

Il segreto dei trilobiti

Se andrete a trovare Niles Eldredge nel suo studio al quinto piano dell'American Museum of Natural History di New York, dove è curatore del dipartimento degli invertebrati, la prima cosa che vi farà vedere non sarà la sua finestra su Central Park, né la sua raffinata libreria: sarà una lunga parete di scaffali verde scuro, un po' impolverati e ammaccati. Vi chiederà se vi rendete davvero conto di dove siete e allora capirete che non state soltanto visitando un'ala del più importante museo di scienze naturali americano, ma che siete davanti ad una reliquia scientifica, ad un luogo di culto nella mitologia dei biologi evuzionisti, ad uno scrigno di rara saggezza paleontologica. Niles aprirà uno dei cassetti e vi farà vedere uno spicchio della sua preziosa raccolta di trilobiti.

Immaginerete allora le migliaia di piccoli animaletti, invertebrati estintisi 250 milioni di anni fa, schedati diligentemente da più di trent'anni e racchiusi in questo eccezionale archivio paleontologico. E' una delle raccolte più importanti al mondo di questo strano abitante dei bassi fondali oceanici del Cambiano e dell'Ordoviciano, artropode marino con un corpo piatto di forma cilindrica e segmentato, sorretto da zampette sottili lungo tutto il perimetro, una testa a mezza luna con due peduncoli laterali e due grandi occhi dalla struttura estremamente complessa. Niles vi descriverà l'evoluzione delle loro bizzarre morfologie con uno zelo pari soltanto a quello con cui è solito illustrare ai visitatori l'evoluzione del moderno design delle cornette e delle trombe, di cui è raffinato cultore. Sembrerà strano, ma il segreto dei trilobiti ha cambiato per sempre la nostra immagine dell'evoluzione biologica (e forse anche delle trombe). Negli occhi multiformi dei trilobiti Niles Eldredge vede cose che nessun paleontologo aveva visto prima.

Come costruire un elefante da un topolino

A partire dal 1859, anno di pubblicazione della prima edizione de *L'origine delle specie* di Charles Darwin, il dibattito sui ritmi e sulla velocità dei processi evolutivi non ha cessato di dividere la comunità degli scienziati impegnati a decifrare i meccanismi di trasformazione degli organismi viventi. Se l'opzione gradualista di Darwin sembrò prevalere nella maggioranza dei suoi epigoni, non mancò tuttavia chi mostrasse, come Thomas Henry Huxley, le sue perplessità su tale assunzione paradigmatica ritenuta troppo vincolante. Gli episodi di discontinuità, di improvvisa estinzione o di repentina proliferazione delle forme organiche erano infatti già noti ai paleontologi dell'epoca.

L'effettivo meccanismo di "origine delle specie" non è spiegato dettagliatamente nell'omonima opera darwiniana. Il processo di selezione naturale dei più adatti comporta una trasformazione costante dell'intera popolazione di una specie, che lentamente sfuma nella specie successiva senza soluzione di continuità oppure dà origine lentamente a due o più specie discendenti. L'evoluzione è data dunque dall'accumulo regolare di piccoli cambiamenti ereditari nel corso di periodi di tempo così lunghi da permettere le ampie divergenze morfologiche fra specie che si osservano in natura. L'immagine simbolo di tale processo, proposta originariamente da Ernst Haeckel, fu l'*albero dell'evoluzione*: da un antenato comune si diversificano progressivamente le forme discendenti.

Alcuni decenni più tardi, intorno agli anni trenta e quaranta del XX secolo, la teoria darwiniana fu fatta propria dagli scienziati che negli anni precedenti avevano gettato le basi della scienza dell'ereditarietà, scoprendo i geni, i cromosomi e i meccanismi elementari di trasmissione dell'informazione genetica. Come spiega bene in questo libro Niles Eldredge, l'idea forte della Sintesi Moderna fra evolucionismo e genetica era che tutti i cambiamenti osservabili a livello macroscopico (cioè le grandi differenze fra specie, generi e famiglie diverse di organismi) fossero riconducibili a piccole innovazioni accumulate a livello microscopico, cioè nel corredo genetico, sotto la pressione costante e direttiva della selezione naturale. Lo slogan della grande Sintesi fu che “la macroevoluzione è totalmente riconducibile alla microevoluzione”.

Qualsiasi fenomeno evolutivo doveva essere il frutto di lente modificazioni del corredo genetico, indotte e fissate dalla selezione naturale. Di conseguenza, ogni proprietà che si osserva nella morfologia e nel comportamento degli organismi viventi (noi compresi) doveva essere un adattamento ottenuto per selezione naturale attraverso lenti cambiamenti nelle frequenze geniche delle rispettive linee di discendenza. Negli anni sessanta George Williams coniò il termine “gradualismo filetico”, cioè gradualismo a base genetica, per definire questa visione forte del processo evolutivo. Esso rappresentò il paradigma dominante della biologia evolucionistica per molti decenni del Novecento, almeno fino agli anni settanta, e questo benché fosse evidente già ai fondatori della Sintesi Moderna (come Theodosius Dobzhansky, George Gaylord Simpson ed Ernst Mayr) che in natura esistono indizi di profonde discontinuità evolutive.

In realtà, le linee di ricerca della Sintesi Moderna non rappresentarono mai un paradigma scientifico monolitico. Al suo interno convivevano correnti di pensiero piuttosto eterogenee. Certo, il gradualismo filetico era un dogma fondamentale per ogni buon evolucionista, un'immagine influente che ben pochi si permettevano di confutare. Tuttavia, fin dagli inizi, i teorici della Sintesi Moderna mostrarono alcune incertezze sulla possibilità di far derivare in modo deterministico tutti gli aspetti macroevolutivi da quelli microevolutivi.

Se per genetisti come Ronald Fischer non vi erano dubbi sulla legittimità dell'assunto metodologico riduzionista (la loro posizione viene oggi definita “riduzionismo genetico”, secondo cui ogni proprietà esterna degli organismi può essere spiegata a partire dalla sua determinazione genetica), a naturalisti come Ernst Mayr e Bernard Rensch questa conclusione sembrava affrettata e, soprattutto, inefficace nello spiegare i meccanismi effettivi di separazione fra le specie. Il problema lasciato inevaso da Darwin, appunto “l'origine delle specie”, non trovava una risposta adeguata nel riduzionismo genetico. Lo stesso Dobzhansky, ritenuto fra i maggiori esponenti della Sintesi Moderna e autore di un testo fondatore del 1937, dal titolo *Genetics and the Origin of Species*, essendo sia un genetista sia un naturalista ebbe la sensibilità di avvertire questo punto debole del programma di ricerca “neodarwinista”.

Ciò che maggiormente lasciava perplessi i naturalisti era la difficoltà di spiegare, attraverso la griglia interpretativa del gradualismo filetico, i frequenti episodi di discontinuità presenti nella documentazione fossile. Già nel 1942, quindi ancora agli albori della Sintesi Moderna, Mayr ipotizzò che all'origine della separazione fra le specie vi fossero cause non soltanto genetiche, ma anche ambientali e geografiche. Se per i genetisti l'evoluzione corrispondeva alla trasmissione del cambiamento “in verticale”, dal livello microevolutivo a quello macroevolutivo in ogni linea di discendenza, per i naturalisti l'evoluzione era influenzata anche da spostamenti “in orizzontale”, cioè eventi di natura geografica che portavano alla separazione fra specie.

Due anni più tardi, nell'opera *Tempo and Mode in Evolution*, il paleontologo George Gaylord Simpson notò che in molti alberi evolutivi, in particolare in quello dei

mammiferi, non era sempre possibile riscontrare una sequenza di forme intermedie che giustificasse il graduale passaggio dalle specie ancestrali alle specie attuali. Il lasso di tempo intercorso fra l'inizio della grande diffusione dei mammiferi (avvenuta dopo l'estinzione dei dinosauri, intorno a 65 milioni di anni fa) e l'apice di massima diversificazione era troppo breve per permettere un'evoluzione lenta e graduale. In una prospettiva gradualista, per creare un pipistrello, una balena, un leone e un primate, a partire da una famiglia di piccoli roditori notturni come modello base, ci vorrebbe molto più tempo!

La risposta tradizionale a questa anomalia fu che la documentazione paleontologica era in qualche modo insufficiente o lacunosa: gli anelli intermedi non si trovavano perché i reperti fossili erano incompleti e frammentari. Benché lo stesso Darwin avesse avallato questa interpretazione difensiva, Simpson preferì seguire un'altra strada: se non si trovavano gli anelli intermedi fra il pipistrello e la balena era perché il ritmo di diversificazione non era stato uniforme nel corso dell'evoluzione. In alcuni frangenti, l'evoluzione si mette a correre e produce rapidamente una grande quantità di forme anche assai diverse (un fenomeno oggi definito "radiazione adattativa"). Simpson, in altri termini, fu il primo a sospettare che le discontinuità presenti nella documentazione fossile corrispondessero a lacune reali e non fossero imputabili all'insufficienza dei reperti. L'evoluzione era riuscita davvero, in una manciata di milioni di anni, a costruire un elefante partendo da un topolino. L'enigma, così ben raccontato nei capitoli centrali di questo libro, si infittisce.

Fringuelli alla deriva

Nell'evoluzione si verificano, dunque, alcuni "salti" improvvisi. Ma qual è la causa di questi salti? Su tale quesito cadde un lungo silenzio, accompagnato dall'irrigidimento della Sintesi Moderna attorno ai suoi postulati gradualisti, fino alla metà degli anni sessanta, quando Niles Eldredge era uno studente della Columbia University. La risposta di Dobzhansky, di Simpson e, in un primo tempo, anche di Mayr fu che durante i salti evolutivi vi fosse semplicemente un'accelerazione del ritmo del cambiamento microevolutivo. Non era in discussione il ruolo della selezione naturale operante sul corredo genetico, semplicemente si ipotizzava che in alcune fasi la velocità del cambiamento aumentasse. Se i "tempi" dell'evoluzione potevano cambiare, i "modi" restavano gli stessi: alla base vi era comunque una trasformazione continuativa di tipo verticale, dettata dalla pressione adattativa della selezione naturale, che portava alla progressiva divergenza delle specie. Le discontinuità erano soltanto effetti prospettici dovuti ad accelerazioni eccezionali del ritmo evolutivo oppure alla carente documentazione fossile.

Anche se l'idea che la speciazione fosse in qualche modo connessa a popolazioni periferiche aveva una lunga storia ed era già stata sfiorata da Darwin nella sua discussione delle varietà geografiche di specie isolate alle Galapagos, soltanto nella prima metà degli anni sessanta del Novecento il tema della discontinuità evolutiva e il tema della diversificazione fra specie cominciarono ad avvicinarsi. Mayr notò che in molti episodi della storia naturale, in occasione della nascita di una nuova specie, si riscontrava un fenomeno peculiare, di natura strettamente geografica o climatica. Egli intuì per primo, grazie ai suoi studi sugli uccelli della Nuova Guinea e del Pacifico, che la speciazione, il cambiamento di ritmo nella trasformazione delle specie e i fattori geografici macroevolutivi erano tre fenomeni strettamente interconnessi.

Nell'area di distribuzione di una determinata specie, supponiamo una specie di fringuello che abita in un territorio montuoso, una piccola enclave rimasta ai margini dell'areale viene separata dal grosso della popolazione a causa di una barriera

geografica. Per esempio, un raffreddamento del clima produce un ghiacciaio lungo una catena montuosa e separa le due popolazioni. I fringuelli rimasti isolati a est del ghiacciaio non possono più incontrare i loro compagni occidentali e quindi non possono nemmeno incrociarsi. Il flusso genico fra le due popolazioni si interrompe. Non potendo scambiarsi l'informazione genetica, con il passare delle generazioni le mutazioni genetiche accumulate da una popolazione sono sempre più diverse da quelle accumulate nell'altra: i due gruppi cominciano a separarsi geneticamente, vanno alla deriva l'uno rispetto all'altro. Più la popolazione iniziale che va alla deriva è piccola più veloce è il ritmo di separazione genetica dalla specie madre, perché le variazioni all'interno di gruppi ristretti si accumulano più rapidamente sotto l'effetto della selezione naturale.

Supponiamo che a est del ghiacciaio sia rimasto soltanto un piccolo gruppo di fringuelli, isolati in una vallata. Ora immaginiamo che dopo un certo lasso di tempo il clima torni a farsi mite e il ghiacciaio si ritiri: le due popolazioni di fringuelli possono incontrarsi nuovamente. Se però il tempo trascorso è stato sufficiente a tracciare un divario genetico consistente fra le due popolazioni, quando un fringuello orientale proverà ad unirsi con una consorte occidentale non vi sarà prole oppure la loro prole sarà ibrida. Questo significa che la barriera genetica fra le due popolazioni ha superato la soglia oltre la quale non è più possibile una riproduzione fertile e lo scambio genetico non è più possibile. Il fenomeno fu chiamato da Mayr "speciazione allopatrica", cioè nascita di una nuova specie in un luogo diverso dal luogo di origine. Le specie, in altri termini, nascono quando una piccola popolazione va alla deriva.

Alcune caratteristiche dei processi di speciazione allopatrica sono particolarmente importanti. Innanzitutto, si tratta di un processo irreversibile di separazione e di moltiplicazione delle specie che potrebbe spiegare l'andamento ramificato di molte sequenze fossili di specie estinte: la "gemmazione" di una nuova specie dal tronco della specie madre potrebbe corrispondere ogni volta ad un fenomeno di speciazione allopatrica. Naturalmente solo una piccola parte delle popolazioni periferiche produce effettivamente una specie nuova, ma quando avviene un cambiamento evolutivo è probabile che sia dovuto alla rapida divergenza a partire da piccole popolazioni isolate.

In secondo luogo, la velocità del processo di separazione è direttamente proporzionale alle dimensioni della popolazione coinvolta e questo potrebbe spiegare le accelerazioni evolutive rimarcate da Simpson: pur essendo un meccanismo fedelmente darwiniano di accumulo continuo di mutazioni genetiche sotto l'effetto della selezione naturale, la velocità relativa dell'evento di speciazione può variare in base al numero di individui coinvolti nella deriva.

In terzo luogo, le variazioni genetiche che conducono rapidamente all'incompatibilità riproduttiva con la specie madre non necessariamente corrispondono ad una variazione proporzionale dei caratteri morfologici: magari i due fringuelli si assomigliano ancora a tal punto che non riusciamo a distinguerli, eppure non si incrociano più. Questo elemento indusse Mayr a dare una nuova e più precisa definizione del concetto di specie, che tenesse conto della soglia di divario genetico oltre la quale non vi è più incrocio fra organismi di due popolazioni. Indipendentemente dalle somiglianze o dalle divergenze morfologiche, Mayr postulò che una nuova specie nascesse ogniqualvolta tutti gli individui di una data popolazione "alla deriva" non si incrocino più in modo fecondo con i membri della specie madre.

L'idea che le specie sfumino gradualmente e impercettibilmente l'una nell'altra venne messa in discussione. Tuttavia, con la teoria della speciazione allopatrica Mayr trasse le opportune conseguenze di quello stesso pensiero "popolazionale" che già Darwin aveva introdotto nella sua opera. Le innovazioni evolutive nascono all'interno di popolazioni e si propagano a partire dal successo differenziale di singoli individui "unici". Quando

una piccola popolazione resta separata dal corpo principale della specie, va alla deriva e accumula variazioni genetiche per selezione naturale, fino al superamento della soglia di incrocio con i membri della specie madre. La produzione di diversità diventa allora il motore principale dell'evoluzione sia in termini di organismi singoli sia in termini di specie: le speciazioni producono variazioni a livello di popolazioni, così come le mutazioni genetiche casuali producono variazioni a livello di individui. L'evoluzione è dunque il risultato del successo differenziale non soltanto di organismi singoli, ma anche di specie.

L'evoluzione finì di essere la storia edificante di singoli caratteri adattativi che si perfezionano all'interno di una singola specie per opera del filtro selettivo. Divenne piuttosto una storia drammatica di popolazioni alla deriva, di migrazioni, di separazioni, di colonizzazioni, di competizioni fra specie: fenomeni innescati prevalentemente dall'insorgere di barriere geografiche e naturali che spezzano gli areali di distribuzione delle specie. L'ecologia dell'evoluzione si allargò ad un contesto molto più ampio di fattori ambientali, naturali, climatici, geografici e geologici. In particolare, le alterazioni e le oscillazioni climatiche divennero decisive per spiegare molti eventi cruciali della storia naturale: un indizio che Niles Eldredge non si sarebbe lasciato sfuggire nei primi anni della sua carriera di ricercatore.

Guardare negli occhi un trilobite

La teoria della speciazione allopatrica introdusse un elemento nuovo, potenzialmente dirimpante: un evento geografico, in alcun modo connesso con il valore adattativo degli organismi di una specie e con le pressioni selettive in atto in quel momento, isolava una piccola porzione della popolazione e poteva portare in alcuni casi alla nascita di una nuova specie. Questo processo poteva realizzarsi in tempi molto brevi rispetto a quelli previsti dalla teoria neodarwiniana. Non si trattava più di un'accelerazione della velocità all'interno di un processo selettivo, ma di una divergenza repentina introdotta da un fattore esterno: una vera e propria discontinuità sia nei tempi che nei modi dell'evoluzione.

Il merito di avere connesso questa intuizione, presente nella teoria della speciazione allopatrica, con la realtà dei dati paleontologici fu proprio di due allievi di Ernst Mayr e di Norman Newell presso l'American Museum of Natural History di New York: Niles Eldredge e Stephen J. Gould. I due giovani paleontologi, nel corso delle loro prime ricerche sul campo intorno alla seconda metà degli anni sessanta, avevano notato che le specie osservabili non sembravano affatto sfumare l'una nell'altra impercettibilmente né sembravano accelerare improvvisamente un ritmo di cambiamento altrimenti uniforme. La documentazione geologica mostrava ai loro occhi due fenomeni complementari ed entrambi inspiegabili nella prospettiva del gradualismo filetico: le specie mostravano lunghissimi periodi di generale stabilità (misurabili in milioni di anni), durante i quali subentravano pochissimi cambiamenti morfologici, interrotti da brevi periodi di cambiamento (misurabili in migliaia di anni) durante i quali comparivano repentinamente nuove forme. Le specie sembravano spuntare rapidamente per poi rimanere uguali a se stesse per decine di milioni di anni, salvo estinguersi talvolta con la medesima rapidità del loro arrivo. Questo schema terribilmente non gradualista era davvero il frutto perverso di una scarsa e inaffidabile documentazione? O c'era dell'altro? La paleontologia andava presa sul serio?

La chiave della svolta era già racchiusa nell'idea di speciazione allopatrica e il primo ad accorgersene fu proprio Eldredge. Nel 1971 egli pubblicò i risultati di uno studio molto esteso e approfondito su migliaia di esemplari di trilobite, appartenenti a due specie diverse, rinvenuti nello stato di New York e nel Midwest. Il primo dato che colpì la sua

attenzione fu la persistente stabilità evolutiva delle due specie. Nel Midwest i trilobiti rimasero identici a se stessi per otto milioni di anni, per essere poi sostituiti improvvisamente da esemplari con una piccola modificazione nella struttura degli occhi (composti non più da diciotto file di lenti, ma da diciassette). Nei siti dello stato di New York l'andamento era analogo: la prima specie con diciotto file di lenti domina per un tempo lunghissimo, finché si assiste alla transizione rapidissima alla nuova forma con diciassette file di lenti. Per sua buona sorte, Eldredge riuscì a trovare anche alcuni esemplari coetanei ma appartenenti a specie diverse, segno che vi era stato un breve periodo di transizione in cui le due specie erano vissute insieme.

Qual era la piccola e preziosissima storia dei trilobiti della East Coast? Una storia di stabilità interrotta da brevi periodi di cambiamento: nell'areale di New York la specie originaria si biforca e dà origine per speciazione ad una nuova forma, di maggior successo anche se dotata di una modificazione morfologica minima, che in breve tempo sostituisce la precedente e dopo alcuni milioni di anni colonizza anche il lontano areale del Midwest. E' dunque la storia di una speciazione allopatrica rapida e fortunata, che interrompe un lungo periodo di stabilità nella vita dei trilobiti. E' un racconto di speciazioni improvvise, di competizione per le risorse, di colonizzazioni e di estinzioni. Eldredge capì che la teoria della speciazione allopatrica andava estesa su scala geologica e globale. Un anno dopo, insieme al collega Stephen J. Gould, che era giunto alle medesime conclusioni studiando la diversificazione di alcune specie di chioccioline terrestri, diede alle stampe un articolo che segnerà la storia della biologia della seconda metà del Novecento, dal titolo "Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism". Secondo la Teoria degli Equilibri Punteggiati, la storia naturale non è sempre riconducibile ad un modello di crescita graduale, continuativa e cumulativa, ma più frequentemente è riconducibile ad un modello di stabilità morfologica duratura "punteggiata" da episodi di discontinuità, durante i quali si decidono la vita, la morte e la reciproca sostituzione delle specie. Un'applicazione estesa del meccanismo di speciazione geografica dava come risultato una visione discontinuista dell'evoluzione nella sua generalità.

Per i sostenitori del gradualismo filetico, che respingeranno e polemizzeranno duramente con i due paleontologi eterodossi, l'eresia era duplice. In primo luogo, la rapidità dell'equilibrio "punteggiato" non è data dall'aumento delle pressioni selettive, ma da episodi di speciazione allopatrica, quindi di natura geografica e spesso contingenti: l'estinzione e la sostituzione di una specie possono avvenire a causa della competizione fra due o più specie, e non per un progressivo disadattamento fra una singola specie e la sua nicchia ambientale. In secondo luogo, i periodi di stabilità presuppongono che non vi sia affatto un accumulo di piccole variazioni indotte dalla selezione naturale per un adattamento progressivo della specie alla sua nicchia. La norma in natura sembra essere la stabilità, non il mutamento graduale: l'evoluzione è una rarità in paleontologia.

Su questi due punti precisi, ed in particolare sul secondo, il dissenso con i postulati della Sintesi neodarwiniana era certamente forte, ma la spiegazione dei fenomeni di discontinuità e di stabilità fornita dalla teoria degli equilibri punteggiati non negava affatto i principi fondamentali della teoria darwiniana dell'evoluzione, come invece vollero sostenere ripetutamente i suoi detrattori. I sostenitori della teoria degli equilibri punteggiati furono accusati, di volta in volta, di voler negare i fondamenti della teoria darwiniana, di fiancheggiare complotti marxisti rivoluzionari, di voler reintrodurre i "mostri promettenti" del genetista Richard Goldschmidt.

L'accusa più amara, per Eldredge e Gould, fu quella di voler favorire indirettamente il ritorno del creazionismo nel dibattito pubblico statunitense, nonostante fossero note a

tutti le battaglie politiche condotte da entrambi in difesa dell'insegnamento della teoria darwiniana nelle scuole americane (Eldredge, 2001a). In realtà, non si trattava in alcun modo di una teoria "saltazionista" e antidarwiniana, poiché il meccanismo basilare della selezione naturale e la nozione di adattamento non erano rifiutati. Semplicemente, questo evoluzionismo speciazione metteva in crisi alcuni postulati, di tipo riduzionista e gradualista, di una parte della Sintesi Moderna. Nulla di così catastrofico, come si è impegnato a ricordare molte volte Gould, ma, trattandosi di materia delicata (le origini della vita e di noi stessi), era una teoria abbastanza sfrontata da scatenare le ire dei "piani alti" della biologia evoluzionistica di scuola anglosassone.

A dispetto delle diffidenze iniziali, grazie a questa svolta paradigmatica la visione della storia naturale si arricchì ben presto di nuovi elementi e di nuovi fattori prima non considerati, spiegando processi non inclusi nella teoria darwiniana ma non contrari ad essa. La formulazione della teoria degli equilibri punteggiati, ispirata peraltro all'idea di "rivoluzione scientifica" di Thomas Kuhn, aprì il dibattito evoluzionistico ad un maggiore pluralismo e venne battezzato dai suoi teorici (fra i quali, anche il genetista Richard C. Lewontin, i paleontologi Stephen Stanley ed Elisabeth Vrba, il filosofo della biologia David Hull) come estensione del darwinismo o "post-darwinismo".

Il nodo cruciale dello scontro era la differente concezione del cambiamento evolutivo. Secondo la teoria degli equilibri punteggiati, gran parte dei cambiamenti più significativi sono introdotti dai fenomeni di speciazione e avvengono in breve tempo, il resto è stabilità: una teoria opposta a quella della Sintesi Moderna, secondo cui la speciazione era il risultato passivo di un accumulo di cambiamenti precedenti. Nella concezione "puntuazionale" le specie non sfumano l'una nell'altra, ma nascono, vivono e muoiono come entità biologiche discrete e reali, portatrici di cambiamenti adattativi al loro sorgere e poi straordinariamente efficaci nel mantenerli inalterati.

I fattori che determinano la forte stabilità delle specie rimangono ancora oggi parzialmente oscuri. Forse durante la speciazione le forze di coesione omeostatica del genoma, che avevano garantito la lunga immobilità della specie, si allentano e avviene una riorganizzazione genetica complessiva, probabilmente governata dai geni regolatori e *homeobox* (Mayr, in Somit, Peterson, 1989; Solé, Goodwin, 2000; Kauffman, 2000). Eldredge, tuttavia, preferisce attribuire la stabilità delle specie al più semplice, e verificabile, meccanismo di spostamento geografico delle specie da un habitat all'altro (*habitat tracking* o "ipotesi dell'inseguimento dell'habitat"): le specie, anziché adattarsi ad una nicchia ecologica in trasformazione, rincorrono gli habitat a loro più congeniali, evitando così di modificare la loro morfologia.

Grazie alla teoria degli equilibri punteggiati la paleontologia tornò ad essere una disciplina "affidabile", poiché le discontinuità improvvise e i lunghi periodi di inattività che caratterizzano la vita delle specie furono finalmente intesi alla lettera e non come imperfezioni provvisorie dei reperti. La realtà era già sotto gli occhi degli scienziati da decenni, ma il filtro gradualista aveva impedito loro di afferrarla: la paleontologia aveva sempre raccontato la verità, ma era una verità che non coincideva con le loro aspettative. Fu così che negli anni settanta i paleontologi riesaminarono i loro dati con uno spirito del tutto nuovo e ben presto, alla luce della teoria puntuazionale, molti fenomeni di discontinuità e di stasi furono rivisti e compresi in un'ottica più fedele alle reali dinamiche del processo evolutivo. Le specie, salvo alcuni repentini episodi di cambiamento "rivoluzionario", tendono ad essere fortemente conservatrici.

Gli equilibri punteggiati, trent'anni dopo

Negli anni settanta e ottanta la nozione di "equilibrio punteggiato" fu ulteriormente raffinata, specificando meglio l'intreccio di dinamiche ecologiche e dinamiche

genetiche che produce la discontinuità. Una quantità crescente di scienziati cominciò ad apprezzarne le implicazioni sperimentali e il dibattito sulla maggiore o minore incidenza dei fenomeni di discontinuità “punteggiata” rispetto alle tendenze graduali si spostò sempre più a favore dei primi, anche se ancora oggi molti paleontologi ritengono il gradualismo filetico responsabile di una parte consistente dei processi di trasformazione biologica. Una difficoltà empirica sta nel fatto che, essendo gli equilibri punteggiati eventi brevi, è molto difficile “centrarli” nella documentazione paleontologica. Tuttavia, si scoprì in seguito che la speciazione allopatrica era soltanto uno dei molteplici processi di speciazione possibili e che una percentuale abbastanza alta di innovazioni morfologiche avveniva in coincidenza con episodi di speciazione (Stanley, in Somit, Peterson, 1989). Gli equilibri punteggiati furono inoltre rafforzati dalla scoperta dello schema di alternanza fra eventi di estinzione di massa ed eventi di differenziazione esplosiva che contraddistingue i tempi lunghi della vita delle specie sulla Terra: questo “respiro lungo” della vita è infatti il prodotto di dinamiche ecologiche globali che innescano le estinzioni e le successive speciazioni. Oggi sappiamo peraltro che la speciazione può avvenire non soltanto in un isolato periferico, ma anche in una popolazione che passa attraverso un collo di bottiglia evolutivo (*bottleneck*), un po’ come è avvenuto per le popolazioni umane durante le glaciazioni del Pleistocene.

In effetti, la teoria degli equilibri punteggiati fu introdotta con effetti rilevanti anche nello studio dell’evoluzione umana, grazie al paleoantropologo Ian Tattersall, responsabile del Dipartimento di Antropologia dell’American Museum of Natural History di New York, fra i maggiori esperti mondiali di primatologia nonché collega e amico di Niles Eldredge. Proprio con Eldredge, Tattersall pubblicò nel 1982 “I miti dell’evoluzione umana”, nel quale attaccava il modello gradualista e lineare dell’evoluzione umana ancora dominante a dieci anni dalla formulazione della teoria degli equilibri punteggiati. L’intento dell’opera era quello di riportare l’immagine dell’evoluzione ominide alla realtà della documentazione paleontologica, ormai colma di anomalie e di divergenze rispetto al modello scalare degli “anelli mancanti”. Era necessaria, scrissero Eldredge e Tattersall, una svolta interpretativa radicale nello studio dei fossili ominidi: anche il percorso verso *Homo sapiens* doveva assomigliare sempre più ad un cespuglio ramificato di forme nel quale i differenti percorsi evolutivi sono ricchi di discontinuità, di biforcazioni contingenti, di convivenze fra specie, di lunghi periodi di stabilità solcati da brevi periodi di cambiamento.

Eppure, a trent’anni dalla pubblicazione del saggio sugli equilibri punteggiati, le categorie interpretative dominanti sui giornali e in ambito divulgativo sono di tutt’altro tenore. L’assunto della Sintesi Moderna, secondo cui tutti gli aspetti macroevolutivi e morfologici sono da ricondurre a cause microevolutive (cioè genetiche), è ancora in grande voga: la selezione naturale agirebbe sul corredo genetico di una specie per ottimizzarne l’adattamento all’ambiente; nulla di ciò che vediamo in natura sarebbe privo di senso, nulla sarebbe frutto del caso o di circostanze non controllate dalla selezione naturale; sarebbe la presenza onnipervasiva di quest’ultima a determinare i comportamenti e l’aspetto di ogni organismo, noi compresi.

Pur definendosi “neodarwinisti”, o addirittura “ultradarwinisti”, i teorici più intransigenti dell’adattazionismo e del gradualismo contemporanei si allontanano, ad avviso di Eldredge, dall’originaria flessibilità dell’impostazione darwiniana. Nel 1966 George Williams negò risolutamente che fossero possibili meccanismi di selezione agenti a livello dei gruppi o delle specie: la selezione doveva agire soltanto all’interno della specie, determinando il successo differenziale di singoli individui e non di gruppi, e poiché questo successo differenziale si misura nella quantità di geni trasmessi alla discendenza egli teorizzò che l’adattamento non fosse altro che la strategia ottimale

attraverso la quale i geni si trasmettono di generazione in generazione. Nel 1992 Williams ribadì che anche comportamenti evidentemente contrari alla logica della lotta per la sopravvivenza del più adatto, come l'altruismo, la simbiosi e la cooperazione, potevano essere spiegati attraverso meccanismi selettivi. Se per esempio l'atto di altruismo è rivolto a parenti prossimi, ipotizzò che la "selezione di parentela" lo avesse fissato nei comportamenti animali per poter diffondere, attraverso la sopravvivenza dei parenti, il maggior numero di geni simili ai propri. Secondo l'ipotesi attuale della "inclusive fitness", l'altruismo sarebbe una forma sofisticata di egoismo. Estendendo questo ragionamento, si vollero spiegare tutti i comportamenti sociali presenti in natura (dalle formiche alle civiltà umane) in termini genetici e selettivi.

Il biologo inglese Richard Dawkins, nel 1976, nella sua celebre opera *Il gene egoista*, calcò la mano su questi concetti, affermando che gli organismi non sono altro che meri veicoli di trasmissione dei geni. Anche se nelle opere successive mitigò in parte le sue posizioni (Dawkins, 1996), egli sostenne che è il gene, e non l'individuo, l'unità fondamentale e immortale dell'evoluzione: la selezione (saltando la dimensione complessiva dell'organismo) agisce direttamente su di essi, massimizzandone la trasmissione. Secondo i sostenitori del programma di ricerca definito "sociobiologia", tutto ciò che vediamo in natura e anche tutto ciò che riscontriamo nelle società umane e nei comportamenti della nostra specie è funzionale alla lotta per la trasmissione di un maggior numero di geni possibile alla discendenza, come se l'impasto indecifrabile di contraddizioni, di ambiguità e di grandezze che chiamiamo "condizione umana" fosse riassumibile in un asettico catalogo di geni incastrati l'uno nell'altro che "aspirano" a diffondersi il più possibile. Le funzioni fondamentali della sopravvivenza sarebbero determinate inflessibilmente da pool di geni specifici, frutto di una dura lotta per la sopravvivenza. Come sostengono i teorici della "psicologia evoluzionistica", questa spiegazione universale varrebbe anche per i comportamenti più complessi della specie *Homo sapiens*, definiti come "adattamenti mentali" originatisi nel corso dell'evoluzione per selezione naturale.

Questo approccio riduzionista, molto attraente per una specie come la nostra che ama le spiegazioni semplici e universali (ancor più se focalizzate sul sesso), sottovaluta non soltanto due livelli fondamentali di selezione (l'individuo e le specie), ma anche gli aspetti ecologici ed economici dei contesti nei quali gli organismi vivono (Sterelny, Griffiths, 1999). Se contano principalmente gli aspetti riproduttivi e la quantità di geni tramandati, l'adattamento ottimale sarà il mezzo per raggiungere la massima diffusione dei propri geni e il ritmo del cambiamento sarà graduale. Come ha notato molto bene Richard Morris nella sua recente ricostruzione della controversia fra ultradarwinisti e postdarwinisti (Morris, 2001), si può facilmente verificare l'incompatibilità dell'approccio riduzionista con la teoria degli equilibri punteggiati. Quest'ultima focalizza l'attenzione, principalmente, sulle cause geografiche ed ecologiche che, attraverso le speciazioni, producono la maggior parte delle innovazioni evolutive.

La sfida al riduzionismo genetico

Avvertendo i pericoli di un'impostazione riduzionista dell'evoluzione, Niles Eldredge e Stephen J. Gould, dalla prima metà degli anni ottanta, spostarono la loro attenzione proprio sulle incongruenze dell'ultradarwinismo. Eldredge sottolineò che sarebbe stato un grave errore trascurare la molteplicità dei livelli evolutivi che si intrecciano nelle dinamiche evolutive: i sistemi biologici su larga scala devono essere considerati importanti quanto i geni. Propose pertanto di considerare le unità evolutive di riproduzione come disposte su una gerarchia di tre livelli: il livello microevolutivo dei geni, il livello intermedio degli organismi, il livello macroevolutivo dei gruppi e delle

specie. Ciascun livello deve essere considerato, a suo avviso, come autonomo, indispensabile e, al contempo, interdependente rispetto agli altri.

Un evento prodottosi al livello più alto può ripercuotersi sui livelli più bassi, o viceversa una trasformazione microevolutiva può propagarsi ai livelli superiori. La selezione naturale può agire indipendentemente su tutti i livelli, sia a livello genetico sia a livello di specie. Dunque, la microevoluzione non è totalmente riducibile alla microevoluzione: i molteplici fenomeni macroevolutivi di “cernita” delle specie (*species sorting*, cioè la sopravvivenza differenziale delle specie intese come entità su larga scala), prodotti da interazioni selettive (ma non necessariamente) fra popolazioni e fra gruppi di individui, acquisiscono una loro autonomia.

Fra geni e ambiente viene ad instaurarsi un rapporto di interazione e di co-costruzione: gli organismi sono il frutto di un fascio di interdipendenze genetiche, ambientali, fisiche. Questa “inter-penetrazione” di livelli, come è stata definita dal genetista Richard Lewontin, sarebbe così sottile da rendere addirittura difficoltoso il riconoscimento di livelli evolutivi distinti: l’evoluzione sarebbe allora una totalità integrata prodotta da unità evolutive accoppiate e in permanente coevoluzione (Lewontin, 2000).

Ma non solo. Eldredge propose di accoppiare la gerarchia genealogica con una gerarchia ecologica o economica, costituita dalla sequenza dei livelli, a scatola cinese, attraverso i quali si realizzano le interazioni economiche necessarie alla sopravvivenza. Solo l’interazione fra le due gerarchie può spiegare la complessità delle dinamiche evolutive: noi mangiamo per riprodurci, ma il bisogno primario è di mangiare, altrimenti non vi sarebbe nessuna riproduzione. Cause genetiche e cause ambientali si intrecciano strettamente nel definire le proprietà degli organismi e delle popolazioni. Non è possibile spiegare tutti i comportamenti umani in termini di ottimizzazione della trasmissione ereditaria, perché molto spesso prevalgono ragioni di tipo economico o ecologico. I cacciatori-raccoglitori, per esempio, devono limitare fortemente le nascite perché il loro stile di vita, fatto di frequenti spostamenti, rimanga sostenibile: un comportamento decisamente imbarazzante per i loro “geni egoisti”...

La teoria gerarchica dell’evoluzione, formulata da Eldredge nel 1985 (Eldredge, 1985) e approfondita da altri paleontologi (Allen, Starr, 1982; Salthe, 1985), modifica radicalmente la nostra interpretazione dei reperti fossili e rappresenta la “trama” complessa dei processi evolutivi proposta in questo libro. Come per gli equilibri punteggiati, siamo dinanzi ad una estensione e non ad una confutazione della teoria darwiniana. Scorrendo attraverso i tre livelli della gerarchia, i processi evolutivi possono seguire due direzioni opposte. Vi sono innanzitutto i normali movimenti “all’insù” previsti dalla teoria darwiniana: mutazioni e ricombinazioni genetiche (livello micro) producono la variabilità individuale (livello di mezzo) sulla quale agisce la selezione naturale, che fissa i caratteri più vantaggiosi per una certa popolazione adattata al suo habitat (livello macro). Attraverso questo processo dal basso verso l’alto si produce una certa quantità di novità evolutive e le popolazioni locali si adattano alle loro nicchie ambientali. Questa sincronizzazione non è infinita. Quando la popolazione raggiunge un grado soddisfacente di adattamento e l’ambiente non cambia, essa può stabilizzarsi e rimanere immutata per lunghissimi periodi.

La distinzione fra le caratteristiche genetiche e le caratteristiche morfologiche introduce però un elemento nuovo. Se l’ambiente, come accade spesso, è frammentato in piccole nicchie diversificate, può accadere che popolazioni locali di organismi si adattino separatamente alle diverse nicchie, pur rimanendo all’interno della stessa specie. Sulla scorta della definizione biologica di Mayr, non è facile tracciare confini netti fra le specie, soprattutto se estinte. Anche se in alcuni casi la comparazione genetica può aiutarci, non possiamo tornare indietro nel tempo e verificare se i membri di due

popolazioni si siano incrociati o meno. Di certo, noi sappiamo oggi che le specie sono spesso costituite da un mosaico di piccole popolazioni locali adattate a microambienti. Vi sono dunque alcune differenze intraspecifiche fra le popolazioni locali, dovute a modificazioni adattative divergenti riguardo alle modalità di sopravvivenza (gerarchia economica).

Il più delle volte queste popolazioni locali vengono riassorbite nella specie madre e le loro incipienti innovazioni adattative vanno perdute. Ma il mosaico si complica ancora, perché in alcuni casi una piccola popolazione locale rimane isolata sufficientemente a lungo per dare origine a una nuova specie. A causa di un isolamento geografico, la divergenza adattativa di tipo ecologico o economico si traduce in una divergenza anche genetica (gerarchia genealogica).

La quantità di speciazioni allopatriche potenziali all'interno di una specie suddivisa in piccole popolazioni locali è dunque proporzionale alla frammentazione e alla volubilità degli habitat. Se un ambiente è fluido e ricco di barriere geografiche che spezzano la compatibilità genetica fra popolazioni, il numero di specie aumenta e il palcoscenico dell'evoluzione ha più attori in scena. In una visione gerarchica, le caratteristiche di una specie sono "proprietà emergenti" che scaturiscono dalle interazioni fra gli organismi che ne fanno parte, ma non sono riducibili ad esse (Gould, in Somit, Peterson, 1989). Le specie, intese come "individui" biologici autonomi caratterizzati da una forte coesione del genotipo, hanno ciascuna una propria biografia peculiare: alcune si estinguono subito, alcune colonizzano le nicchie vicine, alcune migrano in altri habitat e partecipano a competizioni interspecifiche e cernite di specie (da cui forse dipendono le tendenze graduali nell'evoluzione, che non sono affatto escluse in questa visione post-darwiniana), altre rimangono stabili accumulando variazioni genetiche senza conseguenze fenotipiche. In questo modo processi macroevolutivi (come la selezione fra gruppi) ricadono all'ingiù nella gerarchia, trascinando con sé i livelli inferiori. Questa attenzione per la diversità delle specie come entità autonome e coese porterà Eldredge, in anni successivi, alla formulazione di alcune fra le più vivide e potenti argomentazioni in difesa della biodiversità terrestre, nonché alla progettazione della stupenda "Hall of Biodiversity" presso l'American Museum of Natural History di New York. Le alterazioni degli habitat terrestri indotte dall'antropizzazione stanno infatti stravolgendo le delicate regole di sopravvivenza di decine di migliaia di specie, causandone l'estinzione in massa (Eldredge, 1991; 1995a; 1998).

In questa geometria variabile di fattori e di livelli sovrapposti, non necessariamente la differenziazione di una nuova specie va di pari passo con nuovi adattamenti, e ancor meno con "migliori" adattamenti: in alcuni casi due popolazioni all'interno della stessa specie possono mostrare differenze morfologiche di tipo adattativo estremamente accentuate (eppure sono solo variazioni interne alla stessa specie, senza un grosso riscontro genetico); in altri casi due specie distinte (a causa di un isolamento geografico) sono morfologicamente e adattativamente identiche. Questo significa peraltro che un equilibrio punteggiato non implica automaticamente l'introduzione di una novità evolutiva. In altri casi ancora, un equilibrio punteggiato porta con sé una novità morfologica che non rappresenta un adattamento, bensì un effetto collaterale o una ridondanza casuale che in futuro potrebbe rivelarsi utile in caso di modificazioni dell'habitat. Detto in altri termini, in una prospettiva puntuazionale gli effetti della selezione naturale sulle linee di discendenza vanno integrati con una molteplicità di altri meccanismi e fattori evolutivi indipendenti, di origine ambientale e geografica, come dimostrano le più recenti ricostruzioni degli episodi di estinzioni di massa sulla Terra.

Inoltre, la frammentazione degli habitat non è direttamente proporzionale soltanto al numero di specie che nascono, ma anche alla velocità con cui nascono. Se un territorio è

suddiviso in migliaia di minuscole nicchie ambientali, in migliaia di enclaves comunicanti o separate, le popolazioni locali sono altrettanto ridotte di numero. Vi sarà dunque una proliferazione di derive genetiche rapide all'interno di piccole popolazioni portatrici di modificazioni non necessariamente adattative, per il fenomeno definito "effetto del fondatore".

Ecco perché l'arrivo di un'era glaciale, che frammenta gli habitat, ha prodotto una radiazione adattativa in molti gruppi di mammiferi africani, compreso il nostro. C'è stata un'esplosione di equilibri punteggiati. Come ha scoperto negli anni ottanta la paleontologa Elisabeth Vrba, grazie alla teoria gerarchica dell'evoluzione e alla teoria degli equilibri punteggiati possiamo finalmente interpretare correttamente gli eventi intricati che hanno contraddistinto il Pleistocene in Africa e sconvolto il cespuglio degli ominidi con una vera e propria esplosione di forme (Vrba, 1985a; 1985b). Un cambiamento ambientale piuttosto rapido ha reso vani i precedenti adattamenti delle forme ominidi, obbligandole alla migrazione verso altri habitat, all'estinzione oppure alla sopravvivenza grazie a opportunistici riadattamenti. La frammentazione delle nicchie ambientali ha poi moltiplicato le speciazioni e le colonizzazioni di nuovi habitat, innescando rapidi processi di sostituzione fra specie (ipotesi del *turnover pulse*).

La morale di questa storia popolazionale e "puntuazionale" concorda difficilmente con una visione antropocentrica dell'evoluzione. La glaciazione ha prodotto radiazioni adattative ed effetti analoghi in altri cespugli evolutivi, come in quello delle antilopi e di altri mammiferi (Stanley, 1996). Non vi è stato dunque nulla di "speciale" nei meccanismi che hanno dato origine alla diversità interna del genere *Homo*. Il fatto che una sola specie sia sopravvissuta a questa intricata vicenda di speciazioni ed estinzioni non sembra dipendere da un processo di miglioramento costante e graduale. Le tendenze al miglioramento graduale sono piuttosto un sottoinsieme dei possibili ritmi evolutivi e derivano da dinamiche macroevolutive di competizione e di sostituzione fra specie. Ciò che semmai è speciale è il destino recente di questa specie "sapiens", dall'invenzione dell'agricoltura in poi: noi, esito contingente di un'estinzione di massa (quella dei dinosauri) e di una miriade di altre biforcazioni fortunate, ci siamo resi colpevoli della più grande estinzione di massa della biodiversità mai avvenuta in così poco tempo.

Cacciatori di "pattern"

Uno dei maggiori meriti scientifici di Eldredge è di avere capito che l'allargamento della teoria evoluzionistica ad una visione gerarchica delle unità e dei livelli di evoluzione, innescata dalla teoria degli equilibri punteggiati, avrebbe fornito a sua volta un contesto esteso per comprendere la stasi e il cambiamento discontinuo: le due teorie, saldandosi in una concezione pluralista e puntuazionale dell'evoluzione, si sono infatti rafforzate a vicenda e oggi rappresentano un'acquisizione fondamentale del pensiero biologico. Lungo le trame sottili dell'evoluzione possono dunque succedere molte più cose di quante previste nello scenario di prevedibilità e di linearità del riduzionismo genetico: la stabilità, la speciazione rapida, la gradualità, l'estinzione di massa, l'avvicendamento di specie... sono tutti fenomeni resi plausibili e pertinenti da una concezione pluralista del processo evolutivo.

Secondo tale prospettiva, l'evoluzione non è casuale né frutto di mere coincidenze: vi sono regolarità e strutture ricorrenti nei meccanismi di trasformazione degli organismi e delle specie, compreso il normale adattamento per selezione naturale. Non si rinuncia a nulla di ciò che prevedeva l'originaria teoria darwiniana, ma il campo delle possibilità si è esteso. La fenomenologia dell'evoluzione biologica è oggi più complessa e richiede nuovi strumenti interpretativi, primo fra tutti il principio secondo cui le specie sono da

considerare come individui biologici su larga scala. In questo nodo concettuale si incentra il valore dell'ultima opera di Eldredge: l'evoluzione predilige alcuni "patterns" ricorrenti, ma i suoi sentieri sono ogni volta imprevedibili e unici. Allo stesso modo, le teorie evoluzionistiche sono mosse da "patterns" profondi che selezionano i dati pertinenti e influenzano le comunità scientifiche, talvolta ibridandosi o mescolandosi di epoca in epoca.

Il lavoro dei paleontologi assomiglia sempre più a questa immagine evocata da Eldredge: essi cercano alcuni patterns ricorrenti all'interno di una molteplicità di sentieri evolutivi interconnessi le cui traiettorie appaiono fortemente imprevedibili. Il mestiere del paleontologo non è più quello di forzare i sempre più recalcitranti dati empirici in una mappa concettuale precostituita, sia essa il gradualismo progressionista o il riduzionismo genetico. Non ha più il compito di colonizzare la fragile disciplina paleontologica con i paradigmi forti della biologia molecolare. Di fronte all'esplosione incontrollata di evidenze empiriche incoerenti, non tenta una nuova sintesi, ma va a caccia di connessioni, di metafore nuove, di strutture che permettano, grazie ad una pluralità di patterns esplicativi, una comprensione più realistica delle trasformazioni evolutive che hanno condotto fino a noi.

In questa nuova opera, apparsa negli Stati Uniti nel 1999, Eldredge tenta un passo ulteriore. Una dimensione comune sembra infatti avvicinare da alcuni anni discipline scientifiche molto diverse fra loro, tradizionalmente separate dalla demarcazione fra *scienze hard* e *scienze soft*: la dimensione intrinsecamente evolutiva e storica dei sistemi fatti oggetto di studio, siano essi sistemi fisici, sistemi biologici, sistemi culturali. Oggi la cosmologia è una scienza evolutiva, ma lo sono sempre più anche la fisica e la chimica. La geologia, grazie alla teoria della tettonica a placche, è diventata da alcuni decenni un'importante disciplina evoluzionistica e si affianca alla biologia e all'ecologia nella ricostruzione della storia naturale della vita sul pianeta. A partire da questa considerazione, Eldredge propone qui una visione ampia e ambiziosa dei processi evolutivi, una visione che getta un ponte fecondo fra lo studio del mondo inanimato e lo studio del mondo vivente.

La sua nuova ipotesi, che si avvale anche dell'appassionata conoscenza di alcuni fra i più complessi e minacciati ecosistemi terrestri, è che nelle più diverse discipline impegnate nello studio della storia stia emergendo una comune sensibilità per patterns esplicativi di tipo evolutivo, cioè per l'emergenza di strutture, di configurazioni ordinate, di schemi di regolarità "simili a leggi" (*lawlike*) a partire dai quali l'evoluzione traccia poi i suoi percorsi contingenti e unici. Alcuni di questi schemi evolutivi, come quello della deriva dei continenti di Alfred Wegener, furono a lungo misconosciuti e rifiutati nonostante l'accumulo di evidenze empiriche. I fisici rintracciano oggi questi schemi profondi nell'evoluzione subatomica, i cosmologi nelle tappe della formazione dell'universo, i geologi nei movimenti della crosta terrestre che alterano le correnti oceaniche e modificano il clima, gli ecologi li ritrovano negli schemi di coevoluzione fra le specie e le loro nicchie ambientali, i biologi li scoprono costantemente nelle dinamiche di speciazione ed estinzione, gli studiosi di sistemi caotici vedono emergere strutture ordinate da interazioni apparentemente casuali, persino gli storici della scienza ritrovano nell'avventura collettiva della conoscenza alcune regolarità "evolutive".

Come suggeriscono i più recenti risultati nello studio e nella simulazione dei sistemi complessi, alcune strutture profonde del cambiamento sembrano emergere da campi di ricerca estremamente diversificati. Eldredge è favorevole a questa generalizzazione della teoria evoluzionistica, anche all'ambito dell'evoluzione culturale e tecnologica (Eldredge, Grene, 1992; Eldredge, 2001b), purché si intendano tali strutture ricorrenti

come vincoli che aprono possibilità sempre nuove, e non come leggi prescrittive e universali. Altri autori ipotizzano, altresì, l'esistenza di vere e proprie "leggi della complessità" che attraversano trasversalmente i tradizionali ambiti disciplinari (Kauffman, 2000). Ma quali sono queste leggi? Davvero stiamo per svelare il segreto ultimo di tutti i processi evolutivi?

Eldredge, in questo libro, offre a tali domande intriganti una risposta inedita, esplorando in particolare le connessioni tra le modalità di funzionamento e di evoluzione dei sistemi biologici e dei sistemi fisici. Secondo l'Autore, la natura di questi legami è così forte e radicata nel tempo da modificare profondamente la nostra immagine dell'evoluzione della vita sul pianeta. La sua ipotesi si regge sulla constatazione che la distinzione fra la dimensione economica, materiale, fisica ed ecologica dei processi evolutivi (la storia della "materia in movimento" e del trasferimento di energia) e la dimensione genetico-molecolare della trasmissione di informazione biologica di generazione in generazione sbiadisce sempre più: emerge piuttosto un tessuto ad altissima interconnessione fra tutte le dimensioni, fisiche, ecologiche e biologiche, dell'evoluzione della vita e del pianeta. Senza perturbazioni e risonanze a largo raggio non è possibile alcuna evoluzione.

La gerarchia "economica" dell'evoluzione, proposta da Eldredge alla metà degli anni ottanta, viene ora estesa a tutti i processi geologici e fisici del pianeta, ma anche ai processi cosmologici che ne hanno influenzato talvolta il corso a causa dell'impatto sulla Terra di asteroidi o di frammenti di cometa. Si deve procedere, suggerisce qui Eldredge, verso una "meta-teoria" che mostri finalmente come l'evoluzione biologica su media e piccola scala sia mossa dalle stesse forze, dagli stessi patterns, cioè dagli stessi schemi storici ripetuti, che hanno plasmato la geologia e l'ecologia del nostro pianeta su larga scala: la stabilità, gli equilibri punteggiati, la successione di specie, l'*habitat tracking*, l'alternanza di periodi di estinzione di massa e di periodi di esplosione della biodiversità, e così via. Ben lungi dall'essere determinata soltanto dai "geni egoisti" e dall'elaborazione dell'informazione in essi contenuta, l'evoluzione naturale è dunque guidata da patterns ricorrenti che sono il frutto dell'interazione fra molteplici livelli di cambiamento, dal microlivello genetico fino al macrolivello geologico. La "logica" dell'evoluzione diventa una "ecologia" dell'evoluzione.

Ripercorrendo alcuni episodi cruciali della storia della biologia evoluzionistica moderna letti attraverso il susseguirsi dei loro patterns comuni, Eldredge esplora i meccanismi dell'evoluzione su grande scala del pianeta confrontandoli con i meccanismi dell'evoluzione su scala ecologica e biologica, completando così la costruzione della sua teoria naturalistica e pluralistica dell'evoluzione cominciata nel 1972 con la teoria degli equilibri punteggiati. I processi evolutivi avvengono sempre all'interno di un contesto ecologico e fisico, sono processi intrinsecamente co-evolutivi e costruttivi. La vita emerge da una complessa architettura di gerarchie incrociate di livelli: la gerarchia genealogica della riproduzione; la gerarchia economica di sopravvivenza e di reperimento delle risorse; la gerarchia delle strutture fisiche della crosta terrestre. L'evoluzione degli organismi che si riproducono, l'evoluzione degli ecosistemi e l'evoluzione del pianeta sono inestricabilmente intrecciate e interdipendenti: le fluttuazioni dell'una si ripercuotono proporzionalmente sull'altra, come l'acqua che oscilla in un secchio quando lo trasportiamo a mano (modello dello "sloshing bucket"). Esse costituiscono una rete funzionale integrata le cui leggi devono ancora essere pienamente riconosciute.

La teoria "estesa" dell'evoluzione che Eldredge propone in questa sua ultima fatica rappresenta uno dei contributi più avanzati alla prospettiva post-darwiniana e aggiungerà al dibattito scientifico italiano una voce dissonante nel coro

dell'ultradarwinismo e del riduzionismo genetico. Il suo tentativo di riunire il mondo fisico e il mondo biologico in una teoria pluralista dell'evoluzione ci restituisce un'immagine liberatoria della natura: ci sono più cose sotto il cielo dell'evoluzione di quante le filosofie della storia naturale abbiano mai immaginato. Ma a ben guardare, fra le pagine di Eldredge si assapora una lezione ancor più profonda e duratura, quella della grande scienza che sa comunicare se stessa con passione e chiarezza. Fra gli scaffali arrugginiti e le foto di leggendari suonatori di tromba, al quinto piano del suo museo affacciato su Central Park, Eldredge custodisce il segreto dei trilobiti, il segreto di una vita dedicata alla ricerca: sapere unire il coraggio alla dedizione, il rigore all'immaginazione.

Telmo Pievani

Riferimenti bibliografici

- Allen, T.F.H., T.B. Starr (1982), *Hierarchy. Perspectives for Ecological Complexity*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Dawkins, R. (1996), *Alla conquista del monte improbabile*, Mondadori, Milano, 1997.
- Depew, D.J. e B.H. Weber (1997), *Darwinism Evolving*, Mit Press, Cambridge (MA).
- Eldredge, N. (1985b), *Unfinished Synthesis. Biological Hierarchies and Modern Evolutionary Thought*, Columbia University Press, New York.
- Eldredge, N. (1991), *Il canarino del minatore*, Sperling & Kupfer, Milano, 1995.
- Eldredge, N. (1995a), *Dominion*, Fitzhenry & Whiteside, Markham (Canada).
- Eldredge, N. (1995b), *Ripensare Darwin*, Einaudi, Torino, 1999.
- Eldredge, N. (1998), *La vita in bilico*, Einaudi, Torino, 2000.
- Eldredge, N. (2001a), *The Triumph of Evolution (and the Failure of Creationism)*, W.H. Freeman and C., New York.
- Eldredge, N. (2001b), “Evoluzione biologica ed evoluzione culturale: esistono vere similitudini?”, in *Pluriverso*, 2-2001, Milano.
- Eldredge, N. e S.J. Gould (1972), “Gli equilibri punteggiati: un’alternativa al gradualismo filetico”, in N. Eldredge (1985), *Strutture del tempo*, Hopeful Monster, Firenze, 1991.
- Eldredge, N. e I. Tattersall (1982), *I miti dell’evoluzione umana*, Bollati Boringhieri, Torino, 1984.
- Eldredge, N. e M. Grene (1992), *Interactions. The Biological Context of Social Systems*, Columbia University Press, New York.
- Hull, D., M. Ruse, ed by (1998), *The Philosophy of Biology*, Oxford University Press, Oxford.
- Gould, S.J. (1998), *Leonardo’s Mountain of Clams and the Diet of Worms*, Harmony Books, New York.
- Gould, S.J. (2000), *The Lying Stones of Marrakech*, Harmony Books, New York.
- Kauffman, S.A. (2000), *Investigations*, Oxford University Press, Oxford-New York.
- Lewontin, R.C. (2000), *Il sogno del genoma umano e altre illusioni della scienza*, Laterza, Roma-Bari, 2002.
- Morris, R. (2001), *The Evolutionists. The Struggle for Darwin’s Soul*, W.H. Freeman and C., New York.
- Salthe, S.N. (1985), *Evolving Hierarchical Systems*, Columbia University Press, New York.
- Sober, E., D. Sloan Wilson (1999), *Unto Others*, Harvard University Press, Cambridge (MA).
- Solé, R., B. Goodwin (2000), *Signs of Life. How Complexity Pervades Biology*, Basic Books, New York.
- Somit, A., S.A. Peterson (1989), ed by, *The Dynamics of Evolution*, Cornell University Press, Ithaca (NY).
- Stanley, S.M. (1981), *L’evoluzione dell’evoluzione*, Mondadori, Milano, 1982.
- Stanley, S.M. (1996), *Children of the Ice Age*, W.H. Freeman, New York.
- Sterelny, K., P. Griffiths (1999), *Sex and Death. An Introduction to Philosophy of Biology*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Tattersall, I. (1998), *Il cammino dell’uomo*, Garzanti, Milano, 1998.
- Vrba, E.S. (1985a), ed. by, *Species and Speciation*, Transvaal Museum Monographs, Pretoria, 4.
- Vrba, E.S. (1985b), “Environment and evolution: alternative causes of the temporal distribution of evolutionary events”, *S. Afr. J. Sci.*, 81:229-236.