

GIORGIO TINTINO

Evoluzionismo: un'introduzione

1. Dal paradigma trasformatore a Darwin

Nel parlare di evoluzione, la primissima questione teorica da chiarire è inerente alla differenza, spesso ignorata ma esistente e, soprattutto, pertinente, tra *teoria dell'evoluzione* ed *evoluzione*. Non va dimenticato, infatti, che *l'evoluzione è un dato di fatto*: è indubbio, cioè, che gli esseri viventi si siano «*in qualche modo*» evoluti da forme primitive e semplici all'attuale complessità che caratterizza la varietà delle specie naturali. Quello che la teoria dell'evoluzione cerca di comprendere, invece, è proprio l'«*in qualche modo*», cioè le modalità con cui il fenomeno dell'evoluzione si sia effettivamente svolto. Grazie agli studi sui fossili, alle tracce nei depositi sedimentari, alla universalità del codice genetico presente in tutti gli esseri viventi, abbiamo una buona base per ritenere che la vita sia emersa da forme molto semplici per poi determinarsi nell'attuale biodiversità della Terra. Dunque, l'analisi evoluzionistica inaugurata da Darwin appare come un modello coerente, attraverso il quale la ricerca scientifica può tentare la descrizione dell'emersione e dello sviluppo biotico.

Possiamo fare un rapidissimo resoconto del cammino della vita sulla Terra e vedere come già a partire da 3.5 miliardi di anni fa fossero comparsi batteri, alghe, e altri esseri unicellulari senza nucleo. All'incirca 2 miliardi di anni fa, nascono i primi «eucarioti», cioè le prime cellule viventi dotate di un nucleo che racchiude materiale genetico. La nascita di queste prime cellule, molto probabilmente, ha un'origine *simbiotica*: alcuni elementi proto-cellulari si sono uniti e hanno creato un insieme stabile che ha permesso una riproduzione e una sopravvivenza più funzionale. Tuttavia, bisognerà attendere un altro miliardo di anni per assistere alla comparsa dei primi organismi pluricellulari, cioè almeno fino a circa 570 milioni di anni fa, quando, nel *Cambriano*, si assiste ad un'esplosione di forme e di strutture viventi che determinò una moltitudine di variabilità in cui erano già presenti tutti i *piani corporei animali fondamentali* e forse anche alcuni altri poi estinti. Dopo questa fase, nota appunto come «*esplosione del Cambriano*», inizia – circa 443 milioni di anni fa – la «colonizzazione» della terra ferma da parte delle prime proto-piante e, successivamente, anche ad opera dei primi vertebrati. Dopo una mastodontica estinzione di massa avvenuta nell'epoca *Permiana*, si assiste ad una rinnovata esplosione di vita che dà origine al dominio dei dinosauri. Dopo la loro scomparsa 65 milioni di anni fa, il posto dei dinosauri viene occupato dai mammiferi e, nel *Pliocene*, all'incirca 6 o 7 milioni di anni fa, si separano scimpanzé ed Ominidi. Con l'arrivo delle glaciazioni (2 milioni di anni fa) inizia anche la storia del genere *Homo* che

comprende, per quanto ne sappiamo oggi, più di dieci specie certificate, tre delle quali (*Homo sapiens*, Neanderthal, e *Homo floresiensis*) sono ancora presenti sulla Terra 30 mila anni fa. *Homo sapiens* colonizza tutte le terre emerse, porta all'estinzione una percentuale altissima di mammiferi di grossa taglia nelle Americhe e in Australia, e 12mila anni fa resta l'unico rappresentante del genere *Homo*. 10 mila anni fa si chiude l'ultima fase glaciale e con l'invenzione dell'agricoltura e il boom demografico umano inizia un processo di modificazione e di sottomissione degli habitat senza precedenti.

Questo brevissimo resoconto della storia della vita sulla Terra, però, non deve indurci a pensare che l'evoluzione sia un meccanismo trionfale e granitico poiché, in realtà, è stato un percorso di circostanze e contingenze fortunate che, forse, non potremo mai comprendere del tutto. Nonostante questo, però, riteniamo che la teoria di Darwin sia stata un enorme balzo in avanti nella comprensione del meccanismo evolutivo, tanto che con Darwin inizia proprio la biologia “moderna”. Possiamo provare a chiederci, allora, di fronte a questa velata contraddizione, per quale motivo il libro fondamentale di Darwin, *L'origine della specie*, segni una vera e propria “rivoluzione” rispetto alla speculazione teorica precedente. Il motivo essenziale è che con Darwin nasce un nuovo *paradigma* nello studio della vita, cioè un nuovo modo di comprendere lo sviluppo degli esseri viventi nella sua complessità. Viene, così, superato il paradigma biologico che rintracciava nella lenta *trasformazione* degli individui l'effettivo meccanismo di evoluzione: secondo questa posizione, infatti, gli organismi venivano direttamente plasmati e trasformati dalle contingenze ambientali e questa trasformazione veniva ereditata dalla generazione successiva, cosicché la vita era un lungo cammino di adeguazione tra ambiente ed animale, tra esterno ed interno degli organismi. Tale logica evolutiva viene chiamata *logica trasformativa* e, in breve, può essere riassunta nel meccanismo secondo cui «un insieme di oggetti si evolve perché ogni singolo elemento dell'insieme va soggetto a una trasformazione analoga»¹. Come noto, il più rappresentativo sostenitore di questa posizione fu *Lamarck*, secondo il quale, *sono i bisogni a trasformare la specie*: se l'ambiente pone una particolare condizione di sopravvivenza agli esseri viventi, questi ultimi si trasformeranno di conseguenza per resistere alla pressione dell'esterno. Le caratteristiche così trasformate verranno ereditate dalla discendenza cosicché la specie, nel suo complesso, subisce un generale processo di evoluzione.

La teoria sostenuta da Lamarck contiene due caratteristiche fondamentali che saranno poi negate da Darwin. La prima è *la possibilità di una causalità diretta ed orientata tra l'interno e l'esterno degli organismi*. Gli organismi, infatti, non vengono direttamente plasmati dalle richieste

¹ Lewontin R. C. (trad. it. Sampaolo M.), *Il sogno del genoma umano e altre illusioni della scienza*, Laterza, Roma-Bari 2002, p. 44.

dell'ambiente: la variazione ambientale non provoca, in risposta, una diretta ed adeguata mutazione dell'organismo. Questo perché *l'esterno non modifica direttamente l'interno*. Nelle parole di S. J. Gould: «se, per esempio, si verifica un abbassamento della temperatura per cui sarebbe necessario un infoltimento della pelliccia, non si verifica alcun aumento delle mutazioni genetiche che favoriscono un tale infoltimento»².

Prendiamo per un attimo il celebre esempio della giraffa. Secondo Lamarck, la giraffa ha ottenuto il suo lungo collo perché gli individui avevano bisogno – per motivi ambientali – di mangiare le foglie più alte degli alberi. Tale bisogno, di conseguenza, ha spinto gli organismi ad allungarsi sempre di più fino a raggiungere l'attuale conformazione. Ma un meccanismo di questo genere può essere sostenuto solo se si pone *l'ereditarietà dei caratteri acquisiti*, cioè il fatto che una caratteristica acquisita dall'organismo nel corso della propria vita si trasmetta poi alla generazione successiva. In realtà, i particolari aspetti morfofunzionali dell'organismo - in questo caso un collo più lungo – acquisiti dall'organismo nel corso della sua esistenza non vengono ereditati dalla prole poiché, come abbiamo già detto, *l'esterno non modifica direttamente l'interno*. I figli dei culturisti non hanno figli necessariamente muscolosi, così come chi perde un braccio non avrà figli a cui mancherà l'arto perso dal padre!

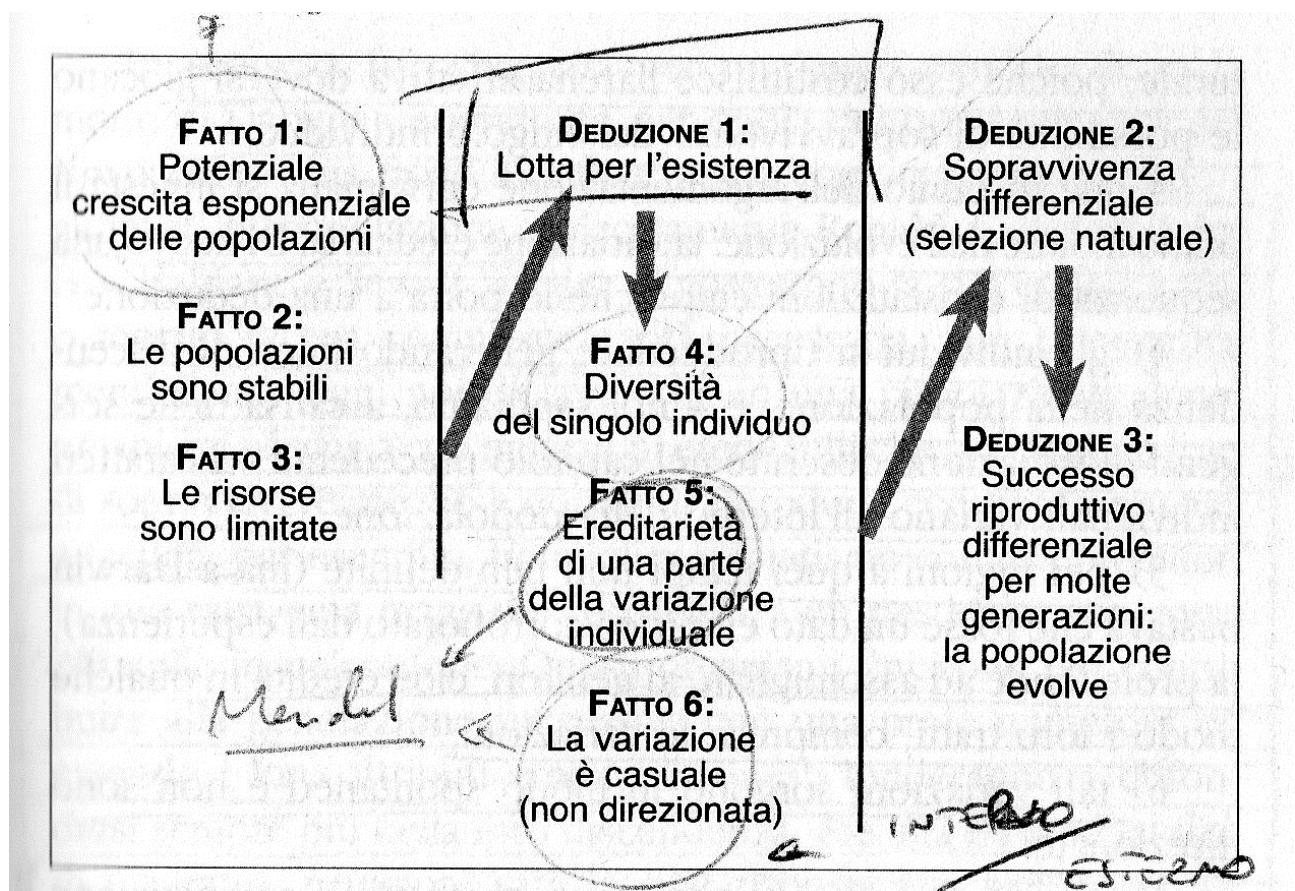
Questa piccola e banale osservazione ci permette di comprendere meglio il senso della separazione che interessa interno ed esterno degli organismi: *la variabilità degli organismi non dipende direttamente dalla variabilità dell'ambiente, poiché le cause della variazione dell'interno sono indipendenti dalle variazioni dell'esterno*. Questo è il secondo assunto scaturito dalla critica di Darwin al paradigma trasformazionale.

Ma, se non è l'esterno a modificare il cammino della vita e a determinare la nascita delle specie, cos'è che determina tale diversità e quali sono gli effettivi meccanismi in cui si dispiega il cammino dell'attuale biodiversità? Se non è l'ambiente a plasmare direttamente l'organismo, com'è possibile lo stupefacente adattamento degli organismi ai propri dintorni naturali? Questi due interrogativi rappresentano, in sostanza, la *magna questio* della teoria evolutiva ed è su di essi che si è impegnata la ricerca biologica a partire dalla rivoluzione concettuale di Darwin. Prima di affrontarli, però, dobbiamo analizzare la teoria darwiniana.

² Gould S. J. (trad. it. S. Cabib), *Il pollice del panda. Riflessioni sulla storia naturale*, Il Saggiatore, Milano 2009, p. 72.

2. La teoria della selezione naturale: la sopravvivenza del più adatto mediante la discendenza con modificazioni

La teoria inaugurata da Darwin introduce il *paradigma mutazionale*, determinando il superamento di quello trasformazionale, mediante il concetto di *selezione naturale*. Infatti, come vedremo in questo paragrafo, *la specie non si evolve perché tutti i singoli individui vanno incontro ad un'identica trasformazione, bensì perché alcuni di essi – i più adatti alle circostanze esterne – riescono a vivere così a lungo da riprodursi, trasmettendo i propri caratteri “vantaggiosi” alla prole*. Ma quale è il cammino della argomentazione darwiniana? Possiamo comprenderlo meglio alla luce dello schema offertoci da T. Pievani.



Darwin, infatti, aveva notato che (1) le popolazioni possono crescere potenzialmente all'infinito data l'enorme possibilità riproduttiva che ogni individuo può esprimere nel corso della propria vita. Nella realtà dei fatti, però, (2) le popolazioni sono "stabili" e non crescono esponenzialmente con il passare del tempo: la prole, in media, si limita a due figli per ogni individuo di sesso femminile. Darwin derivò questi dati dalla lettura del *Saggio sui principi della popolazione* di Malthus, nel quale si faceva notare la "sfasatura" tra ambiente e popolazioni: mentre le popolazioni possono crescere secondo una progressione geometrica, le risorse effettive dell'ambiente crescono a ritmo

aritmetico limitando, di necessità, il numero di esseri viventi. Ciò doveva far concludere, secondo Darwin, che (3) *l'ambiente limita l'espansione fisiologica delle popolazioni*, equilibrando di conseguenza i tassi di natalità e di mortalità. Da questi preliminari fatti, il naturalista britannico deduceva, quindi, che la scarsità di risorse e l'eccesso di fecondità innescano una *lotta per la sopravvivenza*, in cui gli individui e le specie entrano in competizione per accaparrarsi le risorse, sopravvivere e generare nuova prole.

Darwin, inoltre, osservò (4) come gli individui siano connotati da piccole differenze, cioè da una variabilità che può fare la differenza tra la vita e la morte dell'organismo. Aveva notato, inoltre, come la prole tenda sempre ad assomigliare a propri genitori, ereditandone in qualche modo le variazioni vantaggiose (5). Darwin aveva capito, d'altra parte, che la variazione non dipende direttamente dall'esterno, ma che è, invece, *casuale* (6). Ciò significa che in un contesto di competizione ecologica i portatori di una variazione vantaggiosa potranno vivere abbastanza a lungo da raggiungere l'età riproduttiva e lasciare discendenti. L'ambiente, di conseguenza, seleziona (elimina) gli individui meno adatti alle sfide ambientali, *lasciando in vita gli organismi che si trovano meglio adattati alle condizioni esterne*. Se, poi, le mutazioni vantaggiose hanno la possibilità di essere ereditate dalla generazione successiva, (7) esse tenderanno a diffondersi nella popolazione di generazione in generazione, dando vita ad una *discendenza con modificazioni*.

Alla luce di ciò che sappiamo oggi, però, dovremo ricordare che le mutazioni non sono risposte dell'organismo all'ambiente poiché emergono in maniera del tutto casuale: una mutazione

«è provocata da cause che non sono finalizzate agli effetti che essa può avere di fatto sull'individuo che la possiede. La mutazione, cioè, si realizza in maniera casuale rispetto ai suoi effetti. L'insieme degli individui si evolve per un processo di selezione in cui alcuni tipi mutanti resistono e si riproducono, mentre altri scompaiono. L'evoluzione mutazionale si compie con il cambiamento della frequenza dei diversi mutanti, anziché per un fascio di trasformazioni evolutive condivise da ciascun individuo»³.

Alcuni organismi si trovano a possedere, in maniera del tutto casuale, determinate caratteristiche che possono offrire loro alcuni vantaggi evolutivi; va da sé che l'individuo più adatto vedrà aumentata la propria *fitness* – l'abilità, in generale, di riprodursi mediante determinate strategie di sopravvivenza – mentre gli individui meno adatti, non potendo lasciare eredi che tramandino i loro caratteri, andranno via via scomparendo. Con il passare del tempo gli organismi mutati finiranno per caratterizzare l'intera specie divenendo, così, la base per le successive mutazioni. La specie, dunque, non si è evoluta perché ogni organismo è stato trasformato dalla pressione ambientale, bensì grazie alla selezione naturale. Va da sé che questo meccanismo non vale solamente per gli

³ Lewontin R. C. (trad. it. Sampaolo M.), *Il sogno del genoma umano e altre illusioni della scienza*, Laterza, Roma-Bari 2002, pp. 44-45.

individui, ma anche per le specie: se, infatti, diverse specie competono per una stessa *nicchia evolutiva* – cioè la porzione di ambiente che è rilevante per l'attività vitale di un organismo – sarà la specie meglio adattata a proliferare e a fornire la base per la nascita di altre specie. Ogni specie, dunque, deve “confrontarsi” con l'ambiente attraverso la variabilità che già possiede: una trasformazione ambientale repentina, come la caduta di asteroidi, non stimola la specie a variare per resistere al cambiamento, ma la specie deve già trovarsi in possesso di una mutazione adatta per resistere a quello sconvolgimento, pena l'estinzione.

Questa breve ricognizione nelle tesi di Darwin deve farci riflettere su due punti essenziali della sua teoria che saranno oggetto esplicito di ricerca nel secolo e mezzo che ci separa da *L'origine della specie*. Il primo, come possiamo intuire, riguarda la comprensione dei meccanismi attraverso i quali gli organismi acquistano le proprie mutazioni e le tramandano. Se, infatti, non è l'ambiente a “suggerire” all'organismo in quale direzione mutare, si deve comprendere quale sia la fonte delle mutazioni che assicura una variabilità continua alle specie viventi. Il secondo punto riguarda, invece, l'approfondimento dei meccanismi del processo adattivo della specie nei confronti dell'ambiente e le possibilità di emersione di specie del tutto inedite.

3. Variazione: mutazione e ricombinazione.

Il problema di quale sia l'effettiva fonte della mutazione non è affatto un problema secondario nella teoria darwiniana, tanto che, per la sua evidenza, l'autore de *L'origine della specie* pensò addirittura di reintrodurre il meccanismo dell'*ereditarietà dei caratteri acquisiti* nella stesura delle ultime versioni dell'opera. Se, infatti, non è l'ambiente a produrre le variazioni degli individui, rimane da capire dove tali mutazioni si originino. Grazie alla scoperta del DNA da parte di Watson e Crick, nel 1953, possiamo ora comprendere meglio gli intimi meccanismi molecolari che regolano la formazione dell'individuo, la variabilità che esibisce nel corso della sua esistenza e la possibilità di trasmettere tale variabilità alla generazione successiva.

Prima di tutto, dobbiamo dire che ogni cellula, ogni organismo, ogni specie è caratterizzata dalle proprie proteine: esse sono i mattoni del nostro corpo ed in ogni organismo vi sono proteine specifiche, che sono diverse da specie a specie, da individuo a individuo. Il **DNA**, contenuto nel nucleo delle cellule in una struttura a doppia elica, presiede proprio alla sintesi delle proteine: il DNA è, di conseguenza, il depositario dell'informazione genetica, cioè delle informazioni che il sistema ontogenetico (dove per *ontogenesi* si intende tutto il processo di sviluppo dell'organismo, dall'embrione fino alla morte) dell'individuo utilizza per lo sviluppo di quell'essere vivente.

Come funziona, concretamente, la sintesi delle proteine? Affinché l'informazione genetica possa essere utilizzata, abbiamo bisogno di una molecola-intermediario mediante la quale l'informazione, presente nel DNA e confinata nel nucleo della cellula, venga utilizzata per la costruzione di proteine: questa molecola è l'**RNA**. Il processo di sintesi delle proteine inizia con l'apertura della doppia elica del DNA; a mano a mano che la doppia catena del DNA si apre, le basi di uno dei filamenti agiscono come uno stampo per la sintesi della molecola di RNA. La molecola del RNA è, dunque, costituita da una sequenza complementare alla sequenza esistente sulla molecola di DNA che ha funzionato da stampo. La sequenza di DNA che viene copiata è il **gene**: il gene è, perciò, l'unità d'informazione minima depositata all'interno del DNA degli esseri viventi. Successivamente, la molecola dell'RNA formatasi sullo stampo del DNA, terminata la *trascrizione*, si stacca dal filamento del DNA - che riassume la forma di doppia elica -, esce dal nucleo e raggiunge i ribosomi, dove l'RNA fa a sua volta da stampo per la sintesi della proteina.

Il DNA è un vero e proprio codice formato da una sequenza di quattro nucleotidi: guanina, adenina, citosina e timina (quest'ultima nell'RNA viene sostituita dall'uracile). La combinazione in sequenza di tre nucleotidi (*tripletta* o *codone*) è un codice che indica quale aminoacido, tra quelli che la costituiscono, deve essere inserito nella proteina. All'inizio della sintesi proteica i ribosomi si legano al codone di avvio (*start*) dell'RNA, che indica il punto in cui l'RNA comincia a codificare la proteina. Ogni tripletta viene poi *tradotta* nell'amminoacido corrispondente il quale, a sua volta, andrà a costituire la struttura della proteina. Questo processo continua finché il ribosoma non incontra uno dei tre possibili codoni di arresto (*stop*), dove avviene il termine (cfr. *Appunti*, p. 2).

Si dice *mutazione* un errore qualsiasi di replicazione che alteri la sequenza del DNA sia nel momento della *trascrizione* del gene sia in quello della *traduzione* della proteina. Gli errori di copiatura sono abbastanza frequenti, ma la cellula riesce in molti modi ad ammortizzarli. Gli amminoacidi che compongono le proteine, infatti, sono solo 20, mentre le possibili triplette sono 64. Ciò significa che più di una tripletta codifica lo stesso amminoacido ed un errore nella sua trascrizione potrebbe comunque continuare a segnalare l'amminoacido giusto. Inoltre, se la mutazione interessa soltanto il terzo nucleotide della tripletta, l'amminoacido codificato, di norma, sarà quello giusto. In più, esistono dei particolari enzimi – chiamati *correttori di bozze* – che riparano costantemente il DNA e che cercano di arginare quanto più possibile le mutazioni casuali. Non tutti gli amminoacidi della proteina svolgono un ruolo sostanziale nella definizione delle sue funzioni: molti hanno una semplice funzione strutturale cosicché, anche se saranno differenti, la proteina continuerà comunque a svolgere egregiamente il suo lavoro. Infine, anche la maggior parte del materiale genetico presente nei cromosomi ha funzione strutturale, per cui un sua alterazione non risulterà pericolosa.

Da questi elementi, possiamo desumere due indicazioni molto importanti: la prima è che la possibilità che una mutazione si presenti effettivamente non è poi così alta; la seconda è che la mutazione è quasi sempre un meccanismo che mette a repentaglio l'attività della cellula alterando irrimediabilmente le funzionalità della proteina prodotta⁴. La probabilità che appaia una mutazione funzionale vantaggiosa è, di conseguenza, molto bassa: la possibilità che un gene continui non solo a funzionare (producendo la giusta proteina) ma, addirittura, a funzionare meglio dopo una pesante modificazione è remota⁵. Per questo le mutazioni casuali che avvengono sono il più delle volte *neutre e quasi invisibili*: così, pur essendo costruita in modo diverso, la proteina prodotta continuerà a funzionare e l'organismo, di conseguenza, manterrà inalterata le sue funzionalità. Eppure sono proprio queste differenze “silenziose” a costituire buona parte della variabilità di specie. Infatti, se le mutazioni non riguardano le cellule somatiche (cioè le cellule che costituiscono concretamente il nostro corpo), ma le cellule sessuali (cioè i *gameti* che daranno origine all'individuo futuro), la mutazione diventa ereditabile e si trasmette alla discendenza.

Tutto il codice genetico dell'organismo – definito *genotipo* – è organizzato in strutture a X denominate *cromosomi* il cui numero varia di specie in specie pur rimanendo costante all'interno di ciascuna: nell'essere umano, per esempio, ci sono 23 coppie di cromosomi. Perché 23 coppie? Perché ogni individuo ha un set completo di cromosomi che viene ereditato e dal genitore di sesso maschile e dal genitore di sesso femminile. L'individuo, quindi, avrà un corredo complessivo di 46 cromosomi, metà ottenuti dal padre e metà dalla madre. Quando questo individuo dovrà riprodursi, da ogni cellula di 46 cromosomi si otterranno 4 gameti contenenti ciascuno 23 cromosomi, secondo un particolare processo di divisione, tipico delle cellule sessuali e denominato *meiosi*. Questo processo è “particolare” perché le cellule “figlie” non sono identiche a quelle di partenza, ma si ricombinano in vario modo: i 23 cromosomi che confluiscono effettivamente all'interno dei gameti sono presi casualmente dalle coppie che sono disponibili nell'individuo. Ciò significa che nella *meiosi*, cioè la divisione cellulare che dà origine alle cellule sessuali, si attua il processo di *ricombinazione genetica*, ovvero lo scambio di materiale ereditario fra le coppie di cromosomi possedute. Dunque, con 23 coppie di cromosomi, il numero di possibilità è 2^{23} ossia 8,388,608 combinazioni diverse. Oltre alla diversa distribuzione dei cromosomi all'interno della cellula sessuale, nella divisione di ogni stesso *cromosoma omologo* si attua un particolarissimo

⁴ Per esempio, nelle prime fasi della crescita di un organismo, esiste una classe particolare di geni – definiti *homeobox* – che ha l'obiettivo di organizzarne la macrostruttura, come la posizione delle gambe, delle braccia e della testa o la divisione in destra e sinistra dell'organismo. Una mutazione di queste strutture comporta quasi sempre il blocco dello sviluppo dell'organismo e la sua morte.

⁵ Dobbiamo ricordare anche che non esiste una diretta corrispondenza tra gene e carattere: l'espressione di un carattere è l'effetto di numerosi geni così come un gene può essere implicato nell'espressione di caratteristiche molto differenti. Tutte le mutazioni genetiche, insomma, devono fare i conti con una miriade di relazioni che non fanno altro che dimostrare come esse debbano essere molto piccole ed invisibili.

meccanismo di scambio – definito *crossing over*, anch'esso casuale - per cui il materiale genetico viene mescolato tra il cromosoma materno ed il cromosoma paterno. La variabilità offerta da questo meccanismo è, dunque, altissima.

Immaginiamo che il nostro corpo sia il prodotto di una libreria, in cui ogni scaffale è un cromosoma ed ogni libro è un gene, cioè una caratteristica specifica del nostro corpo (l'emoglobina, il colore dei capelli o le dimensioni della nostra mano). A partire dal nostro *genotipo* – cioè dalle due librerie che abbiamo ricevuto in eredità dai nostri genitori – si può formare una particolare espressione dell'organismo – definita *fenotipo* - a seconda di quale libro venga effettivamente usato per costruire l'organismo.

Cosa determina la scelta di un libro su una libreria piuttosto che nell'altra? Tale problema fu risolto da G. Mendel, il quale attraverso esperimenti con piante di pisello, elaborò le famose *leggi dell'ereditarietà*, cioè i meccanismi attraverso i quali viene regolata l'espressione fenotipica di un determinato genotipo. Egli aveva scoperto che la scelta dell'*allele* di un gene – cioè le varianti di una determinata caratteristica - non era casuale: determinate caratteristiche tendevano a riproporsi con più facilità, mentre altre erano più rare. Se in una libreria dell'organismo il colore del pisello era segnato come verde, a prescindere da quello contenuto nell'altra, il colore del pisello sarebbe stato sempre verde. Il colore verde del pisello, dunque, venne definito *dominante*, poiché comportava sempre che nel fenotipo comparisse il colore verde. Il colore giallo del pisello, invece, venne definito *recessivo*, perché per esprimersi aveva bisogno che entrambi i libri in cui era contenuta l'informazione sul colore del pisello contenessero l'indicazione giallo. Questa prima legge viene comunemente definita *Legge della dominanza*⁶.

Inoltre, se all'interno di un genotipo abbiamo un *allele* che indica Verde (che indichiamo con la lettera V) e l'altro che indica giallo (g), il fenotipo corrispondente sarà, ovviamente, verde. Ma la caratteristica “giallo” *rimane* nel corredo genetico dell'individuo – cioè, rimane *segregato* - ed ha il 50% di possibilità di essere trasmessa alla generazione successiva. Se questo individuo si accoppia con un altro di colore Verde ma con l'allele giallo segregato anche nel suo fenotipo, si avrà il 25% di possibilità che il figlio sia di colore giallo. E' questa una circostanza che possiamo notare quando genitori con occhi scuri hanno un figlio con occhi chiari: i genitori, infatti, avevano segregato nel loro corredo genetico il colore chiaro degli occhi dei loro nonni (che, di norma, è recessivo come il giallo del pisello) ma che non veniva espresso, perché nell'altro allele era presente il colore scuro (che, di norma, è dominante come il verde del pisello). Ricapitolando, se si uniscono due genotipi Vg, le coppie possibili sono: VV, Vg, gV e gg. Il colore giallo rimane segregato e, pur non

⁶ Esistono, comunque sia, anche caratteristiche che non sono determinate da un meccanismo così netto e il cui *fenotipo* è una gradazione intermedia tra i due alleli del genotipo.

manifestandosi spesso, esso è presente nella specie e ne aumenta la variabilità. Questa seconda legge viene definita *Legge della segregazione*.

L'ultima legge dell'ereditarietà, infine, ci dice che le varie caratteristiche dell'individuo, localizzate in parti differenti dei cromosomi, si mescolano in modo casuale senza essere influenzate l'una dalle altre. Si tratta della legge definita *Legge di indipendenza dei caratteri*.

Che cosa devono suggerirci queste leggi dell'ereditarietà e il meccanismo della mutazione all'interno dello studio dell'evoluzione? Esse ci mostrano l'elevata capacità di variazione di cui ogni specie può farsi carico, una variazione tutto sommato invisibile, ma sempre presente. Quando si presenta una mutazione, (che, di norma, è sempre recessiva) essa non inficia direttamente l'organismo futuro perché abbiamo sempre un'altra copia funzionante del gene contenuto nell'altra "libreria". La mutazione, però, rimane "a disposizione", cioè segregata all'interno del nostro codice genetico, offrendo una variabilità che potrà tornare utile se le condizioni ambientali dell'esterno dovessero mutare. E' bene ricordare che, però, ogni specie deve accontentarsi della variabilità che già possiede, perché la mutazione non avviene in risposta ad un mutamento ambientale. Per esempio, se la temperatura dell'esterno aumenta in modo considerevole e la popolazione già contiene una mutazione che codifica una folta pelliccia, gli individui portatori di questa mutazione vedranno aumentata la propria *fitness* rispetto agli individui che ne sono sprovvisti. Questi ultimi, di conseguenza, probabilmente moriranno senza lasciare eredi, mentre gli individui con una pelliccia folta aumenteranno di numero, fino a caratterizzare la totalità della specie.

Questo meccanismo ci fa comprendere meglio, inoltre, il ruolo fondamentale delle mutazioni neutrali: solo al variare dell'ambiente, infatti, esse potranno risultare decisive per la sopravvivenza. In condizioni ambientali temperate, avere poca pelliccia o molta pelliccia, in fin dei conti, non è così decisivo; ma se la temperatura si abbassa bruscamente, come nel caso delle glaciazioni, possedere una mutazione che aumenti la pelliccia farà molta differenza. La selezione naturale eliminerà, allora, gli individui meno adatti alle nuove condizioni ambientali, agevolando invece la proliferazione degli individui "mutati".

4. Exaptation, adattamento e speciazione

La sopravvivenza di una specie, dunque, è strettamente legata alla sua variabilità la quale le permette di adattarsi adeguatamente all'ambiente circostante. Possiamo ora chiederci se l'organismo riesca ad adattarsi all'ambiente esclusivamente attraverso specifiche mutazioni e se ogni adattamento esibito dall'organismo sia stato necessariamente oggetto di una specifica selezione.

Grazie alla ricerca biologica degli ultimi 40 anni, e specialmente con le tesi di S. J. Gould, sappiamo che, in realtà, l'organismo non si guadagna la sopravvivenza solamente perché in possesso di una mutazione che si scopre vantaggiosa al variare dell'ambiente, ma anche grazie al meccanismo che gli permette di *cooptare ad altre funzioni una struttura già presente*. Questo significa che adattamento e mutazione non sono in rapporto causale: il successo riproduttivo di una specie può essere determinato anche utilizzando in modo vantaggioso una mutazione presente ma comparsa per motivi indipendenti dalle variazioni ambientali. Insomma, non tutti i caratteri attualmente presenti negli organismi sono stati l'esplicito oggetto di una selezione, alcuni di essi essendo comparsi per motivi *non-adattivi*.

Possiamo illustrare meglio questo fenomeno mediante un esempio: la comparsa delle penne negli uccelli primitivi era l'esplicita soluzione ad un problema evolutivo, quello di riuscire a regolare più efficacemente la temperatura corporea. Di conseguenza, i volatili in cui era comparsa la mutazione erano avvantaggiati rispetto agli individui non mutati, perché potevano regolare meglio la propria temperatura. Inoltre, nelle condizioni in cui tale mutazione era comparsa, molto probabilmente, avere una efficiente termoregolazione significava vedere aumentata di molto la propria fitness. Questo significa che la comparsa delle piume è un esplicito adattamento all'ambiente in cui i primi uccelli si trovavano a vivere. Ma grazie alle penne, i primi proto-uccelli acquistarono anche la capacità di volare: questi organismi, cioè, cooptarono una struttura comparsa ed affermata per altri motivi (le piume per la termoregolazione) ad un altro uso (le piume per volare). Ciò indica anche che il volo non è un carattere ottenuto per motivi adattativi, bensì a causa di un *esattamento* (*exaptation*).

Una volta che tale esattamento viene fissato nella *filogenesi della specie* (cioè il suo cammino evolutivo, dalla comparsa fino all'estinzione), esso può, a sua volta, divenire oggetto di mutazioni neutre o, addirittura, vantaggiose. Ritornando al nostro esempio, una volta che i proto-uccelli hanno acquisito la caratteristica delle piume per volare, queste ultime subiscono a loro volta un processo di adattamento e mutazione che può anche proseguire in direzioni diverse, all'interno di un'identica popolazione. Se i due gruppi seguono vie indipendenti e si trasformano così in profondità da divenire, tra di loro, infertili, possiamo parlare della nascita di due specie differenti.

Per specie s'intende un gruppo di organismi aventi in comune un numero rilevante di caratteri morfologici, fisiologici, ecologici, che siano capaci di riprodursi *inter se* dando origine a prole illimitatamente feconda. Tale definizione non è, però, sufficientemente comprensiva, a causa dell'universale variabilità di tutte le caratteristiche individuali. Non essendo accettabile l'antico concetto linneano di fissità delle specie e dei loro caratteri, in quanto non rispondente alla realtà, tale concetto deve essere sostituito dal criterio di *rassomiglianza morfo-fisio-ecologica* degli

individui che la sistematica zoologica e botanica assegna alla medesima specie. Il criterio sistematico veramente basilare e discriminante rimane perciò quello della interfecondità o fecondità reciproca e illimitata che sussiste fra gli individui che compongono una specie. Va, però, rilevato come anche questo importantissimo aspetto fisiologico presenti un'ampia variabilità nell'ambito di molte specie, per cui non risulta sempre possibile stabilire un limite netto fra la completa fecondità degli accoppiamenti, nonché della prole che ne deriva, e la sterilità di quelli o di questa.

Al di là delle questioni definitorie, il punto davvero importante è capire in che modo possa darsi l'emergere di una nuova specie, cioè attraverso quali meccanismi si sia effettivamente formato l'“albero della vita”. Il meccanismo *speciativo* si nutre della variabilità degli individui, delle loro mutazioni e della loro capacità di resistere adeguatamente alle sfide ambientali; *tale capacità, però, non è ottenuta esclusivamente grazie all'adattamento, ma anche per motivi non-adattivi come, per esempio, gli esattamenti.*

Esiste, inoltre, un'altra classe di fenomeni non-adattivi che contribuiscono a plasmare l'effettiva evoluzione degli esseri viventi: si tratta delle *derive genetiche*, cioè il processo attraverso il quale alcune caratteristiche, pur non essendo esplicito oggetto di selezione, finiscono per fissarsi nell'intera popolazione. Possiamo comprendere meglio questo fenomeno se prestiamo attenzione alla variabilità umana in riferimento ai gruppi sanguinei. Come noto, la specie *Homo sapiens* è caratterizzata da 4 diversi tipi di sangue i quali, di generazione in generazione, si presentano più o meno nelle stesse proporzioni all'interno della popolazione. Può succedere, però, che se un determinato carattere, in questo caso il gruppo sanguigno, per motivi casuali, tende ad aumentare di molto la sua presenza nella popolazione, esso, allora, sarà sempre più frequente, fino ad arrivare a caratterizzare tutta la popolazione. Il carattere, insomma, può andare alla “deriva” proprio perché non è oggetto di nessuna selezione e non dà nessun vantaggio esplicito nella lotta per la sopravvivenza (tranne quando abbiamo bisogno di fare una trasfusione!).

Sono due i meccanismi principali che influenzano il dinamismo delle derive. Il primo è l'effetto *collo di bottiglia*. Come sappiamo, l'ambiente pone delle “sfide” che l'organismo, se vuole sopravvivere, deve saper risolvere. Tuttavia, una parte importante della popolazione può scomparire per eventi fortuiti che poco hanno a che fare con la selezione: una carestia o una crisi ambientale, per esempio, può falciare in maniera del tutto casuale una popolazione, cosicché il patrimonio genetico della specie sarà effettivamente ridotto a quanto posseduto dai “superstiti”.

Il secondo è l'*effetto del fondatore*: se un piccolo gruppo di individui - o, addirittura, un solo esemplare - si stacca da una popolazione rimanendo riproduttivamente isolato, le generazioni successive tenderanno ad amplificare le caratteristiche dei “fondatori” ed i loro caratteri più frequenti si fisseranno nella specie lasciando scomparire gli altri. Possiamo vedere l'azione di

questo secondo effetto nel gruppo sanguineo dei nativi americani. Il primo piccolo gruppo di *Homo sapiens* che giunse nelle Americhe aveva, infatti, una predominanza di individui con il sangue di tipo 0: grazie alla deriva, tale caratteristica – che, come sappiamo, non è oggetto di selezione – si è via via espansa fino a caratterizzare la totalità del gruppo. I nativi americani, dunque, hanno tutti il sangue di tipo 0.

Da questo esempio, emerge anche il ruolo importantissimo delle *migrazioni* nel meccanismo speciativo: se due popolazioni si separano geograficamente tanto da non avere più rapporti riproduttivi, le dinamiche di deriva, le mutazioni neutre che si sviluppano in modo indipendente, così come gli eventuali esattamenti dovuti alle diverse contingenze dell'esterno favoriscono una modificazione strutturale delle popolazioni stesse, trasformandole in specie ben distinte.

Tutti questi fattori ci devono indurre a pensare che il meccanismo speciativo non sia una graduale evoluzione di forme e strutture, cioè un accumulo lento e costante di modificazioni che si originano nel corso del tempo ma che, invece, molto più probabilmente, ci siano periodi di relativa stabilità alternati a momenti di fortissima trasformazione. L'accumulo di mutazioni neutre, così come le derive, infatti, fanno raggiungere ad una popolazione un relativo equilibrio fino a quando, raggiunta una certa soglia, queste variabilità fanno “esplodere” diversi sentieri evolutivi (come accaduto nel periodo Cambriano). L'accumulo di modificazioni “invisibili” non trasforma la specie con un ritmo uniforme, ma la costella di accelerazioni e di stabilità: alla teoria del *gradualismo* si sostituisce quindi quella degli *equilibri punteggiati*.

Questa rapidissima carrellata sull'evoluzione, naturalmente, non pretende di essere definitiva, proponendosi soltanto di fornire un quadro concettuale per comprendere meglio le condizioni di possibilità che hanno permesso l'emergere di una specie tanto particolare come la nostra. Abbiamo visto, infatti, che il punto centrale dell'evoluzione non sta tanto nella passività dell'organismo nei confronti del proprio ambiente ma, piuttosto, nella capacità degli individui di utilizzare ciò che possiedono per guadagnarsi la sopravvivenza. L'organismo non si adatta semplicemente all'ambiente, ma rende adatto l'ambiente alla propria esistenza. In questo panorama deve essere situata la comparsa dell'*Homo sapiens*: l'accumularsi di mutazioni neutre, la cooptazione di caratteri diversi ad altre funzioni, così come le occasionali derive e migrazioni hanno permesso alla nostra specie di porsi quale *frattura nella continuità* della vita. Nella consonanza della nostra evoluzione ai meccanismi della natura, siamo stati in grado di svilupparci all'interno di una *differenza* essenziale, definita proprio dalla nostra capacità di avere linguaggio, tanto che *il proprio* dell'umano, forse, è da rintracciarsi proprio in esso.