Questi, infatti, non a caso sono costruiti assemblando componenti diversi che non interagiscono l'uno con l'altro e quindi sono uguali a se stessi indipendentemente dal fatto che siano uniti o connessi agli altri.

La tendenza a considerare discreti e indipendenti i componenti di base della natura dei primi del Novecento è esemplificata, nelle scienze della vita, dalla scoperta della natura discreta dei fattori ereditari da parte di Gregorio Mendel, e dalla estensione di questa concezione al processo evolutivo con la "Teoria delle mutazioni" di Hugo De Vries, ma si trova anche in altri campi della conoscenza e della cultura di quella epoca, a dimostrare un legame per me evidente fra scelte, da parte delle scienze e in particolare di quelle della vita, degli oggetti da osservare e dell'angolo visuale da cui osservarli e un contesto sociale in cui le macchine sono viste come sinonimo di progresso. La discontinuità infatti è presente nei primissimi anni del ventesimo secolo nella teoria dei quanti di Max Planck ma anche nella musica dodecafonica con la rottura della armonia e nella pittura, nella tecnica di scomporre i colori in componenti puntiformi dando modo all'osservatore di ricomporli che si trova in alcune correnti vicine all'impressionismo e in particolare nel "Pointillisme" di Seurat.

Più tardi, la rottura come processo dominante di un'epoca è teorizzata in alcune correnti Dada e soprattutto nel futurismo. I futuristi anzi sono probabilmente quelli che meglio degli altri movimenti hanno esplicitato il significato della discontinuità, della frammentazione, della equazione progresso = macchinizzazione. Lo si può desumere dal Manifesto di Marinetti del 1909 e da quello della pittura futurista del 1910, che considerano la rottura e la frammentazione processi necessari e liberatori associando ad esse la violenza e contemporaneamente la glorificazione della "civiltà delle macchine" come si può vedere dalla utilizzazione proprio di una macchina rombante come simbolo del movimento. Nel Manifesto del 1910 il "divisionismo complementare" viene considerato essenziale per la rappresentazione della realtà e la scomposizione del movimento la si trova in molta pittura di Boccioni, Balla ed altri mentre anche la poesia è spesso volutamente "spezzata" in parole. Questi modi di rappresentare la natura e la vita umana possono risultare "gradevoli", come è all'inizio del secolo in Seurat e nei suoi seguaci, ma più spesso vengono usati per interpretare una dura epoca di conflitti, incertezze, rottura con le armonie dell'Ottocento.

Così, mentre i futuristi scompongono i movimenti allo scopo di illustrare la bellezza del progresso "meccanico", una parte degli espressionisti centro-europei e in genere del movimento Dada "urla" il dolore della rottura prefigurando la tragedia immensa della seconda guerra mondiale.

In area scientifica la "discretizzazione" della natura è prima di tutto metodologica ed inizia con l'utilizzazione del metodo riduzionista il cui uso anche nelle scienze della vita era stato auspicato nel "Manifesto dei medici materialisti" già nel 1847 in cui si dichiarava la sostanziale equivalenza dei sistemi viventi a quelli non viventi.



Il primo a usarla concretamente, come si diceva, è probabilmente stato il fisico Gregorio Mendel, precursore, nella seconda metà dell'Ottocento della "rivoluzione" dell'inizio del secolo successivo. Mendel, infatti, scelse di studiare i processi ereditari nella pianta di pisello partendo dalla analisi del comportamento di singoli caratteri presenti in forme alternative discrete, abbandonando così la prassi ad esempio di F. Galton, che invece, con ben poco frutto, lavorava su caratteri a distribuzione continua (il peso, l'altezza, ecc.) analizzati di generazione in generazione, con metodi statistici. La scelta compiuta da Mendel permetteva di contare nelle progenie derivate da un primo incrocio, la frequenza dei "varianti" alternativi di caratteri come il colore del fiore, del baccello, la forma di questo ecc., e di elaborare così leggi probabilistiche che rendessero possibile prevedere la dinamica dei rapporti numerici fra varianti in generazioni successive. Ne risultarono, appunto, le leggi di Mendel da cui discendono alcuni concetti fondamentali sulla struttura – funzione dei corredi genetici degli individui. Mendel tuttavia non si spinse oltre l'esperimento e anzi, non contento di averlo condotto su una sola specie di piante, chiese a un grande botanico contemporaneo (von Naegeli) di indicargliene un'altra su cui ripetere le prove. Purtroppo von Naegeli gli suggerì una specie che non si riproduceva per fecondazione ma produceva falsi semi costituiti da cellule della pianta madre. Per questo le nuove prove di Mendel non dettero risultati positivi perché ovviamente i cosiddetti figli erano tutti uguali ed identici alla madre. Mendel, allora, da bravo e onesto ricercatore quale era, abbandonò gli studi della ereditarietà e riprese a lavorare nel suo campo preferito, quello della modellizzazione matematica dei vortici di aria, oltre a dedicarsi alla apicoltura. Per lungo tempo (evidentemente i tempi non erano maturi) le ricerche dell'abate di Brno restarono sconosciute ai più.

Poi, all'inizio del Novecento i suoi esperimenti furono ripetuti indipendentemente da tre ricercatori che confermarono pienamente i risultati già ottenuti. Fu allora e solo allora che uno dei tre, Hugo de Vries, estese i concetti impliciti nelle leggi di Mendel all'evoluzione elaborando una vera e propria teoria che chiamò "Mutations Theorie" (Teoria della mutazione).

Vediamo ora di analizzare a fondo il processo che, partito da Mendel, il quale aveva lavorato su una sola specie e su alcuni caratteri scelti appositamente per il loro carattere discreto, (Mendel scartò per intenderci i caratteri a distribuzione continua di Galton), portò poi all'elaborazione di una teoria "universale" e cioè potenzialmente valida per tutti gli esseri viventi.

L'operazione compiuta dall'abate di Brno era partita dalla scelta di studiare "una parte del tutto" e cioè i caratteri che si comportavano come discreti, giudicata però come rappresentativi di tutti i caratteri di tutti gli organismi e quindi utilizzabile pienamente per l'elaborazione di una teoria universale. Da questo punto di vista il procedimento mentale era l'opposto di quello compiuto da Darwin che aveva studiato la variazione e l'evoluzione di moltissimi animali e piante e solo dopo un lunghissimo lavoro di raccolta di dati ne aveva tratto "leggi" generali ma non universali perché a detta dello stesso autore erano modificabili con nuove osservazioni. A riprova di questo, Darwin, a differenza di De Vries, non aveva usato la matematizzazione dei risultati come marchio di universalità. In De Vries in realtà, il processo di "scomposizione" dell'oggetto di studio non prevedeva neanche l'assemblaggio di tutte le



conoscenze dei componenti come previsto dal riduzionismo, ma si limitava alla osservazione di una parte di essi dando per acquisito che gli altri si comportassero nello stesso modo.

È utile notare che il metodo della “universalizzazione delle parti” veniva usato da De Vries anche per rifiutare, come di fatto fece, la stessa teoria Darwiniana che non si limitava davvero allo studio della variazione in quanto tale, ma faceva riferimento alla storia a lungo termine degli esseri viventi e alle loro interazioni con l’ambiente.

Non è stato per caso quindi che De Vries abbia contestato il principio stesso della selezione naturale sottolineando invece il ruolo del caso, dato che nei lavori di Mendel e dei suoi riscopritori la distribuzione dei caratteri nel breve periodo di poche generazioni appariva del tutto casuale.

La “teoria neutralista” di De Vries del 1902, che poi è stata ripresa ben 60 anni dopo da Motoo Kimura è basata sul “determinismo stocastico” degli organismi le cui caratteristiche sarebbero interamente determinate dai geni i cui varianti però verrebbero ridistribuiti a caso di generazione in generazione.

Hugo De Vries e i “mendeliani”, prendono quindi dalla teoria darwiniana il solo ruolo del caso che per Darwin era semmai limitato all’insorgere di una parte della variazione (il resto era dovuto all’azione dell’ambiente), vi aggiungono un determinismo assoluto non presente in Darwin e ne traggono una teoria che diventa quindi apertamente anti-darwiniana tanto da attirarsi le ire dei seguaci di Galton. Anche questi, tuttavia, a ben vedere, fanno una operazione non tanto diversa in quanto accettano completamente il determinismo, evidentemente “di moda” all’inizio del secolo scorso, contestando invece la natura discreta dei componenti del patrimonio genetico.

È su questo punto che lo scontro diretto è particolarmente aspro anche perché De Vries, in base ad una serie di osservazioni sperimentali di “mutazioni” che determinavano un cambiamento molto drastico del fenotipo, propose che anche l’evoluzione tutta fosse determinata da un susseguirsi di eventi discreti (i “salti”), attaccando su questo punto Darwin. Questa impostazione “saltazionista” verrà poi abbandonata dai neo-darwinisti anche perché i dati di De Vries erano stati ottenuti su una pianta (l’*Oenothera*) che ha una struttura genetica molto particolare, dovuta al comportamento del corredo cromosomico caratteristico solo di quel Genere .

All’inizio del ‘900 si combattono quindi aspramente due teorie, la mendeliana e quella dei seguaci di Galton, ambedue nate in qualche modo dalla scomposizione del darwinismo di Darwin. Sono in gioco in questo caso le due antinomie caso/necessità e continuo/discreto le cui alternative, nelle opere dell’autore dell’ “Origine”, erano invece anche se non esplicitamente, caratteristiche contemporaneamente presenti nella natura vivente. È in qualche modo la frammentazione del pensiero darwiniano e lo studio di parti separate che portano da un lato ad un aumento di conoscenza ma dall’altro anche al sorgere di antinomie fra chi studia “facce” diverse della vita e ne vuole comunque trarre teorie universali.

Alla frammentazione e scomposizione della teoria Darwiniana si accompagna poi la divisione delle stesse scienze della vita in discipline differenziate che usano modi e tecniche diverse per osservare da diversi punti di vista la natura, guadagnando in profondità ma perdendo le connessioni e la capacità di sintesi di concetti solo apparentemente contrastanti.



Naturalmente questo processo, come tutti quelli della vita, è tutto fuorché lineare e le scienze procedono per antinomie, ma anche per tentativi di sintesi o mediazione. Una sintesi molto variegata e complessa è quella che matura nella prima metà del '900 quando un folto gruppo di genetisti, matematici, naturalisti cerca di conciliare caso e necessità da un lato e discreto/continuo dall'altro.

Julian Huxley, in un famoso volume del 1942 chiama, come è noto, la nuova teoria "The modern synthesis" (La sintesi moderna). La sintesi moderna, o in altre parole, il neo-darwinismo, sarà tuttavia in realtà un corpus teorico molto variegato che verrà assunto come la teoria prevalente della evoluzione, spesso, anche ai giorni nostri confusa con il pensiero di Darwin.

I concetti fondanti di questo insieme del neo-darwinismo possono essere così riassunti:

- a) Totale corrispondenza fra gene e carattere e fra genotipo e fenotipo. Quest'ultimo è completamente determinato dalla somma dell'azione dei geni e dei loro "varianti" (alleli), ognuno indipendente dagli altri. A causa di questa corrispondenza univoca fra fattori ereditari e fenotipo il soggetto della evoluzione di fatto non è più l'organismo (l'individuo vivente) ma il suo corredo genetico e cioè la somma dei suoi alleli.
- b) Evoluzione come processo derivante dalla modificazione continua nel tempo delle frequenze di elementi discontinui (gli alleli) di ogni gene.
- c) Tre processi fondamentali dirigono l'evoluzione che è considerata di fatto essere solo la modificazione delle frequenze all'eliche di generazione in generazione e sono: la selezione naturale, la deriva genetica, la mutazione. La prima agisce facendo prevalere alcuni varianti (alleli) sugli altri in quanto gli individui che ne sono dotati si riproducono di più (hanno cioè una maggiore capacità di adattamento o "fitness"). È in questo caso il contesto (l'ambiente) che determina quali alleli verranno fissati dalla selezione. Il processo è quindi essenzialmente deterministico. Il caso invece governa sia la deriva genetica che si basa su "errori di campionamento" degli alleli, che la mutazione, data dal cambiamento casuale di un allele in un altro e viceversa.

È cioè in b) e c) che sta essenzialmente, secondo i neo-darwinisti, il compromesso derivato dalla somma di eventi interamente casuali (mutazione e deriva) e necessari (selezione), che permette di conciliare i dati di Mendel con la teoria darwiniana operando la sintesi moderna.

Giova sottolineare qui che al "compromesso" raggiunto dalla sintesi moderna fra la teoria di Darwin e le scoperte dei mendeliani nella prima metà del ventesimo secolo se ne aggiunge in realtà un altro, spesso dimenticato, che è diretto a conciliare la natura discreta dei caratteri qualitativi mendeliani con quella di quelli quantitativi studiati da Galton. Il compromesso fra discreto e continuo in questo caso tuttavia, presenta un lato innovativo in quanto mette in gioco l'ambiente come fattore capace di interagire con il fenotipo modificandolo, contrariamente a quanto ritenevano i mendeliani.

La nascente "genetica dei caratteri quantitativi", benché figlia della genetica di popolazioni neo-darwiniana afferma e dimostra che la distribuzione continua dei valori dei caratteri



quantitativi é attribuibile al fatto che questi caratteri sono determinati non da uno ma da un certo numero di geni (“sistema poligenico”) che agiscono tutti sul carattere misurato con contributi quantitativi (in più o in meno, a differenza del SI/NO di quelli qualitativi mendeliani). Inoltre, e qui sta l’innovazione, sul valore risultante l’ambiente influisce ancora in modo non prevedibile rendendo sempre più continua e di tipo gaussiano la distribuzione dei valori del carattere in esame. Ma i genetisti di caratteri quantitativi si distinguono dai popolazionisti anche per un’altra innovazione che smentisce chiaramente il concetto di indipendenza dei geni e conferma invece la legge darwiniana della variazione correlata.

Il “ritorno a Darwin” deriva in questo caso dal fatto che la genetica quantitativa era nata essenzialmente con lo scopo di applicare le conoscenze genetiche al miglioramento, per selezione, degli animali e delle piante, processo che comportava l’osservazione degli organismi interi che erano i soggetti della produzione agricola. Fu così che si notò che il miglioramento di un carattere (ad esempio la produzione di latte nei bovini) comportava automaticamente il peggioramento di altri (in questo caso quello di carne). Questo dato portò alla elaborazione di nuovi strumenti di analisi statistica che permettevano di studiare, oltre che l’incidenza del genotipo sui valori dei singoli caratteri fenotipici, anche le correlazioni ereditabili fra caratteri diversi. È interessante notare che questa impostazione, pur concettualmente diversa da quella dei genetisti di popolazioni, non portò a conflitti di sorta per uno strano processo di rimozione da parte di questi ultimi che considerarono generalmente la genetica di caratteri quantitativi come una branca di scarso interesse teorico e invece di utilità notevole sul piano applicativo. Paradossalmente, questa “scissione di pensiero” era presente anche in singole persone, tanto che alcuni neo-darwinisti che si occupavano anche di caratteri quantitativi, hanno continuato a sostenere a lungo il determinismo stocastico di mendeliana memoria e la natura indipendente e discreta dei geni. Questo, a mio parere, è un esempio paradigmatico, di come la biologia sperimentale moderna abbia un potere euristico enorme, ma anche di come talvolta non sia sufficiente da sola a stimolare il passaggio dai dati e dal loro significato immediato ai concetti, soprattutto se questi appaiono in contrasto con le idee prevalenti all’interno della comunità scientifica.

Nel caso particolare delle due branche della genetica di cui si è discusso, per queste ragioni i concetti derivanti dalle due diverse aree di studio non sono stati confrontati in modo da “falsificarli” reciprocamente in modo da ottenere una vera sintesi.

La relativa rigidità del primo neo darwinismo, che in seguito si frammenterà ulteriormente in sub-teorie, è confermata dal fatto che il cosiddetto compromesso o “sintesi” che dir si voglia, in realtà non risolveva le antinomie fra caso e necessità, continuità e comportamento discreto ma semplicemente ammetteva che ambedue i corni del dilemma e cioè casualità completa e totale determinismo fossero presenti nel processo evolutivo e lo stesso fosse vero per la antinomia fra continuità e discontinuità. In questo quadro, l’influenza non meglio specificata dell’ambiente serve quindi solo a migliorare l’interpretazione delle distribuzioni continue dei caratteri quantitativi ma i risultati statistici ottenuti non vengono collegati al concetto di interazione. Le cose cambiarono negli anni ’60 del secolo scorso quando le tecniche della biochimica permisero di ottenere dati poco compatibili con il neo – darwinismo classico. Secondo la teoria prevalente di cui R.A. Fisher continuò ad essere difensore, la selezione



naturale dovrebbe scartare continuamente gli alleli meno vantaggiosi e tenderebbe quindi a rendere ottimali e sempre più omogenee le popolazioni riducendo progressivamente la variabilità.

Ora, proprio negli anni '60 diventarono di uso corrente metodi relativamente semplici di analisi delle proteine che permettono stime precise della variabilità (il numero dei varianti di singole molecole) presente in una popolazione. I dati così ottenuti su una serie di specie animali e vegetali sorpresero la comunità scientifica di allora perché dimostrarono la presenza di una variabilità assolutamente non prevista visto il supposto potere omogeneizzante della selezione. Questo fatto determinò la formulazione di tre diverse sub teorie dell'evoluzione. Alcuni continuarono a considerare la selezione naturale come causa prevalente del cambiamento e non giunsero mai a proporre una vera spiegazione dell'apparente paradosso. Altri e in particolare la scuola giapponese iniziata da Motoo Kimura attaccarono frontalmente Darwin e il darwinismo riallacciandosi di fatto a De Vries e affidando a fenomeni puramente casuali l'evoluzione.

A questa teoria "neutralista" si oppose una serie di ricercatori fra cui, in particolare, I.M. Lerner, R. Lewontin, Th. Dobzhansky. Il primo di questi genetisti si era occupato anche dei caratteri quantitativi dei polli, mentre Dobzhansky era un genetista sperimentale che lavorava su popolazioni naturali di specie diverse di *Drosophila* (il moscerino dell'aceto, per molto tempo animale modello della Genetica). Fu però Lewontin che, mantenendosi nell'ambito del darwinismo, propose una nuova soluzione al problema che si era posto ed elaborò la cosiddetta "teoria della selezione bilanciata". Il dato da cui il ricercatore americano è partito era quello della cosiddetta "eterosi" il fenomeno per cui gli organismi sono più vigorosi se posseggono contemporaneamente due alleli diversi per un numero consistente di geni, se sono cioè, come si dice, ad "alta eterozigosi". Il "vigore ibrido" era stato in realtà scoperto diverso tempo prima nella piante da Shull e fu confermato nei polli dallo stesso Lerner. Questi, inoltre osservò che il maggior vigore derivava da una maggiore stabilità durante la vita degli individui "eterotici" dimostrando che il possesso di due "diverse strade" percorribili date dai due alleli permette di usufruire di un maggiore "potere tampone" nei confronti dei cambiamenti del contesto. Lo stesso Dobzhansky contemporaneamente osservava che in alcune specie di *Drosophila* si era addirittura fissato un raffinato sistema cromosomico che permetteva di mantenere un alto livello di eterozigosi.

Da tutto questo emergono, insieme al ritorno alla selezione darwiniana, il concetto della interazione non additiva dei geni e degli alleli e quello del vantaggio "di per sé" della variabilità genetica, esattamente il contrario di quanto sosteneva R.A. Fisher per il quale l'obiettivo dell'evoluzione era invece la totale "omozigosi" (lo stesso allele in due copie per ogni gene).

Le tre sub – teorie (neutralista, selezionista classica, della selezione bilanciata) di fatto frammentarono il neo – darwinismo in tre correnti di pensiero, delle quali le prime due probabilmente non a caso erano state iniziate da due matematici, mentre solo la terza era frutto di reale lavoro sperimentale. A queste ricerche si ricollegò un altro matematico (Sewall Wright) che lavorava in particolare in collegamento con Dobzhansky e considerato uno dei tre fondatori del neo – darwinismo insieme a J. B. S. Haldane e il già citato R. A. Fisher.

L'evoluzionismo di Wright differiva da quello di Fisher per una serie di concetti fondamentali. Il baronetto inglese infatti aveva sviluppato la sua teoria matematica partendo dal presupposto



che l'ambiente restasse costante nel tempo e che quindi l'evoluzione fosse un movimento lineare verso l'ottimizzazione dell'adattamento all'ambiente con la fissazione, come già detto prima, solo degli alleli migliori.

Per Fisher, di fatto, ad adattarsi non erano né il fenotipo né il genotipo, ma i singoli alleli dei geni i cui effetti, sommandosi, determinavano in modo univoco la fitness. S. Wright anche per il contatto stretto con gli sperimentali, ben sapeva che l'ambiente non è davvero costante e che diverse combinazioni di alleli possono raggiungere, grazie alle interazioni che creano nel genotipo, lo stesso livello di fitness, mentre un genotipo solo è diversamente adattato ai vari cambiamenti. Non c'è quindi per Wright un valore di fitness assoluto, valido dappertutto per i singoli genotipi ma ve ne sono diversi a seconda del contesto. È impossibile quindi giungere all'ottenimento sia per via naturale che con la selezione artificiale, di un genotipo ottimale con fitness altissima in tutti gli ambienti. Quest'ultimo concetto era, ed è ancora, in contrasto con la visione di molti selezionatori, nonché anche di quella parte della opinione pubblica che crede fermamente nell'eugenetica.

Si sarà notato che le teorie di cui ho parlato fino ad ora sono nate tutte nell'alveo del neo-darwinismo, ma ognuna è in qualche modo diversa dal pensiero darwiniano anche se ne accetta una parte. In tutte poi, il soggetto dell'evoluzione è essenzialmente il genotipo con la sola eccezione, almeno in parte, della posizione di Lerner e di Lewontin che non consideravano il fenotipo come la diretta "traduzione" dei geni.

Non a caso sono stati due studiosi della genetica di sviluppo degli animali che, in epoche e in modi diversi hanno cercato di dare al fenotipo e cioè agli "organismi interi", il ruolo di soggetti dell'evoluzione, rimettendo contemporaneamente in gioco il ruolo dell'ambiente non solo come filtro della selezione, ma anche come causa dei cambiamenti che si verificano nell'organismo durante il suo ciclo vitale. Il primo "eretico" fu Richard Goldschmidt, fautore, nel suo volume del 1937, di una originale ipotesi saltazionista della evoluzione, che indicava nella rottura dell'equilibrio interno fra i componenti interattivi degli organismi la causa della nascita di individui nettamente diversi dai precedenti, passibili di dare origine a una nuova specie. Secondo Goldschmidt, organismi che abbiano subito una mutazione dagli effetti devastanti, ma non letali, che egli chiamò con il nome poetico di "*hopeful monsters*" ("mostri speranzosi"), deriverebbero dal cambiamento di componenti chiave della rete genica e riporrebbero la loro "speranza" di sopravvivenza nell'adattamento del resto di questa alla mutazione iniziale. Richard Goldschmidt non ebbe vita facile in un mondo completamente dominato dal neo-darwinismo classico, sorte questa comune ad altri antesignani di una rivoluzione concettuale che diventerà matura nella Biologia soltanto nel terzo millennio. Non fu però Goldschmidt ma Conrad Hal Waddington a proporre apertamente la formulazione di un "paradigma fenotipico" contrapposto a quello basato solo sul corredo genetico dei neo-darwinisti dominanti. Per Waddington ogni organismo possiede un suo corredo di "strumenti" genetici utilizzabili ed ereditabili che però non lo determinano ma gli permettono di compiere il suo percorso vitale nell'ambito di un "paesaggio epigenetico" e cioè all'interno di un fascio molto ampio, ma non infinito, di scelte determinate dall'interazione fra l'organismo e il contesto in cui si muove la sua storia. Intanto, poco prima che Waddington elaborasse la sua nuova proposta, la nascente Biologia molecolare aveva permesso la scoperta del DNA,



genialmente prevista ancora una volta da un fisico, Erwin Schrodinger, alcuni anni prima. Nel 1953 fu anche scoperta la sua struttura molecolare allo stato cristallizzato e, coerentemente con la tendenza alla “universalizzazione” di dati ottenuti su un singolo oggetto (il DNA allo stato cristallino), fu considerata come *la struttura* del DNA in qualsiasi contesto.

L’osservazione di una delle forme possibili del DNA (non davvero la sola come vedremo in seguito) e la sua assunzione al rango di “universale” permise a uno degli scopritori (Francis Crick) di formulare quello che lui stesso chiamò un po’ seriamente, un po’ per scherzo, il “Dogma centrale della genetica molecolare”. Nell’articolo in cui si enunciava il Dogma, si faceva riferimento a quanto aveva scritto proprio Schrodinger, nel suo volume intitolato “Cos’è la vita” del 1942, in cui prevedeva l’esistenza di una macromolecola capace di trasferire la sua “informazione” alle proteine, gli strumenti della vita. Il Dogma centrale, amplia e irrigidisce questa concezione introducendo un nuovo elemento di determinismo quando afferma che quanto è “scritto” nel DNA viene fedelmente trascritto in un altro acido nucleico (RNA) e altrettanto correttamente tradotto in proteine. In queste affermazioni viene esclusa ogni influenza dell’ambiente e della storia di vita, ma si propone invece la “metafora informatica” (E. Gagliasso, 1998) e cioè di fatto la trasformazione, nell’immaginario scientifico, degli esseri viventi in computer dotati di un unico e solo programma. La reificazione dell’idea di DNA indurrà in seguito Jacques Monod a chiamare il DNA “invariante fondamentale” della vita. Questa proposta, insieme dogmatica e rivoluzionaria è stata accolta con enorme favore da un contesto sociale che vedeva (e purtroppo vede ancora) il progresso come un processo continuo verso la “macchinizzazione” del Mondo e quindi la sua ottimizzazione (le industrie infatti tendono, e loro a buona ragione, a costruire un unico modello di macchina “ottimale” e cioè vendibile in tutto il Mondo).

Può essere qui interessante notare, soprattutto da un punto di vista sociologico, che questo semplice concetto è ancora largamente prevalente nel “buon senso comune” anche nel momento in cui scrivo, nonostante che negli anni successivi al Dogma centrale ci siano state, come abbiamo visto, una serie di “eresie” e il Dogma stesso ormai sia stato smentito da una serie di dati sperimentali ottenuti in questo inizio del terzo millennio di cui parlerò dettagliatamente in seguito.

Il processo di cristallizzazione della visione ancora prevalente nasce senza dubbio dall’incontro fra le scienze della vita ed il contesto concettuale esterno, ma deriva, all’interno stesso della Scienza, dagli effetti secondari dell’impostazione riduzionista iniziale, anche se poi è stato proprio l’uso del potentissimo metodo riduzionista e delle macchine che ha permesso di ottenere risultati sperimentali rivoluzionari.

La semplificazione riduzionista basata sullo studio di sistemi diversi, tutti teoricamente universalizzabili, “smontati” nei loro componenti, ha di fatto portato alla frammentazione delle Scienze della vita che nell’Ottocento erano invece unitarie come testimonia l’opera di Darwin. Sono sorte di conseguenza una serie di discipline indipendenti ognuna delle quali mira alla conoscenza di leggi universali pur lavorando su singoli componenti o organismi diversi, a diverso livello di organizzazione e di complessità (molecole, virus, batteri, piante, animali, uomo), con metodi molto differenziati e quindi con ottiche estremamente eterogenee.

L’oggetto che si osserva è in particolare di grande importanza per l’interpretazione dei dati ottenuti e soprattutto per l’elaborazione di leggi che dovrebbero riguardare la vita nel suo



complesso. È abbastanza ovvio infatti che chi della vita osserva solo molecole ne ricava tendenzialmente una visione fortemente deterministica, anche soltanto perché ha difficoltà a cogliere le interazioni a livello superiore di organizzazione. Chi invece studia organismi complessi dall'esterno come avviene nelle Scienze naturali e chi si occupa di sistemi costituiti da aggregazioni complesse come gli ecosistemi, o la stessa Biosfera, userà inevitabilmente metodi diversi e giungerà probabilmente a una visione del mondo vivente non facilmente confrontabile con la prima. Non a caso Fisher era un matematico e dissentiva da Sewall Wright che aveva una formazione diversa ed era legato a biologi sperimentali. Waddington invece era un embriologo e un genetista che si occupava di sviluppo e non a caso ha privilegiato il fenotipo come fonte di dati e concetti. Watson e Crick lavoravano su una sola molecola, il DNA che per loro non poteva che essere il centro unico della vita, Jaques Monod aveva sempre studiato organismi relativamente semplici come i batteri quando ha sviluppato la sua visione meccanica, mentre Goldschmidt era uno studioso dello sviluppo ecc.

Questa frammentazione in diverse discipline, in ognuna delle quali si elaboravano teorie locali ritenendole universali è stata probabilmente una delle cause principali della tendenza a ragionare per antinomie rigide apparentemente non conciliabili.

Anche nel dibattito attuale di fatto si tende a contrapporre caso a necessità come è stato fatto da Jacques Monod, controllo genetico ad effetti dell'ambiente nella determinazione della storia di vita, indipendenza e additività dei componenti dei sistemi biologici a strutture a rete a interazioni non lineari, continuità a discontinuità dei processi. Contemporaneamente, chi si occupa di evoluzione, esplicitamente o implicitamente, considera a seconda della area disciplinare in cui opera, diversi livelli di organizzazione della vita come soggetti del processo di cambiamento.

Per fare qualche esempio, i neo-darwinisti classici vedono l'evoluzione come cambiamento di frequenze alleliche e considerano quindi come unità evolutiva esclusivamente i geni, gli studiosi dello sviluppo mettono in primo piano gli organismi, chi opera nell'ambito delle scienze naturali mette in primo piano il ruolo delle specie, gli ecologi studiano l'evoluzione degli ecosistemi ecc.

3. La rivoluzione del terzo millennio e la soluzione delle antinomie

Il terzo millennio si è aperto con la "lettura" del primo genoma eucariote, quello umano, condotta con l'ausilio di macchine sofisticate e potenti capaci di "leggere" la sequenza di nucleotidi di lunghe stringhe di DNA in tempi che allora venivano considerati estremamente brevi (le macchine di ora sono molto più veloci ancora).

Fino dai primi tentativi di comprendere la funzione delle diverse sequenze decifrate ci si accorse che molti concetti sulla struttura e funzione del nostro corredo genetico andavano cambiati e in particolare che il ruolo dei geni, come li avevamo considerati fino a quel punto andava ridimensionato.

Si avviò così, paradossalmente con il trionfo del metodo riduzionista, un processo che ha portato alla sconfitta delle teorie meccaniche e quindi della ideologia dallo stesso nome, e alla possibile soluzione delle antinomie di cui si è parlato, verso una nuova visione della vita.



Un processo analogo in verità era cominciato molto prima in fisica con la nascita di un'intera nuova area di ricerca, quella della fisica dei sistemi complessi, che già negli anni Ottanta del secolo scorso aveva portato a rimettere in discussione, purtroppo non da parte di molti biologi sperimentali, alcuni concetti biologici. Questa stessa discussione si è trasferita ora nella Biologia e ha permesso di affrontare con una nuova ottica il dibattito del ventesimo secolo a cominciare proprio dall'antinomia fra caso e necessità, elemento fondante del già citato libro di Monod che può essere considerato la Bibbia del pensiero biologico moderno.

Proprio i fisici, infatti, sanno bene che in natura non esistono né sistemi completamente casuali né completamente deterministici. Sono invece state sviluppate e vengono usate in tutto il mondo tecniche di modellizzazione e analisi matematica che permettono di stimare il rapporto stocasticità/vincoli e anche di indicare strade possibili per individuare la natura materiale di questi ultimi nei sistemi biologici. Lo studio di un numero molto ampio di sistemi viventi ha dimostrato che le loro strutture/funzioni e le storie di vita sono sempre intermedie fra casualità e determinismo totali.

Inoltre si è dimostrato che le funzioni matematiche che permettono di descrivere la vita e di individuare le caratteristiche dei vincoli presenti (correlazioni a corto e lungo raggio, periodicità, ecc.) sono generalmente "scale invarianti", cioè indipendenti dalla scala su cui si compie la osservazione (Marco Buiatti, 2006).

Per fare un esempio delle informazioni che si possono ottenere da analisi matematiche di questo tipo scegliamo lo studio della distribuzione di basi (le "lettere" A,T,G,C) del DNA in sistemi viventi situati a diversi livelli della scala evolutiva e nelle diverse aree funzionali dei genomi, in termini di rapporto fra determinismo e stocasticità. La scelta è abbastanza ovvia perché il DNA dei diversi organismi è la memoria storica di quanto è successo durante l'evoluzione e allo stesso tempo la base materiale di moltissimi processi biologici, per cui sono proprio i vincoli che ci possono indicare quante e quali parti dei genomi sono state conservate e quante cambiate durante l'evoluzione per giungere poi eventualmente alla caratterizzazione delle funzioni delle sequenze mantenute costanti.

Questi dati possono risultare particolarmente interessanti alla luce del fatto che solo lo 1,5% del nostro genoma è costituito da DNA che porta la informazione per proteine, mentre il restante 98,5% ha funzioni in gran parte ignote anche se si pensa che sia essenzialmente utilizzato per la regolazione dei geni secondo la loro definizione classica.

Le individuazioni di regole (non di leggi) di distribuzione dei vincoli lungo le sequenze "non geniche" ("non codificanti") e la localizzazione delle zone conservate permetterebbe quindi di aiutare a comprenderne la funzione. Ebbene, tutte le analisi condotte fino ad ora (vedi Marco Buiatti, 2006 per una sintesi, Buiatti e Buiatti, 2002, 2004, Buiatti et al. 2004) hanno dimostrato che le sequenze codificanti sono più "vincolate" di quelle dei geni classici e che in genere la distribuzione delle basi nei genomi degli eucarioti (animali e piante) è nettamente meno casuale di quella che si trova nei virus e nei batteri.

In particolare negli eucarioti sono frequenti sequenze "a bassa complessità" costituite da una o più "lettere" ripetute più volte ma ci sono anche piccole sequenze specifiche ("parole", "motivi") a monte o dentro i geni, diverse a seconda di quando durante il ciclo vitale, quanto e dove questi si devono esprimere. Ora, il DNA come ho anticipato, possiede la struttura scoperta da Watson e Crick nel 1953 solo se cristallizzato, mentre negli esseri viventi esso può



assumere anche forme diverse lungo la stringa a seconda della composizione locale in basi e del contesto fisico-chimico in cui si trova.

Questo fatto è di estrema rilevanza in particolare per la ricezione di “segnali” che provengono dall’interno e dall’esterno delle cellule e regolano il funzionamento dei geni in modo che la cellula risponda alle esigenze dell’adattamento al contesto in cui si trova.

I “segnali” che arrivano al DNA sono in realtà proteine che costituiscono l’elemento terminale di una catena facente capo ad altre molecole dello stesso tipo situate sulla membrana della cellula e in grado di recepire direttamente i segnali esterni (si chiamano infatti recettori). L’attivazione e l’intensità di espressione dei geni dipendono proprio dalla formazione di complessi fra le forme complementari delle proteine segnale e delle specifiche sequenze di DNA che si trovano a monte di essi.

Il DNA infatti, è una macromolecola del tutto inerte se non è “accesa” dai segnali ed è proprio accendendo alcuni geni e spegnendone altri, o comunque modificando la loro azione, che gli organismi possono cambiare continuamente il loro programma in risposta alle variazioni del contesto.

Il fatto stesso che le forme delle due molecole (il segnale e la sequenza di DNA con cui deve complessarsi) devono essere complementari per funzionare, costituisce un vincolo evidente alla stocasticità della distribuzione di basi. Altri vincoli, in particolare numerosi negli eucarioti, sono costituiti dalla necessità di formazione di complessi anche fra RNA (trascritto da DNA) e proteine segnale, fra DNA e le proteine strutturali che danno la forma ai cromosomi e fra RNA e DNA, tutti con funzioni di regolazione e di “scelta” su quali proteine produrre in diversi contesti, con che intensità e anche in che tessuto nel caso di organismi superiori.

Se è vero che i vincoli alla stocasticità formati durante la evoluzione derivano dalla necessità di interazione fra componenti dei sistemi viventi, è chiaro che questi non sono indipendenti l’uno dall’altro, ma il cambiamento di un partner di una interazione comporta, per il mantenimento della funzione, anche il cambiamento dell’altro o degli altri coinvolti.

Questo ragionamento è valido per il rapporto fra macromolecole ma anche nel caso di prodotti della azione delle proteine enzimatiche e in genere del metabolismo in cui praticamente ogni composto chimico è derivato da un altro e può essere trasformato in un altro ancora.

Questa è di fatto una lettura aggiornata della legge darwiniana della variazione correlata, che si applica a tutti i livelli di organizzazione, dalle molecole, alle cellule, agli organismi, alle popolazioni, agli ecosistemi, alla biosfera.

Le attività dei componenti dei sistemi viventi a qualsiasi livello si faccia riferimento, sono infatti collegate in rete e il comportamento di ogni elemento ne induce altri in componenti diversi dello stesso sistema ed ha influenza anche su i livelli gerarchici diversi in cui è inserito. Naturalmente questa è una regola generale, non una legge universale, per cui ci sono anche elementi che si comportano indipendentemente da altri, come ad esempio i geni che controllano i caratteri appositamente scelti per la loro natura discreta e la loro indipendenza da Gregorio Mendel.

Il lavoro del fondatore della Genetica non è quindi sbagliato, i caratteri da lui studiati si comportano veramente come nei suoi esperimenti, sbagliata è piuttosto l’estensione a tutti i geni in tutte le situazioni dei risultati ottenuti. In altre parole, la vita è veramente “multiversa”



nel senso che caratteristiche apparentemente contraddittorie possono coesistere anche in uno stesso sistema.

È così che convivono in ogni sistema vivente l'armonia fra i componenti dovuta ai vincoli fissatisi durante l'evoluzione e la variazione, senza la quale non vi è adattamento alle continuamente diverse condizioni ambientali e ai danni che inevitabilmente si verificano all'interno degli organismi.

Come bene diceva Darwin, infatti, la variazione è la base dell'evoluzione e dell'adattamento durante i cicli vitali. Quelli che Darwin non conosceva e non poteva conoscere erano i modi con cui si genera la variabilità e le caratteristiche di questa nei diversi gruppi di organismi. Darwin, come si è detto, lasciava aperte tutte le strade ma non poteva nemmeno prevedere che le strategie di microrganismi, animali, piante ed esseri umani fossero radicalmente diverse anche se tutti gli esseri viventi hanno sviluppato modi e strumenti adeguati per cambiare ("generatori di variabilità") e metodi raffinati per scegliere quale parte di questa variabilità utilizzare di momento in momento, di contesto in contesto.

È la scoperta, molto recente, di queste diverse strategie che impedisce la formulazione di una teoria dell'evoluzione che valga per tutti gli organismi, confermando invece la grande multiversità di questi. Sappiamo adesso ad esempio che i batteri utilizzano per adattarsi soprattutto la variabilità genetica e durante l'evoluzione si sono "forniti" di sofisticati processi che permettono di aumentarne la quantità in condizioni di stress.

Un sistema noto da questo punto di vista è quello che si basa sul gene RpOs che "percepisce" lo stress e risponde ad esso attivando "geni mutatori" che a loro volta aumentano la frequenza di mutazione in una serie di altri geni alcuni dei quali sono utilizzabili per fare fronte al pericolo.

Sia ben chiaro: la attivazione di RpOs non determina l'aumento di frequenza solo delle mutazioni utili per l'adattamento, ma solo del numero di mutazioni per generazione (la vita di un batterio dura solo poche decine di minuti) anche se le frequenze di mutazione non sono uguali per tutti i geni. Questo dato chiarisce intanto che le mutazioni non sono eventi totalmente casuali come ancora si crede e purtroppo si insegna in genere, ma smentisce allo stesso tempo l'ipotesi neo-lamarckiana della induzione diretta da parte dell'ambiente di mutazioni specifiche. I batteri, inoltre, sono in grado di scambiare porzioni consistenti di genoma non solo all'interno della stessa "specie" (le virgolette stanno a significare che il concetto stesso di specie si applica male ai batteri), ma anche fra specie relativamente lontane dal punto di vista filogenetico. Animali e piante, a differenza dei batteri, hanno cicli vitali lunghi e devono affrontare quindi molti cambiamenti del contesto, hanno genomi molto più grandi di quelli batterici, e hanno sviluppato processi che permettono di cambiare continuamente il programma durante la vita per far fronte ai cambiamenti di contesto, naturalmente nell'ambito della plasticità permessa dai loro "strumenti".

I generatori di plasticità in questo caso sono veramente molti. A livello genetico ogni genoma di eucariote contiene sequenze dette "ipervariabili" che sono strutturate in modo tale da mutare con alta frequenza. Questo è ad esempio il caso dei geni per le immunoglobuline che sono essenzialmente gli stessi di generazione in generazione ma mutano con altissima frequenza durante la maturazione delle cellule preposte alla risposta alla risposta immunitaria alle innumerevoli aggressioni che subisce l'organismo. È infatti questa enorme variabilità che ci



permette di contrastare attacchi di innumerevoli microrganismi e di reagire a sostanze anche prodotte dall'uomo che sarebbero altrimenti dannose. Il sistema come si vede non è tanto lontano da quello di RpOs ma le mutazioni si verificano in linea somatica e non investono la linea germinale.

Negli eucarioti però oltre alla possibilità di plasticità derivante dalla alta frequenza di mutazioni in particolari sequenze si sono fissati processi molto complessi che determinano in vario modo alti livelli di ambiguità da parte dei geni.

È per questo che nel nostro caso i 23000 geni presenti nel nostro genoma sono in grado di fornire l'informazione per centinaia di migliaia di proteine fra cui vengono "scelte" nei diversi contesti quelle che servono per adattarsi. La scelta, anche in questo caso viene fatta utilizzando un sistema di trasduzione di segnali simile a quello già descritto precedentemente, che si basa anche qui sulla formazione di complessi fra proteine e DNA ma anche fra proteine ed RNA. Gli RNA (acido ribonucleico) sono una classe di molecole che sta assumendo un significato sempre maggiore mano a mano che si scoprono le funzioni del DNA non codificante, una parte molto consistente del quale viene trascritto in RNA ma poi non tradotto in proteine. Appare così ancora più chiaro che in noi come nelle piante e negli altri animali, ancor più che nei batteri è del tutto falso che ogni organismo abbia un solo programma a disposizione. Si può dire anzi, che se ne avesse solo uno sarebbe morto, e morte sono infatti tutte le macchine costruite, loro sì, con un solo programma, dall'uomo.

Anche l'antinomia genotipo fenotipo quindi si risolve con il semplice concetto di interazione non additiva e si conferma che i limiti entro cui si muove ogni percorso (i vincoli) derivano dall'interazione (dal "riconoscimento") fra segnali esterni e componenti dei sistemi viventi. Ed è ancora una volta l'interazione che spiega il fatto che i cambiamenti evolutivi non hanno sempre la stessa velocità come è stato dimostrato da S.J.Gould e J.Eldredge nel senso che ci possono essere periodi di cambiamento praticamente nullo e poi improvvise accelerazioni (i cosiddetti salti).

Il chiarimento delle ragioni di questi due comportamenti apparentemente contraddittori ci viene dall'analisi delle strutture delle reti viventi, oggi oggetto di un'intera nuova disciplina, la "Biologia dei sistemi". Si sa adesso che le reti viventi hanno tutte più o meno la stessa struttura caratterizzata dalle connessioni fra i componenti dei sistemi. Queste, al solito, non sono casuali ma generalmente, come ho già accennato, la loro organizzazione non dipende dalla scala ed ha una struttura molto simile in tutti i sistemi viventi, anche a prescindere dalla scala gerarchica a cui si compie la osservazione, dalla cellula alla biosfera.

Questo avviene anche per le reti relative alle attività umane ed ai nostri rapporti sociali tanto che i primi lavori che hanno dimostrato questa regola sono stati condotti analizzando le compresenze di diversi attori in un numero elevato di film e questa ipotesi è stata poi confermata nel caso delle reti di imprese, di quelle delle organizzazioni terroristiche, del nostro cervello e persino nella struttura del world wide web che non a caso è opera umana. Si tratta praticamente in tutti questi casi, di una struttura a moduli collegati fra di loro costituiti ognuno da un componente "principale" legato a molti altri che comunicano con quelli di moduli diversi attraverso di esso. Tutta la rete è sempre dinamica e plastica ma contemporaneamente è



regolata armonicamente nel senso che tutti i singoli elementi possono cambiare ma entro limiti determinati dalla presenza degli altri co-evolutisi con loro armonicamente.

Nella dinamica del processo evolutivo si verificano continue modificazioni in diversi punti della rete, che vengono controbilanciate da altre in altri componenti mantenendo complessivamente l'equilibrio esistente. Può però accadere che vi sia un cambiamento drastico in uno o più elementi collegati con molti altri e cioè in un "nodo principale".

In questo caso l'organismo può non essere in grado di reggere il cambiamento perché questo investe tutti i nodi collegati a quello cambiato e quindi a una parte consistente della rete, o può invece diventare un "mostro speranzoso" alla Goldschmidt.

Questo sarebbe quindi assimilabile a un organismo, come si è accennato in precedenza, che ha subito una modificazione importante ma non letale e quindi riesce a riprodursi, ma ha bisogno di ristabilire una nuova armonia ed una sufficiente capacità di riparo dei danni che ciascuno di noi subisce durante la vita, di riorganizzarsi e cioè di fatto di intraprendere un nuovo percorso evolutivo. Molti dei "mostri speranzosi" non ce la fanno ma alcuni danno origine a nuove specie restando isolati dal punto di vista riproduttivo dalla precedente o comunque alterano profondamente il loro comportamento e soprattutto la loro strategia adattativa. Probabilmente un buon esempio di questo processo può essere considerata proprio l'evoluzione della nostra specie che di fatto ha inaugurato una strategia di adattamento del tutto originale e diversa da quelle usate dagli altri animali.

Questa ipotesi, che può apparire peregrina, sembra invece avvalorata dai dati più recenti sulle differenze fra noi e i primati a noi vicini (scimpanzé, bonobo, gorilla, orangutan). Se si analizzano i genomi di questi infatti, si scopre che assomigliano moltissimo al nostro (le differenze fra noi e lo scimpanzé sono dell'ordine dello 1%-3%).

Inoltre, e su questo tornerò, la nostra quantità di variabilità è molto minore della loro, nonostante che noi siamo enormemente più numerosi (oltre sei miliardi a fronte di poche migliaia dei nostri "cugini").

Recentemente si è cominciato a capire come mai nonostante le nostre grandi differenze di comportamenti e modi di vita dagli altri primati, i nostri genomi sono tanto simili. La risposta in realtà era abbastanza ovvia ed ora sembra avere trovato conferma: nella nostra evoluzione una parte molto piccola del nostro corredo genetico ha giocato un ruolo molto importante. Questa parte, non poteva essere altrimenti, ha essenzialmente a che fare con il nostro cervello come risulta dal fatto che alcuni geni che regolano questi caratteri si sono evoluti molto più rapidamente in noi che negli altri, sia per la porzione codificante che per le zone regolatrici dell'espressione. Questi geni hanno a che fare non a caso, da un lato con la percezione dei segnali e dall'altro con l'accrescimento dopo la nascita della corteccia cerebrale, essenzialmente attraverso l'aumento del numero di connessioni (sinapsi).

Mentre le altre specie hanno occupato diverse aree del globo adattandosi ai nuovi ambienti per via genetica, noi che siamo ormai da molto tempo la specie di gran lunga più "generalista" mai esistita sulla Terra, abbiamo modificato gli ambienti in cui ci siamo spostati, mantenendo praticamente inalterato il nostro patrimonio genetico originario e differenziandoci invece per culture. Tutto questo è avvenuto in un periodo di tempo molto breve che si può stimare a circa 100.000 anni a partire da un'unica, piccola, popolazione africana, la cui variabilità originaria, proprio per la sua piccolezza era piuttosto limitata. Questo comportamento è stato reso



possibile dall'enorme capacità di archiviazione ed elaborazione di informazione del nostro cervello. Questo può utilizzare ben cento miliardi di neuroni, a fronte di soli 23000 geni e fra questi si possono formare un milione di miliardi di connessioni diverse dando al sistema una plasticità veramente straordinaria.

Ancora oggi, nonostante la letale recente tendenza all'omogeneizzazione delle società attuali, conosciamo ancora quasi 7000 linguaggi diversi, indicatori dell'esistenza di almeno altrettante culture e comunità.

Si può quindi pensare, mettendo insieme questi dati, che ci sia stato un qualche cambiamento importante in alcuni geni che interessano le funzioni cerebrali su cui si sia innestato un rapidissimo progresso selettivo che ci ha permesso un "salto di qualità" nelle cosiddette "funzioni superiori" e fondamentalmente nella nostra estrema capacità di invenzione, collegamento di pensieri, comunicazione sociale, fissazione di cambiamenti e processi al nostro esterno nei contesti in cui si vive. Sono proprio le modificazioni del contesto che ci circonda (letteralmente "Umwelt" secondo la definizione di ambiente di Von Uexkull) che ci hanno permesso di vivere negli ambienti più diversi e anche più a noi ostili. A ben vedere probabilmente si può dire che la vera "esplosione" della nostra strategia vincente si sia avuta da quando gli esseri umani hanno cominciato a scolpire e dipingere.

Dipingere un mammut ad esempio significa infatti osservarlo, modificare la sua immagine nel nostro cervello e poi "estroflettere" questa immagine modificata su un oggetto esterno come una pietra o un altro supporto. Di fatto questo processo non è tanto diverso da quello che si compie quando si progetta e poi si produce qualcosa.

Anche in questo caso, prima si raccolgono le idee e si integrano nel concreto della formulazione di un progetto e poi questo progetto viene proiettato sulla materia esterna e diventa così quello che chiamiamo un prodotto. L'estensione del processo di conoscenza-sintesi di conoscenze- progettazione –attuazione del progetto all'ambiente in genere, avvenuta in particolare dopo l'invenzione della agricoltura, è alla base della nostra strategia e la ha resa vincente. In questi termini questa strategia può essere considerata tipica solo della nostra specie anche se embrioni di essa si trovano in altri animali e in particolare nei nostri cugini primati in cui alcuni hanno identificato in modo inequivocabile "culture" differenziate trasmesse di generazione in generazione attraverso le cure parentali.

Eva Jablonka, in un altro saggio di questo volume e in un libro da poco uscito per i tipi della UTET non a caso parla di "evoluzione a quattro dimensioni": quella genetica, quella epigenetica, quella comportamentale e infine quella simbolica, assegnando l'ultima essenzialmente alla nostra specie.

Ho voluto citare la nostra specie come possibile esempio riuscito di "mostro speranzoso", ma esempi di accelerazione evolutiva ce ne sono veramente molti a ben guardare, in altri animali e ancora di più nelle piante. In queste, infatti, moltissime nuove specie si sono formate semplicemente per ibridazione fra specie diverse preesistenti.

Gli ibridi di prima generazione generalmente anche nelle piante come negli animali, sono inizialmente sterili, ma alcuni di loro nel caso dei vegetali possono raddoppiare il corredo cromosomico e questo, per un meccanismo che non è possibile spiegare dettagliatamente qui, le rende fertili. Si formano così veri e propri "mostri speranzosi" in quanto, anche se fertili, gli



ibridi sono all'inizio ovviamente sbilanciati dal punto di vista metabolico, ma in seguito, se sopravvivono, riescono ad elaborare nuovi rapporti fra i corredi genetici di partenza ambedue presenti negli stessi individui raggiungendo un nuovo, positivo, equilibrio.

È anche successo nelle piante, e lo abbiamo dimostrato nel nostro laboratorio (Intrieri et al, 2001) che un batterio infettasse piante appartenenti a diverse specie del genere *Nicotiana* e vi trasferisse parte del suo corredo genetico modificando drasticamente il processo evolutivo.

Conclusioni

Come abbiamo visto, i sistemi viventi si sono enormemente diversificati durante l'evoluzione e hanno adottato strategie di adattamento molto diverse. Non può quindi ragionevolmente esistere un'unica teoria dell'evoluzione che tenga conto contemporaneamente di tutte le facce della multiversità biologica se non la si basa sull'accettazione del sincretismo reale della vita, che per restare tale ha inventato e sta continuamente inventando nuovi strumenti e nuovi processi di adattamento.

È d'altra parte comprensibile e tipicamente umano il desiderio di conoscere tutti gli oggetti sottoposti alla nostra osservazione e comprenderli in leggi "universali" che ci permettano di prevedere le dinamiche ed eventualmente modificarle a nostro favore. Si potrebbe anzi dire che questo è proprio uno degli elementi fondanti della nostra strategia di adattamento e della utopia prometeica di costruirci un mondo "ottimale" per la nostra specie, basato su un programma costruito da noi, unico e senza effetti inattesi.

Analogamente, è umano, per chi studia la natura vivente, avere fede nelle proprie osservazioni compiute su porzioni della vivente multiversità, e cercare di costruire da queste teorie universali che però necessariamente cozzeranno con quelle prodotte da altri, che lavorano su diversi sistemi viventi, a diversi livelli di organizzazione, con diverse metodiche e diverse ottiche o magari, come ha fatto ad esempio R.A. Fisher, si limitano alla modellizzazione matematica senza procedere alla "falsificazione" della teoria che ne deriva.

All'inizio di questo terzo millennio tuttavia, le conoscenze che si vanno accumulando ci dicono che, dopo un lungo periodo di frammentazione delle scienze della vita dal punto di vista disciplinare e concettuale insieme, non ha senso la nostra costruzione di una unica "Torre di Babele" teorica universale. Questo naturalmente non perché ci sia una qualche legge fuori da noi che lo impedisce e condanna il nostro peccato di presunzione, ma semplicemente e laicamente perché la nostra costruzione con frammenti di teorie non comunicanti non corrisponde alla realtà.

Bisogna quindi tornare ad accettare, insieme con Darwin, il fatto che le scienze della vita (ma la situazione in fisica non è poi tanto diversa), permettono la elaborazione di leggi locali e non, come vorremmo, di una unica, onnicomprensiva, teoria dell'evoluzione che descriva e chiarisca in modo esauriente il passato e il presente e magari sia in grado di prevedere il futuro. Fin da ora si può invece cercare di sciogliere le antinomie su cui intere generazioni di ricercatori si sono scontrati in base ai dati che ci arrivano continuamente dalla ricerca sperimentale.

Vediamo di riassumere brevemente da questo punto di vista alcune considerazioni fatte in questo breve saggio prendendo in considerazione le diverse antinomie sviluppatesi durante il dibattito del ventesimo secolo.



- Caso/necessità: Non esistono sistemi che siano completamente casuali né completamente determinati. Nei sistemi viventi è necessario un certo livello di “disordine” (il “disordine benevolo”, Buiatti, 2004) fondamentale per affrontare, cambiando, le modificazioni e i danni indotti dal contesto esterno ed interno e quindi sono fondamentali generatori di variabilità che però sono diversi a seconda dei gruppi di organismi.
- Indipendenza/interazione: Anche se i singoli componenti di un sistema si possono comportare come indipendenti, come nel caso dei geni mendeliani, è tuttavia necessaria la “comunicazione” fra componenti che serve alla “scelta” della quota parte della variabilità potenziale da utilizzare nei diversi contesti. Da questo deriva la presenza di vincoli alla stocasticità che derivano proprio dalle interazioni fra componenti a tutti i livelli, da quello molecolare a quello cellulare, agli organismi, le specie, le popolazioni, gli ecosistemi, la biosfera.
- Discreto/continuo: Senza dubbio moltissimi processi sono descrivibili con funzioni continue ma ci sono anche molte situazioni in cui si ha discontinuità e inoltre elementi discreti, come chiarito dalla genetica dei caratteri quantitativi possono dare origine a comportamenti continui se le interazioni sono quantitative oltre che qualitative. Per quanto riguarda l’evoluzione ci sono sia periodi di relativa stasi che di forte e veloce cambiamento che sono simili a quelli individuati come “salti” perché si compiono in tempi molto ristretti sulla scala temporale evolutiva.
- Genotipo/fenotipo: Non è vero che il fenotipo è totalmente determinato dalla semplice trascrizione e traduzione della informazione contenuta nel DNA. Non è d’altra parte nemmeno vero che il fenotipo sia determinato del tutto dall’ambiente. Nella realtà dei fatti ci sono diversi livelli di incidenza dei contesti (non pare giusto parlare di ambiente in senso lato) sul rapporto fra genotipo e ambiente nella continua interazione che determina il fenotipo, a seconda del gruppo di organismi che si osserva. Si può dire molto sinteticamente che nei batteri il genotipo prevale mentre negli eucarioti è l’evoluzione epigenetica e quindi il fenotipo insieme al genotipo a essere fondamentale e in fine nel caso dell’uomo è la evoluzione culturale la più importante mentre il genotipo si sta modificando meno che in altri organismi pur mantenendo la sua ovvia importanza.
- Quale la unità dell’evoluzione? Gene, individuo, specie, ecosistema?
In realtà è la intera biosfera che si evolve continuamente e recentemente lo studio dei livelli gerarchici di organizzazione della vita superiori a quello di specie ha assunto rilevanza maggiore di prima. Sono rilevanti, a questo proposito in particolare, ad esempio le proposte innovative di Eldredge con la sua interpretazione “geologica” delle grandi estinzioni ed espansioni e d’altra parte il lavoro degli studiosi del lato ecologico della evoluzione. La contesa quindi, che in questo caso non era fondata su di una precisa antinomia ma su una serie di diverse proposte perde molto del suo valore e si va anche in questo caso verso un benvenuto sincretismo dei concetti e un collegamento organico dei dati sperimentali acquisiti da studi compiuti a diversi livelli di organizzazione.

Marcello Buiatti



Bibliografia essenziale

1. Buiatti M., (2000), *Lo stato vivente della materia. Le frontiere della nuova biologia*, Utet, Torino.
2. Buiatti M., (2004), *Il benevolo disordine della vita. La diversità dei viventi tra scienza e società*, Utet, Torino.
3. Buiatti M., (2007), *La biodiversità*, Il Mulino, Bologna.
4. Cini M. (1997), *Il Paradiso perduto*, Feltrinelli, Milano.
5. Crick F. (1958), *Central Dogma of Molecular Biology*, «Nature», 227, pp.561-563.
6. Gagliasso E., (2001) *Verso un'epistemologia del mondo vivente*, Guerini, Milano.
7. Goldschmidt R. B., (1938), *Physiological Genetics*, Mc-Graw-Hill, New York.
8. Jablonka E., Lamb M. J., (2007), *L'evoluzione in quattro dimensioni. Variazione genetica, epigenetica, comportamentale e simbolica nella storia della vita*, Utet, Torino.
9. Mayr E., (1990), *Storia del pensiero biologico. Diversità, evoluzione, eredità*. Bollati Boringhieri, Torino.
10. Schrödinger E., (1978), *Che cosa è la vita? Scienza e umanesimo*, Sansoni, Firenze.
11. Waddington C. H., (1979) *Evoluzione di un evolucionista*, Armando, Roma.
12. Wright S., (1997), *Evolution and the Genetics of Populations*, vol. 3, *Experimental results and Evolutionary Deductions*, The University of Chicago Press, Chicago.
13. Vries H. de, (1903), *Die Mutations Theorie*, Von Veit, Lipsia.

