

NEL CANTIERE APERTO DELLA BIOLOGIA

CARLO CIROTTO

In: *Vita e Pensiero*, 5 (2009) pp. 101 - 107

Sul finire dell'Ottocento il modo di far biologia aveva già subito cospicue specializzazioni tanto che, secondo Edmund Wilson (*Aims and method of study in natural history*, «Science» XIII, 314, pp. 14-23) erano ben tre le famiglie di biologi presenti sulla scena. C'era, prima di tutto, la famiglia detta spiritosamente dei «cacciatori di cimici» (*bug-hunters*), quella cioè degli studiosi interessati ai viventi in quanto realtà unitarie, in continua interazione con il proprio ambiente. C'era poi la famiglia degli «affettatori di vermi» (*worm-slicers*), studiosi classici di morfologia che, armati di bisturi, microtomo e microscopio tagliavano, sezionavano ed osservavano prescindendo dal fatto che l'organismo fosse ormai morto. Infine c'era la famiglia degli «sbattitori di uova» (*egg-shakers*), dei biologi, cioè, che si servivano delle strumentazioni teoriche e sperimentali della fisica e della chimica, demolendo le architetture complesse della vita (le uova, appunto) per isolare e studiare le singole parti: atomi, molecole o complessi pluri-molecolari.

Con le loro ricerche, le tre famiglie gettavano le basi di quella che sarebbe divenuta la grande biologia del 20° secolo, ma lo facevano percorrendo strade rigorosamente separate, che neanche i portentosi progressi realizzati dalla genetica nei primi anni del Novecento riuscirono ad unificare. Lo scollamento più evidente riguardava la dimensione sperimentale della cosiddetta *neobiologia* - intesa come biologia funzionale, genetica, cellulare, biochimica - e la prospettiva diacronica della paleontologia e dell'ecologia, che era allora ai suoi promettenti esordi. Anche all'interno della stessa *neobiologia* sembravano scarseggiare campi comuni d'indagine. E' significativo quanto scrisse a tal proposito Julian Huxley (*Evolution: the modern synthesis*, London 1942, p. 26) qualche decennio dopo Wilson: «... un insieme di sub-scienze semi-indipendenti e largamente contraddittorie fra loro; i fatti del mendelismo sembravano contraddire i fatti della paleontologia, le teorie dei mutazionisti non quadravano con le vedute weismanniane dell'adattamento, le scoperte dell'embriologia sperimentale sembravano contraddire le classiche teorie ricapitolative dello sviluppo». Aggravava questa triste situazione una diffusa incapacità di comunicare, dovuta al reciproco disinteresse oltre che alla diversità ed incommensurabilità dei rispettivi linguaggi.

La biologia oggi

Da più parti si ripete il ritornello che la biologia sarà per il 21° secolo ciò che la fisica è stata per il 20°, punto focale di fondamentali interessi scientifici e protagonista indiscussa di sviluppi carichi di aspettative. Lasciando simili, impegnative affermazioni a chi ha il dono della preveggenza, non si può tuttavia negare che la biologia eserciti oggi una tale influenza sul comune sentire da sembrare una plausibile candidata a ricoprire, a breve, il ruolo di regina delle scienze. La spettacolarità dei suoi progressi, infatti, l'hanno resa familiare anche alle menti più refrattarie. La conoscenza sempre più profonda della materia vivente e il contemporaneo sviluppo di potenti tecnologie hanno permesso di intervenire sull'architettura cellulare e il patrimonio genetico di microbi, piante ed animali, rendendo possibile una loro modificazione programmata e persino la produzione di organismi mai esistiti in natura. La crescente padronanza dei meccanismi dello sviluppo embrionale, inoltre, ha consentito interventi sui processi differenziativi fin dai primissimi stadi della vita individuale, facendo con ciò intravedere la possibilità di cure radicali per le più diverse patologie genetiche e degenerative. Risultati altrettanto significativi si sono registrati in quegli ambiti della biologia interessati al comportamento dei singoli e delle popolazioni, e alle loro relazioni con l'ambiente. La speranza di poter risolvere entro tempi non biblici i problemi legati agli squilibri ambientali e all'inquinamento poggia anche sulla consapevolezza del contributo non secondario che la biologia è in grado di fornire.

Eppure, nonostante gli indubitabili, straordinari risultati conseguiti in più di un secolo di ininterrotto progresso scientifico, il panorama attuale degli studi biologici non è poi così diverso da quello descritto da Wilson. Le tre famiglie ottocentesche di biologi sono ancora ben distinguibili nel calderone della scienza ribollente di attività. Hanno magari cambiato nome; quella che allora era detta *neobiologia* oggi la si chiama *biologia* tout court, facendo intendere l'importanza primaria che il complesso di conoscenze a livello molecolare, genetico, cellulare riveste nello sviluppo della disciplina. Una famiglia più sparuta di biologi continua a dedicarsi allo studio degli aspetti morfologici degli organismi sia microscopici che macroscopici, potendo contare su strumenti di osservazione sempre più sofisticati ed efficienti. E c'è, infine, un terzo gruppo di biologi - etologi, ecologi ecc. - in continua espansione numerica e in possesso di competenze sempre più profonde, che si dedica allo studio delle relazioni organismo - ambiente. Anche questa tipologia di studiosi è ben nota al grande pubblico per via di problemi particolarmente sentiti e dibattuti: la necessità di proteggere gli equilibri naturali, di assicurare la sopravvivenza alle specie a più alto rischio di estinzione e, almeno sul lungo periodo, di aiutare l'umanità ad assumersi l'onere non banale di conservare la vita sulla Terra.

Si tratta, evidentemente, di altrettante specializzazioni dell'unica scienza biologica. Tutte le scienze ne sono ricche, anche quelle assai più *dure*, come la fisica e la chimica dove le specializzazioni sono addirittura considerate come i presupposti necessari di ogni avanzamento di conoscenza. Le novità più significative infatti provengono quasi sempre da gruppi di ricerca in possesso di alti gradi di specializzazione. C'è però una differenza di non poco conto tra ciò che accade in fisica e in chimica e quanto di fatto avviene in biologia. Nella fisica e nella chimica le conoscenze specialistiche sono incluse, come altrettanti particolari, in quadri generali ben delineati in cui non è difficile identificare gli elementi che fungono da ponte tra i nuclei specialistici. Ciò si deve, evidentemente, al fatto che il panorama di queste materie, pur variegato nei particolari, possiede un'unità di fondo che consente agli esperti di ciascun campo di rapportarsi efficacemente con gli altri.

Non si può dire la stessa cosa per i biologi. La comunicazione tra le loro diverse famiglie continua ad essere problematica. Il livello di difficoltà è forse diminuito rispetto al passato ottocentesco ma non si può dire che sia stato azzerato. Non si tratta, evidentemente, di semplice difficoltà di linguaggio o, più banalmente, di pigrizia comunicativa. Il motivo è ben più profondo ed intrigante. Manca ancora un elemento fondamentale nel disegno unitario: quello che renda ragione della stabilità della struttura vivente e della sua particolare configurazione complessa. A tutt'oggi, infatti, l'unico orizzonte teorico unificante disponibile è costituito dalle teorie evolutive che però si collocano nella prospettiva storica del divenire della vita sulla Terra e sono difficili da rapportare a ciò che è noto della struttura e del funzionamento degli organismi.

E' a questo livello che vanno ricercate, a mio parere, le motivazioni della difficoltà di integrazione tra i vari rami del sapere biologico ed è questo l'aspetto che intendo approfondire, ritenendolo il capitolo più significativo, oltre che il più stimolante, nell'attuale panorama delle scienze della vita.

Le storie e la Storia

Che differenza c'è tra la produzione di una qualsiasi molecola e quella di un organismo vivente, inteso come complesso ordinato di molecole? Ad esempio, in che cosa differisce la produzione di una molecola d'acqua da quella di una cellula batterica? La risposta, in linea teorica, non è difficile. Per formare l'acqua, l'idrogeno e l'ossigeno devono essere messi nelle condizioni di temperatura e di pressione tali da favorire la reazione. Non è necessaria nessuna informazione supplementare per far assumere alle molecole d'acqua neo-formate la loro specifica configurazione spaziale. Detto in altri termini, le molecole nuove non hanno bisogno di copiare da quelle preesistenti la loro forma ma la assumono in maniera automatica, obbligate a ciò dalle leggi della chimica.

La produzione della cellula batterica, invece, non ha soltanto bisogno dei materiali con cui formarsi, ma deve ricevere informazioni sul modo di metterli insieme e lo fa copiando la struttura del suo diretto progenitore: il batterio che lo genera riproducendosi. Molecola e batterio, poi, una volta formati, per continuare ad esistere nel tempo devono trovarsi in condizioni ambientali che ne consentano la sopravvivenza.

In pratica, allora, l'esistenza di una molecola d'acqua dipende dal verificarsi di due tipi di condizioni: quelle che hanno determinato la sua *formazione* e quelle che hanno assicurato la sua *sopravvivenza*. Per l'esistenza di un batterio, invece, si deve essere verificata una terza condizione: la presenza di un batterio preesistente da copiare. Ma l'esistenza del batterio progenitore presuppone l'esistenza di un altro batterio ancor più vecchio e così indietro nel tempo fino agli oscuri primi passi della vita avvenuti sulla Terra più di tre miliardi di anni fa.

Il *fatto riproduttivo* è la principale fonte delle differenze che esistono tra il mondo inanimato e mondo della vita. Mentre nel primo ogni individuo è una storia a se stante nel senso che non richiede la preventiva esistenza di altre realtà identiche, nel mondo della vita l'esistenza di ogni individuo richiede che esista un altro che lo generi. Mentre, allora, le realtà inanimate non sono che singole *storie* indipendenti di esseri che si formano, permangono nel tempo e vengono distrutti quando le condizioni di sopravvivenza cessano di esistere, gli esseri viventi fanno concretamente parte di un'unica *Storia* (con l'iniziale maiuscola) che, iniziata – non sappiamo come – poco tempo dopo la formazione del nostro pianeta, si è amplificata e diversificata, ramificandosi a dismisura, fino a produrre l'attuale biosfera. Le storie puntiformi dei singoli individui si uniscono così a formare l'unica *Storia* della vita nel cui grembo sbocciano cose nuove, avvengono meravigliosi adattamenti e sorgono imprevedibili complessità. E' l'*evoluzione* della vita.

Evoluzione

Tutti sanno, per esperienza diretta, che la fase più critica nel trattamento delle informazioni è la loro copiatura perché è lì che avvengono più frequentemente gli errori. Ciò è vero anche per quel tipo particolare di copiatura che ogni generazione compie sulla precedente nel momento di dare avvio alla propria vita. E' fatale che, anche in questo caso, avvengano errori che si traducono, poi, in cambiamenti delle caratteristiche della progenie. Nella maggior parte dei casi gli errori portano ad un peggioramento delle condizioni di vita, ma c'è anche una qualche possibilità che gli errori di copiatura producano dei miglioramenti. Nel primo caso, allora, la conseguenza sarà un complessivo deterioramento della qualità della vita con un altrettanto probabile abbassamento della capacità riproduttiva; nel secondo caso, la vita dei fortunati

possessori della variazione migliorativa sarà di qualità superiore e ne risulterà probabilmente avvantaggiata anche la capacità riproduttiva. In questo modo, generazione dopo generazione, gli individui portatori delle variazioni migliorative si faranno strada, rimpiazzando i possessori delle vecchie soluzioni. E' questo, scandalosamente semplificato, il meccanismo proposto dalla teoria evolutiva più diffusamente condivisa, quella *neodarwiniana*, per spiegare la varietà degli esseri viventi e il loro adattamento ai più diversi habitat; si basa sulle variazioni casuali (gli errori di copiatura) e la selezione naturale (la sopravvivenza del più adatto).

Evo – devo

Poiché la vita sulla Terra è un dato di fatto, devono obbligatoriamente essersi verificate le due serie di condizioni: quelle per la *formazione* e quelle per la *sopravvivenza*. Allo studio delle seconde si dedicano le teorie evolutive che dispongono di un impianto teorico, il *neodarwinismo*, e di un'enorme quantità di dati sperimentali, provenienti dai diversi rami della biologia. Molta strada, invece, rimane da fare nella conoscenza delle condizioni di origine.

I più semplici organismi viventi sono le cellule. Secondo stime attendibili, una cellula di media grandezza è fatta da circa duecento mila miliardi di molecole, appartenenti ad alcune centinaia di migliaia di tipi diversi. Le molecole interagiscono tra di loro con modalità precise, che variano nel tempo secondo schemi ripetitivi. Conoscere le condizioni di formazione delle cellule equivale perciò a render ragione della loro architettura molecolare e della particolare forma di stabilità che ne consegue. E, poiché le condizioni di formazione di ogni organismo presuppongono l'esistenza di una lunghissima serie di operazioni di copiatura di altrettanti organismi fino a giungere al capostipite, conoscere le condizioni di formazione delle cellule implica la conoscenza degli eventi che hanno prodotto il primo essere vivente. Ci si imbatte così nel problema gigantesco delle *origini della vita* ed è superfluo rimarcare il buio quasi completo che grava su di esso. Le poche ipotesi disponibili assomigliano a flebili fiammelle che tentano, finora invano, di fuggire le tenebre.

Stando così le cose, non desta meraviglia che si cerchi di risolvere il problema delle origini facendo leva sulla seconda serie di condizioni che devono essersi verificate, quelle per la sopravvivenza. Sono infatti relativamente più conosciute; sono i meccanismi stessi dell'evoluzione. E' questa la posizione di Darwin e dei neodarwinisti più rigorosi i quali restringono alla sola selezione naturale il ruolo guida dell'evoluzione. Strumento chiave di tale operazione è l'ipotesi che le variazioni dei viventi siano piccole, continue e dirette in ogni direzione, con stile assolutamente *casuale* (e perciò inconoscibile). In tal modo, l'intelligibilità del processo evolutivo risulta totalmente a

carico della selezione naturale, che è intelligibile perché non opera in modo casuale ma secondo i criteri dell'adattamento.

La conseguenza di un tale procedimento logico è che tutte le caratteristiche degli esseri viventi sono frutto esclusivo della selezione naturale. Le conoscenze sempre più approfondite della genetica molecolare e della biologia dello sviluppo, però, mettono in evidenza l'esistenza di strutture e di meccanismi che è alquanto difficile, se non impossibile, attribuire alla selezione.

Si fa strada la convinzione che per spiegare le proprietà degli esseri viventi si debba tener conto, sì della selezione naturale, ma anche delle caratteristiche strutturali e funzionali degli organismi che cambiano. Questo nuovo approccio ha generato un interessante filone di indagine chiamato familiarmente *Evo – devo*. Il nome deriva dalle prime lettere di *Evolution* e *Development* ed esprime bene il programma di ricerca perseguito: evidenziare gli *ambiti di pertinenza* della teoria evolutiva selezionista e quelli per i quali la spiegazione più convincente è invece suggerita dalla biologia dello sviluppo.

Si tratta di un nuovo canale attraverso il quale due famiglie di biologi, fino a ieri rigorosamente separate, iniziano a comunicare. L'auspicio è che tale interazione apra nuove vie all'indagine biologica e offra soluzioni a problemi finora irrisolti.

CHE COS'È LA VITA?

CARLO CIROTTO

Conferenza tenuta a Roma, Domus Mariae, il 6-2-2005

Permettetemi di iniziare invitando ciascuno di voi a fare un'operazione di demolizione, a cancellare, cioè, dalla propria mente ogni modello metaforico di vita che eventualmente fosse già presente. Vi invito soprattutto ad usare una speciale attenzione nel toglierne di mezzo uno, tanto comune quanto fuorviante, quello della macchina. L'essere vivente, infatti, non è una macchina. Una macchina può essere controllata, mentre un sistema vivente può essere soltanto stimolato.

Dopo aver demolito, dedichiamoci ora alla costruzione. Vediamo se nell'ambito della nostra esperienza quotidiana esista un qualche evento capace di darci un'idea intuitiva di vita, se ci sia una qualche immagine che, più di ogni altra, possa essere accolta come metafora della vita ed abbia quindi titolo a sostituire nella nostra mente le immagini appena cancellate. Tra tutte le esperienze che ognuno di noi ha modo di fare quotidianamente, una in particolare può essere adottata come buona metafora dell'essere vivente. Si tratta del gorgo d'acqua.

Quando togliamo il tappo alla vasca da bagno piena d'acqua, assistiamo spesso al formarsi di un mulinello, un gorgo appunto, che costringe l'acqua in uscita da assumere un moto rotatorio vorticoso. Le sue caratteristiche di forma e di dimensione dipendono da alcuni semplici parametri come l'altezza dell'acqua, la forma del recipiente, il diametro del foro di uscita ecc.

Il mulinello è, nel nostro repertorio esperienziale, l'immagine probabilmente più adatta a descrivere la realtà della vita. La ragione sta nel tipo di stabilità del tutto particolare di questa struttura che si fonda non sulla conservazione dei materiali da cui è costituita, ma esattamente sul suo contrario, sul suo continuo ricambio. Provate ad immaginare le molecole d'acqua coinvolte nel vortice. Esse fluiscono e vengono sostituite incessantemente. Non c'è niente di fisso nel mulinello se non la sua struttura generale, la forma che assume nello spazio, essa stessa generata dallo stato di moto del materiale che scorre. Fermare le molecole, richiudendo ad esempio la vasca, equivale a far scomparire il mulinello.

La vita assomiglia da vicino al gorgo perché anch'essa non è una struttura fissa, data nei suoi costituenti fondamentali una volta per tutte, ma è altamente dinamica ed è questo stato di continuo ricambio a determinare le caratteristiche fondamentali dell'essere vivente. Si calcola che nel giro di una ventina di anni ognuno di noi

sostituisca totalmente gli atomi del proprio corpo! Il fatto che abbiamo l'abitudine di mangiare, di assimilare i prodotti della digestione e di espellere i rifiuti dimostra concretamente che materia ed energia fluiscono continuamente in noi e che la nostra funzione fondamentale è quella di organizzarli in modo da tenere in vita, costruendolo, questo 'strano mulinello' che è il nostro organismo.

Il gorgo, ovviamente, è un'immagine, una metafora che ci aiuta a capire. Ci sono, in realtà, molte e grandi differenze tra il gorgo e l'essere vivente. La più eclatante è la complessità del sistema. Un organismo è infinitamente più complesso di un gorgo. Lo si vede, oltre che da mille altre cose, anche dal fatto che posso far nascere quest'ultimo tutte le volte che voglio: basta che metta in atto le dovute condizioni chimico-fisiche. La vita, al contrario, è una struttura dinamica di estrema complessità e non succede mai che si crei *ex novo*. Ogni forma di vita, per poter iniziare, ha bisogno di un altro essere vivente da 'ricopiare', dal quale, in altre parole, nascere.

La domanda, quindi, che ritorna come un tormentone sui mass media "Quando ha inizio la vita?" è del tutto mal posta. La vita su questa terra è iniziata, non sappiamo come, tre miliardi e mezzo di anni fa e in tutto questo tempo non ha mai smesso di esistere, come un'unica, lunga catena di cui fanno parte tutti i viventi. La vita non si origina dalla materia non vivente. La teoria della generazione spontanea, che invece lo affermava, è morta e sepolta da oltre un secolo e mezzo e il celebre aforisma di Virchow «*Omne vivum e vivo. Omnis cellula e cellula eiusdem generis*» suona come l'epitaffio della sua tomba. E' una verità di fondo, questa, che non è mai stata smentita e sta a significare che qualsiasi tipo di vita deriva da una vita che c'era già prima, che ogni cellula deriva da un'altra cellula.

Le cellule non sono soltanto 'i mattoni della vita', come sta scritto su quasi tutti i libri di biologia. Le cellule *sono* la vita, *sono* esseri viventi a tutti gli effetti e gli organismi macroscopici che vediamo ad occhio nudo e che siamo soliti considerare vivi non sono che comunità di esseri viventi molto più piccoli e notevolmente indipendenti, le cellule appunto.

Anche noi siamo comunità di cellule. Si calcola che un uomo di medie dimensioni ne contenga circa settecento mila miliardi! Siamo una straordinaria società di cellule tutte derivate da un'unica cellula iniziale, lo zigote, che a sua volta, si origina dalla fecondazione cioè dalla fusione di due cellule preesistenti, l'uovo e lo spermatozoo.

Lo zigote è una cellula estremamente specializzata ed estremamente complessa. E' a partire da questa cellula che l'organismo pluricellulare si auto-costruisce (il prefisso "auto-" indica che il processo avviene in totale autonomia). Ognuno di noi ha avuto inizio come individuo monocellulare e poi, a poco a poco, è diventato pluricellulare. Un bambino è più piccolo di un adulto non perché abbia cellule più piccole, ma perché ne

ha in numero minore. La stessa considerazione vale per un neonato, un feto, un embrione. Facendo un viaggio a ritroso nella vita di ognuno si attraversano stadi caratterizzati da un numero progressivamente minore di cellule fino a giungere allo stadio monocellulare dello zigote.

Ci si potrebbe chiedere perché fermarsi allo zigote e non proseguire, ad esempio, con le uova e gli spermatozoi. La risposta è semplice. Basta richiamare per un attimo alla memoria il nostro mulinello d'acqua. Non tutti i mulinelli sono uguali, ce ne sono di più alti e di più bassi, di più larghi e di più stretti. La loro forma e il loro movimento dipendono da parametri come la quantità dell'acqua, la forma del recipiente, il diametro del foro di uscita ecc.. Non è sufficiente il movimento delle molecole d'acqua perché nasca un mulinello. E' invece necessario che tale movimento sia indirizzato, incanalato in certe direzioni piuttosto che in altre. Le molecole d'acqua devono ricevere informazioni sul come muoversi e verso dove muoversi e le ricevono dai parametri che ho appena elencato. Solo così il gorgo avrà una forma e un comportamento propri; avrà, per così dire, una sua 'personalità'.

Anche le cellule, per indirizzare correttamente il loro dinamismo vitale, hanno bisogno di molte informazioni che sono scritte in codice sul proprio DNA. La genetica ci dice che il DNA dello zigote è profondamente diverso sia da quello dell'uovo che da quello dello spermatozoo ed è lo stesso che ritroveremo in tutte le cellule del nuovo individuo lungo l'arco completo della vita. I caratteri biologici, la 'personalità' dello zigote, insomma, sono diversi da quelli dell'uovo e dello spermatozoo. Per questo nel nostro viaggio a ritroso ci siamo fermati allo zigote e non abbiamo proseguito. L'uovo e lo spermatozoo, infatti non sono noi.

Con il progredire dell'auto-costruzione aumenta la complessità del nuovo organismo ed emergono continuamente nuove proprietà.

Ad esempio, prendete in considerazione un embrione allo stadio di otto-dieci cellule. E' assurdo ipotizzare che sia in grado di gustarsi un bel pranzetto, perché non ha bocca, né papille gustative, né apparato digerente. Sarà in grado di farlo solo in seguito, quando con il crescere si attrezzerà di bocca, papille, apparato digerente e di un buon appetito.

Ognuno di noi è nato come un individuo "semplice" (se semplice può essere definita una cellula!) e solo poco alla volta, con l'aumentare della propria complessità, si è arricchito delle proprietà che ne hanno fatto prima un feto, poi un bambino, poi un adulto. Ad esempio, le proprietà che di solito chiamiamo psichiche emergono nell'embrione solo a seguito dell'auto-costruzione del sistema nervoso.

Strettamente legata alla complessità della propria struttura, il vivente possiede un'altra caratteristica di primaria importanza: la *plasticità*, la capacità cioè di adattarsi alle mutevoli condizioni esterne ed interne.

Pensate alla straordinaria plasticità espressa dal nostro sistema nervoso. Il cervello, in particolare, considerato a ragione l'oggetto più complesso dell'universo conosciuto, ci consente di affrontare le più diverse situazioni, adattandoci o reagendo in maniera opportuna.

Il sistema nervoso non è il solo ad essere plastico. In genere tutti i sistemi costruiti 'a rete' hanno questa caratteristica. Da essa deriva la capacità che hanno tutti gli esseri viventi di assicurarsi la conservazione e la piena protezione della vita facendo ricorso a sistemi diversissimi. Ogni specie vivente, dei milioni che esistono sulla terra, segue una propria strategia in vista dell'unico fine della sopravvivenza e della riproduzione. Plasticità vuol dire anche questo.

EVOLUZIONE, CASO E PROBABILITÀ

CARLO CIROTTO

Relazione al Convegno dei Docenti Universitari Europei del 2008

Nella maggior parte dei testi di divulgazione scientifica - ma anche in quelli specialistici di approfondimento e discussione delle scienze della vita - si incontra assai spesso la parola *caso* sia per indicare l'ignoranza di un evento che cade fuori dell'ambito di competenza della scienza, sia per attribuire un'origine casuale ad eventi la cui importanza si intende ridimensionare nel quadro di un'interpretazione ideologica. Un fatto è certo: il significato che viene attribuito alla parola *caso* è tutt'altro che univoco, variando da autore ad autore in modo significativo e non per via di semplici sfumature. Spesso è utilizzato senza molti distinguo come bandiera di posizioni ideologiche che ben poco hanno a spartire con la scienza. Alcune volte lo si ritrova addirittura su titoli di libri ad indicare convincimenti esistenziali; quasi a mettere in chiaro fin dall'inizio gli scopi dell'autore.

Il *caso*, in tandem con la *necessità*, ha fatto il suo ingresso trionfale nel mondo della divulgazione scientifica con la fortunata opera di Monod: 'Il caso e la necessità. Saggio sulla filosofia naturale della biologia contemporanea', edito in Italia nel 1970 per i tipi della Mondadori. Da allora, molti sono stati i testi di divulgazione scientifica che hanno fatto riferimento a quest'opera, utilizzando il termine *caso* in modo superficiale ed acritico; assai di meno sono state, invece, le opere che hanno cercato di far luce sull'effettivo significato di tale concetto.

Lo scopo della mia comunicazione è di analizzare, per quanto possibile, il significato che la parola *caso* assume in ambito biologico, soprattutto in riferimento ai meccanismi evolutivi ipotizzati dal neodarwinismo e oggi largamente condivisi. Al termine *caso* sarà necessariamente associato quello di *probabilità*, qui intesa in senso frequentistico.

Quando si dice 'caso'

L'uso della parola *caso* non è, evidentemente, proprio del solo linguaggio scientifico, ma è largamente presente anche nel linguaggio di tutti i giorni. Non è detto, però, che nei due ambiti di utilizzo il significato sia identico. Al contrario,

come assai spesso avviene per altre parole comuni al linguaggio quotidiano e a quello scientifico, è molto probabile che abbiano una diversità semantica che deve essere chiarita per evitare spiacevoli equivoci.

Nel linguaggio comune per *caso* si intende "il fatto che ci sono avvenimenti imprevedibili i quali non sembrano obbedire ad alcuna regolarità" (Barreau). Il senso comune, legato al particolare e al concreto, registra l'assenza di regolarità, e quindi di prevedibilità, nei casi presi singolarmente e quando qualche evento appare al di fuori di ogni attesa, lo chiama casuale.

Per la scienza, non tutto ciò che il senso comune etichetta come casuale è, per ciò stesso, privo di regolarità. In primo luogo possono essere sottese leggi complesse che determinano regolarità difficili da identificare; leggi che inevitabilmente sfuggono all'occhio dell'uomo normale ma non a quello dell'uomo di scienza, abituato a scovare relazioni anche complesse con l'ausilio di armamentari teorici spesso assai sofisticati.

Questi casi rientrano, ovviamente, nella normalità della scienza deterministica galileiana.

Poniamoci però nelle condizioni estreme di un insieme di eventi tra loro indipendenti. Anche in tali eventi la scienza statistica dimostra l'esistenza di regolarità nelle frequenze con cui si verificano. Detto in altri termini, una volta individuata una tipologia di evento, la frequenza con cui si verifica - di solito espressa in termini di probabilità - ci dice quanto spesso si verificano le condizioni perché avvenga quel particolare evento in quel particolare ambiente.

Per assegnare un valore esatto a questa frequenza, la legge dei grandi numeri prevede che si debba eseguire un numero straordinariamente elevato di determinazioni. Solo in questo caso, il valore ottenuto corrisponderà esattamente al valore teorico cercato. Di solito, però, ovvie e concrete limitazioni di tempo e di disponibilità impongono di percorrere vie più brevi per giungere a questo valore. Si effettuano, allora, molteplici gruppi di determinazioni, ognuno dei quali costituito da un numero limitato, e quindi più accessibile, di interventi di misura. I risultati, posti in grafico, danno la nota curva di Gauss. La sua particolarità è quella di essere simmetrica rispetto al valore limite teorico, che può così essere facilmente calcolato.

La gaussiana si presta particolarmente bene a distinguere la componente probabilistica, prevedibile e ben determinabile, dalla componente che si potrebbe (questa sì!) definire *casuale* e che è rappresentata dall'entità delle deviazioni delle frequenze attuali dalla frequenza teorica. La simmetria della curva denota

la caratteristica fondamentale della casualità: l'uguale entità delle deviazioni a destra e a sinistra del valore medio teorico. E' come se i valori attuali, determinati sperimentalmente, oscillassero attorno alla frequenza teorica senza alcuna particolare predilezione né per i valori maggiori né per quelli minori.

All'indagine scientifica, quindi, ciò che viene considerato *casuale* dal senso comune risulta formato da due componenti: una, quella probabilistica, presenta regolarità ben identificabili e prevedibili; l'altra è invece *casuale* nel senso pieno del termine. E lo è perché dipende da cause che non conosciamo compiutamente o non conosciamo affatto come quelle determinate dall'intersezione imprevedibile di due o più catene causali indipendenti o quelle legate ad un processo la cui direzione non è determinata (come la stessa evoluzione darwiniana) o quelle risultanti da eventi possibili quando le alternative alla loro realizzazione sono tutte equiprobabili.

Probabilità e caso, che nel linguaggio quotidiano vengono generalmente confusi, sono, quindi, cose ben distinte. La probabilità è una norma ideale che si verifica concretamente sui grandi numeri. Il caso è semplicemente la divergenza non sistematica delle frequenze attuali dalle frequenze ideali, che sono le probabilità. Il caso non spiega nulla; la probabilità invece è una spiegazione.

Un caso di puro caso

Tutti gli eventi del nostro mondo, anche quelli che sembrano assolutamente deterministici, presentano un'aliquota più o meno consistente di casualità. Ciò, evidentemente, è legato in maniera diretta al grado di approssimazione delle nostre determinazioni. Più siamo esigenti in fatto di precisione, più pesano gli eventi contingenti di disturbo la cui eliminazione totale non è possibile raggiungere. Utilizzando gli accorgimenti che solo in laboratorio possono essere messi in atto, le contingenze possono essere ridotte; mai però possono essere eliminate del tutto. Rimane sempre un residuo di casualità in ogni osservazione e in ogni determinazione, anche le più scientificamente accurate.

E allora, se caso vuol dire assenza di intelligibilità, e se quote di casualità sono inesorabilmente presenti anche nelle più accurate determinazioni, ecco che un velo di dubbio sembra stendersi anche sulle più condivise acquisizioni scientifiche.

nella distribuzione gaussiana. Un corpo in possesso di moto browniano si muove nello spazio come se non avesse nessuna meta.

Un moto tanto caotico, agitazione pura che non porta da nessuna parte, può avere un significato? Ne ha uno, assolutamente peculiare, dipendente proprio dalla casualità del movimento. Dopo un congruo intervallo di tempo, possiamo essere certi che il nostro corpo in movimento browniano ha visitato tutti i punti dello spazio in cui si trova. E' sicuro che, dopo un certo tempo, il granulo di polline è passato per tutti i punti della goccia d'acqua nella quale è immerso. E' simpatico il modo con cui Ekeland esprime questa proprietà: "Si dimostra che, se si mette un lampione da qualche parte in un piano e si lascia libero un ubriaco di dedicarsi alle sue peregrinazioni sullo stesso piano, l'ubriaco finirà con l'andare ad abbracciare il lampione, poiché il moto browniano esplora tutto il piano". La frase terminale fornisce in estrema sintesi la caratteristica fondamentale del moto browniano, quella di permettere l'esplorazione di tutti i punti dello spazio in cui avviene il movimento.

Il caso nell'evoluzione

Nella teoria neodarwiniana dell'evoluzione le parole *caso* e *casualità* entrano più volte e con significati diversi. C'è la casualità che contraddistingue il verificarsi delle mutazioni; c'è la casualità intesa come disgiunzione tra gli eventi che riguardano il genotipo e quelli che riguardano il fenotipo; c'è, infine, la casualità del processo evolutivo nel suo complesso in quanto adirezionale. Ognuno di questi aspetti meriterebbe un approfondimento particolare. In questo mio intervento, però, mi limiterò a prendere in considerazione il primo aspetto, quello delle mutazioni quali fonti di variabilità del vivente.

E' noto che le mutazioni possono essere di diversa origine. Possono derivare da interazioni degli acidi nucleici con agenti fisici o chimici; possono essere il risultato di errori di replicazione del DNA ecc. In tutti i casi, comunque, la loro comparsa appare come un fenomeno essenzialmente casuale. E' probabilmente da questo fatto che derivano tutte le dichiarazioni sulla casualità dell'evento evolutivo e sulle sue conseguenze in ambito conoscitivo ed etico. Una per tutte, forse la più famosa, è quella con cui Monod chiude 'Il caso e la necessità': "L'antica alleanza è infranta: l'uomo finalmente sa di essere solo nell'immensità indifferente dell'universo da cui è emerso per caso. Il suo dovere, come il suo destino, non è scritto in nessun luogo".

Il significato del caso

Sul grado di casualità delle mutazioni è in corso un ampio dibattito sulla letteratura specializzata. Indipendentemente da questi approfondimenti, però, è fuor di dubbio che la massima parte delle mutazioni hanno il crisma della casualità. Alcune sono dovute all'intersezione di catene causali indipendenti ed assolutamente imprevedibili come le interazioni di radiazioni o di mutageni chimici con la molecola del DNA. Altre derivano da errori nella duplicazione del DNA che sono sfuggiti alla efficientissima correzione enzimatica. Altre ancora ad anomali processi cellulari. Se le cause della variabilità possono essere molteplici, il risultato, tuttavia, è una modificazione dell'assetto bio-molecolare della cellula che può avere conseguenze a livello fenotipico.

Ci troviamo di fronte ad una tipica esplorazione dello spazio delle possibilità di un organismo condotta con stile casuale. Torna qui alla mente l'esplorazione dello spazio fisico compiuta dal polline di Brown o dall'ubriaco di Ekeland. Come nello spazio fisico il moto browniano, assolutamente casuale, assicura l'esplorazione completa di tutti i punti dello spazio, così lo stile casuale delle mutazioni assicura l'esplorazione completa dello spazio delle possibilità da parte dell'organismo che muta. Occorrerà, evidentemente, del tempo perché sia completata l'esplorazione ma si può essere certi che tutte le possibilità verranno provate grazie allo stile casuale dell'esplorazione.

Caso come fonte di nuovi sistemi

L'universo che ci circonda non si presenta come un caos ma come un sistema di sistemi ordinati in possesso di una chiara organizzazione gerarchica. Per *sistema* si intende "una configurazione di elementi strutturati interagenti che danno origine a entità aventi caratteristiche, proprietà e aspetti peculiari" (Minati, 1998). I sistemi, a loro volta, vanno a porsi su diversi livelli organizzativi. Jacob esprime ciò con ammirevole chiarezza: "A ciascun livello, unità di dimensioni relativamente definite e di struttura pressoché identica si associano per formare un'unità di livello superiore. Si può chiamare 'integrone' ciascuna di tali unità formata dall'integrazione di sottounità. Un integrone si forma mediante la combinazione degli integroni appartenenti al livello immediatamente inferiore a esso e partecipa alla costituzione dell'integrone del livello successivo. Ciascun integrone presenta nuove caratteristiche e capacità, assenti ai livelli inferiori di integrazione".

Indipendentemente dal fatto che il neologismo *integrone* incontri o meno le nostre simpatie linguistiche, la visione che Jacob propone è, nel suo insieme, coerente con quanto le scienze dicono della struttura del mondo. Il termine *integrone* può essere sostituito da quello più familiare, anche se meno pregnante, di *sistema* ed allora il quadro che ne deriva è quello di una struttura gerarchica di sistemi che sono posti in relazione causale tra loro da snodi eminentemente casuali. Ed è alla casualità delle combinazioni dei vari sistemi tra loro che si deve l'esplorazione dello spazio delle possibilità ed il raggiungimento di quegli stati di stabilità che caratterizzano le strutture viventi.

Concludendo

In base a questa visione non è difficile vedere come i sistemi più funzionali al processo evolutivo, inteso nella sua globalità, siano quelli di media stabilità. Infatti, perché un sistema costituisca un tassello valido nel puzzle evolutivo, deve possedere un grado di stabilità tale da assicurare una sopravvivenza tanto lunga da permettere un'esplorazione significativa dello spazio delle possibilità. Al tempo stesso, però, il sistema non deve essere troppo stabile, altrimenti bloccherebbe gli sviluppi futuri, impedendo le ulteriori ricombinazioni e, in definitiva, rendendo indisponibili i materiali necessari per le successive esplorazioni dello spazio delle possibilità.

In questo quadro evolutivo trovano posto e giustificazione sia la casualità, in quanto irrinunciabile stile dell'esplorazione che assicura la scansione completa dello spazio delle possibilità, sia la probabilità che permette di calcolare la frequenza degli stati di stabilità. Questi meccanismi, casuali e probabilistici insieme, creano la materia su cui successivamente agisce la selezione naturale, la quale è nuovamente un meccanismo probabilistico il cui grado di incidenza dipende sia dal tipo di ambiente selezionante sia dalla particolare correlazione fra questo e il fenotipo selezionando.

La questione nodale, che resta tuttora senza risposta, è l'identificazione delle leggi di stabilità dei viventi. C'è chi risolve alla radice il problema negando, tout court, l'esistenza di tali leggi. C'è chi, facendo leva sulle moderne acquisizioni della teoria del caos, tenta quanto meno di dare un'impostazione corretta al problema.

Ho la sensazione che siamo ancora lontani dalla meta e nel percorso di avvicinamento non giova la posizione di coloro che continuano a porre l'accento esclusivamente sugli aspetti selettivi

SCALE, ALBERI, CESPUGLI

Immagini di progresso nella conoscenza biologica

CARLO CIROTTO

Relazione al Congresso SEFIR del 2015

Costruire fantasmi

Fino a non molti anni fa, in molti licei, quando venivano affrontati argomenti particolarmente impegnativi o semplicemente nuovi non era raro sentire i professori raccomandare ai propri alunni: «Fatevi il fantasma!». Attraverso quei fantasmi, sottolineavano, passava la comprensione di tutto, anche degli argomenti più astratti, e si sforzavano, con schemi, modellini e schizzi alla lavagna, di aiutare i giovani allievi a costruire fantasmi. Evidentemente, era già stato spiegato che non si trattava di immaginare ballonzolanti lenzuola bianche con buchi al posto degli occhi ma di costruirsi immagini mentali degli argomenti che via via venivano affrontati. Credo sia inutile dire quanto fosse generalmente scarsa la considerazione che gli studenti riservavano a quegli sforzi meritori. Spesso li consideravano manifestazioni un po' demodé, altre volte li utilizzavano come spunto per battute spiritose. Da allora sono passati molti anni e solo ora, lo confesso, riesco a comprendere la validità metodologica di quell'insegnamento e ad apprezzare la saggezza e la pazienza di quei docenti che si misuravano quotidianamente con ragazzi immaturi e scanzonati. Ho imparato a mie spese che non si riesce a possedere veramente nessun argomento se prima non ci si è costruiti una sua immagine. E non importa che sia completa fin dall'origine. È auspicabile, anzi, il contrario perché solo in questo modo essa diventa stimolo per successivi approfondimenti e spinta ad un crescente coinvolgimento personale.

Questo contributo avrà raggiunto il suo scopo se sarà riuscito ad accendere nel lettore il desiderio di costruire un proprio, personale fantasma della meravigliosa comunità di esseri viventi che ci circonda e che, forse, impigriti dall'abitudine, non ci siamo mai fermati a contemplare con la dovuta attenzione. Anche in questo caso è utile e appassionante costruirsi un'immagine mentale e anche in questo caso la si dovrà costruire un po' alla volta passando attraverso fantasmi via via più definiti.

A bordo dell'astronave

Siamo tutti invitati, allora, a salire a bordo di un'astronave fantastica per una trasvolata attraverso lo spazio e il tempo secondo lo stile di Harry Potter. In men che non si dica raggiungiamo una magica altezza che ci permette di osservare, uniti entro un unico

orizzonte, tutti gli organismi viventi che popolano attualmente il pianeta, da quelli giganteschi – le balene, gli elefanti, le sequoie – a quelli tanto piccoli – i microbi – da essere visibili solo al microscopio.

Una volta raggiunta questa altezza di crociera, tenendo sempre presente il panorama pullulante di vita, iniziamo a viaggiare anche nel tempo andando a ritroso nella storia della Terra per migliaia, milioni e miliardi di anni. L'insieme di tutti i viventi assume, allora, l'aspetto di un unico, immenso fiume che, scorrendo attraverso gli eoni del passato, invade ogni anfratto più nascosto della crosta terrestre fiorendo in una meravigliosa varietà di forme.

L'altezza di crociera e la velocità che siamo costretti a mantenere non ci permettono, purtroppo, di apprezzare i particolari del fiume. Se però, di tanto in tanto, incuriositi, rallentiamo la corsa e ci abbassiamo di quota, riusciamo a distinguere i singoli componenti: sono gli organismi viventi che come tante scintille compaiono, contribuiscono per un breve istante al fluire della fiumana per scomparire definitivamente subito dopo. Nella corsa, il posto di ognuno è preso subito da altri la cui vita continua ad essere segnata da altrettanta fugacità.

Occorrerà un'osservazione ancor più attenta per scoprire che la realtà è diversa da quella che appare al primo colpo d'occhio: ogni organismo non è un'entità autonoma ma è profondamente legato a tutti gli altri. Nella sua vita è dipendente da quelli che lo hanno preceduto ed è, al tempo stesso, indispensabile a quelli che lo seguiranno. Ognuno infatti riceve l'esistenza da coloro che, nello scorrere del fiume, sono venuti prima e la dona, arricchita della propria esperienza, a quelli che seguono. È il meraviglioso legame della generazione che rende ogni individuo solidale tanto con gli antenati quanto con i posteri.

Queste regole valgono, certo, per gli organismi macroscopici, visibili a occhio nudo, ma sono valide anche per il mondo sconfinato delle forme di vita microscopiche, altrettanto affascinante e immensamente più ricco. Qualche numero potrà giustificare gli aggettivi appena scelti. Un cucchiaino di terreno di buona qualità (la terra scura dei nostri orti, ricca di humus) può ospitare fino a 10.000 miliardi di batteri, appartenenti a 10 milioni di specie diverse. La massa totale dei microrganismi terrestri, poi, tocca i 100.000 miliardi di tonnellate, superando di gran lunga quella di tutte le forme visibili di vita messe insieme.

Di questo mondo stiamo parlando, di questa realtà grandiosa che si dipana nel tempo, arricchendosi continuamente di «infinite forme bellissime», per dirla con Darwin¹. La Terra è veramente la nostra casa e tutte le specie che vi abitano sono la nostra famiglia.

Siamo ormai avvezzi a chiamare *biodiversità* questa traboccante ricchezza. Stime attendibili dicono che sono circa 14 milioni le specie animali e vegetali che popolano

¹ Con queste parole, nel 1859, Charles Darwin concludeva *l'Origine delle specie*.

attualmente il pianeta mentre 100 milioni sono quelle che lo hanno popolato in passato e sono ormai estinte. Di quelle viventi, alcune scompaiono per normale avvicendamento (non solo gli individui muoiono per lasciare posto ad altri ma anche le specie). Si calcola che questa normale estinzione interessi da 10 a 30 specie all'anno.

Tale numero, purtroppo, è solo una stima teorica perché, a causa dell'insensatezza umana, le specie che di fatto scompaiono definitivamente sono enormemente più numerose. Il loro numero viene stimato intorno a 27.000/anno. Ciò vuol dire che scompaiono definitivamente 3 specie ogni ora o, se si preferisce, 1 specie ogni 20 minuti².

Catalogare, catalogare

Di fronte a questa sconfinata ricchezza di vita, la prima operazione che la mente umana compie, spinta dal suo naturale desiderio di conoscenza, è di semplificarne, per quanto possibile, la complessità riunendo in gruppi gli organismi che si somigliano. È intuitivo, infatti, che ogni simile possa essere spiegato in modo simile. L'opera di catalogazione è stata, probabilmente, una delle primissime risposte all'esigenza di conoscere la complessità del mondo.

A volerne identificare nel tempo le prime manifestazioni si rimane sconcertati perché si scopre che tutti i viventi la compiono. Certo, lo fanno in tanti modi diversi quanti sono i livelli di complessità e di sviluppo evolutivo raggiunto, ma tutti, dai più semplici ai più complessi, sanno interagire con il proprio ambiente percependone i segnali e rispondendo ad essi in maniera adeguata. I segnali positivi hanno il significato di opportunità da non perdere mentre quelli negativi sono indici di pericoli da evitare.

Può esserne un esempio la scelta meticolosa delle erbe da brucare messa in atto da molti erbivori. La necessità di nutrirsi senza incorrere in avvelenamenti ha fatto sì che, nel corso dell'evoluzione, venisse affinata la capacità di selezionare specie di erbe riconoscendo quelle velenose come assolutamente da evitare e quelle commestibili da cercare e mangiare in tranquillità. Ovviamente, tali capacità di scelta sono da attribuire per lo più – ma non sempre! – a tendenze acquisite per via genetica piuttosto che a istruzioni tramandate per imitazione.

Contro questa osservazione può essere mossa l'obiezione che gli erbivori sono vertebrati evoluti, possessori di un sistema nervoso complesso e di uno psichismo raffinato, simile, per molti aspetti, al nostro. Nessuna meraviglia, quindi, che mostrino una tendenza a catalogare la realtà sensibile in una maniera analoga alla nostra. Che dire, però, del mondo vegetale, nel quale l'assenza di un sistema nervoso rende quantomeno improprio parlare di psiche; e

² N. Eldredge, *La vita in bilico. Il pianeta Terra sull'orlo dell'estinzione*, Einaudi, Torino 2000, p. 241.

che dire dell'universo sconfinato dei monocellulari? In che senso una cellula può catalogare le realtà esterne?

Già da parecchio tempo i biologi hanno scoperto l'esistenza di numerosi meccanismi che portano ad un comportamento ben preciso: tanto i vegetali quanto i monocellulari sono reattivi in senso positivo ai segnali emessi da oggetti utili alla propria sopravvivenza mentre attuano strategie di difesa in risposta a segnali di pericolo³. I segnali meglio conosciuti sono quelli di natura chimica: atomi, ioni e molecole. Ne è stato saggiato un gran numero e i risultati hanno sempre confermato la capacità delle cellule di distinguere segnale da segnale e cioè specie chimica da specie chimica.

Anche le testimonianze più antiche del genere *Homo* danno indicazioni chiare sulla sua capacità di distinguere oggetti più o meno utili alla sopravvivenza.

I paleoantropologi che per primi attribuirono al genere *Homo* alcuni crani fossili, vecchi di circa due milioni di anni, rinvenuti nella gola di Olduvai (Tanzania), lo fecero perché furono convinti non solo dalla loro forma e dal loro volume ma anche dal fatto che si trovassero in associazione con manufatti di pietra (*chopper*) ottenuti scheggiando ciottoli di fiume con colpi ben assestati di altre pietre⁴. Quegli antichi antenati dimostravano, così, di essere capaci di costruire strumenti utilizzandone altri. Cosa, questa, che nessun animale, neanche le scimmie antropomorfe, ha mai dimostrato di saper fare. Fu anche per questo motivo che si attribuì il genere *Homo* e la specie *H. habilis* a quei fossili di Olduvai⁵.

I manufatti che erano serviti all'attribuzione di quei crani al genere *Homo* forniscono altre informazioni che ci riportano al cuore del nostro problema: la capacità di *H. habilis* di catalogare le cose. Per fabbricare i loro *chopper*, quei primi abitanti di Olduvai non si servivano di pietre qualsiasi. Non tutti i tipi di pietra, infatti, si prestano ad essere scheggiati formando bordi taglienti. E questo, i nostri antenati africani devono averlo intuito se andavano a rifornirsi di pezzi levigati di selce sul letto di un antico fiume distante una ventina di chilometri dal sito abitativo. *H. habilis*, insomma, sceglieva i ciottoli fatti di quel particolare minerale (silicati) che meglio si prestava alla lavorazione e all'ottenimento di un prodotto di qualità⁶.

È corretto avanzare l'ipotesi che *H. habilis*, così come si dimostrava in grado di distinguere le specie minerali, fosse anche capace di distinguere – e, almeno intuitivamente, catalogare – tipi di animali e vegetali più o meno utili alla propria sopravvivenza. Ma di ciò non restano, ovviamente, testimonianze fossili.

³ B. Alberts *et al.*, *Biologia molecolare della cellula*, Zanichelli, Bologna 1995, pp. 852-854.

⁴ G. Manzi, *Il grande racconto dell'evoluzione umana*, Il Mulino, Bologna 2013, pp. 264-273.

⁵ C. Stringer – P. Andrews, *La storia completa dell'evoluzione umana*, Logos, Modena 2006, pp. 132-135.

⁶ F. Facchini, *Le origini dell'uomo e l'evoluzione culturale*, Jaca Book, Milano 2006, pp. 98-105.

La spinta dell'utilità pratica che indusse *H. habilis* a riconoscere i ciottoli più adatti ai suoi scopi può essere stata la stessa che ha portato molti popoli primitivi a mettere a punto la catalogazione delle piante e degli animali presenti nel proprio territorio. Non sono pochi gli esploratori e i ricercatori che hanno descritto la loro capacità di identificare, con inaspettata precisione, numerose varietà di animali e di piante e di chiamarle con nomi diversi. Si può citare, a tal proposito, il biologo naturalista Ernst Mayr:

« ... ricordo sempre un'esperienza di quando vivevo solo in mezzo a una tribù primitiva di Papua fra le montagne della Nuova Guinea. Quei superbi uomini dei boschi impiegavano 136 nomi per le 137 specie di uccelli che io distinguevo (confondevano solo due specie di silvie, non ancora descritte) ... »⁷.

Alcune di queste popolazioni, poi, erano state persino capaci di abbozzare sistemi di classificazione in cui erano raccolti, sotto nomi collettivi, animali e piante simili per aspetto e proprietà⁸.

L'opera di catalogazione attraversa in modo più o meno esplicito, tutte le epoche della storia umana ed occupa anche oggi un posto di rilievo non solo nelle discussioni di filosofi e scienziati ma anche nei discorsi quotidiani della gente, nelle classificazioni della cosiddetta 'biologia ingenua'. Ad esempio, anche coloro che non possiedono una competenza scientifica in senso stretto catalogano piante e animali secondo un criterio di *specie*. La specie infatti sembra essere un'evidenza diretta che tutti sono in grado di riconoscere subito con sufficiente certezza. Se incontriamo un animale, ad esempio un cane, lo riconosciamo immediatamente e abbiamo l'impressione di essere capaci di cogliere la sua natura senza bisogno di analisi particolari.

Cogliere le somiglianze e le diversità esistenti tra due o più oggetti è una questione di buon senso più che il frutto di raffinate conoscenze. È un'operazione spontanea che precede qualsiasi forma di conoscenza strutturata. Ad essa si rifà il buon senso dei popoli primitivi nella distinzione e catalogazione di animali e piante; ad essa si rifà la gente comune quando parla di *specie*.

Su questa operazione spontanea della mente umana si innesta il gigantesco sforzo che negli ultimi due millenni uomini curiosi, filosofi e scienziati, hanno fatto per conferire una struttura razionale a ciò che il buon senso intuiva riguardo alla catalogazione dei viventi. È particolarmente utile focalizzare l'attenzione sull'evoluzione del concetto di *specie* in quanto presente sia nel pensiero scientifico-filosofico che in quello di senso comune.

La specie

⁷E. Mayr, *Biologie de l'évolution*, Hermann, Paris 1981, p. 22.

⁸E. Mayr, *Sistematica biologica*, in *Enciclopedia del Novecento*, Treccani, Roma 1982, p. 818.

Nelle trattazioni ben strutturate l'ideale punto di partenza è la definizione dell'oggetto studiato. Ciò, però, non è possibile per il concetto di specie. Anche se viviamo nell'epoca della biologia molecolare, che scandaglia le basi molecolari e atomiche della vita, e anche se il nostro è un periodo di grande fioritura della tecnologia informatica che rende possibile raccogliere e analizzare quantità stratosferiche di dati, di fatto i biologi utilizzano il termine *specie* in più di venti significati diversi, su nessuno dei quali, per giunta, vi è consenso unanime⁹.

Una rassegna dettagliata delle definizioni di specie in uso al giorno d'oggi e di quelle proposte in passato esula dalle finalità di questo contributo. Ritengo sia sufficiente riproporre la considerazione di Mayr dicendo che è possibile riunirle in due gruppi. Il primo raccoglie le definizioni tipologico-morfologiche, essenzialmente predarwiniane, basate sul realismo e sull'essenzialismo di stampo aristotelico; nel secondo trovano posto le definizioni storico-causali, successive all'elaborazione della teoria dell'evoluzione.

Fino ai primi decenni del XIX secolo, i biologi sistematici e i filosofi della natura non distinguevano le specie biologiche da quelle utilizzate per catalogare la realtà inorganica. In linea con la tradizione platonico-aristotelica, per *specie* intendevano semplicemente una proprietà *essenziale* o la classe degli oggetti che la possedevano. Mayr definirebbe *tipologica* questa impostazione che poggiava sulla *teoria dei tipi* di indiscussa matrice aristotelica.

La scala di Aristotele

Aristotele si occupò del problema della specie tanto sotto il profilo filosofico che sotto quello naturalistico. Come filosofo, è sua la paternità della struttura logica binaria basata su specie e genere: ogni concetto è *specie* rispetto a un concetto più universale e *genere* rispetto a un concetto meno universale. Come naturalista, descrisse e classificò più di cinquecento specie di animali, applicando la sua logica binaria. È significativo il fatto che molti dei raggruppamenti proposti da Aristotele sono utilizzati ancora oggi a scopo diagnostico.

Secondo la visione aristotelica, ogni individuo concreto è caratterizzato da almeno una proprietà che denota la sua specie (tipo) di appartenenza. I tipi differiscono dalle altre proprietà per il loro essere essenziali: se l'individuo che li possiede non li avesse, non sarebbe l'individuo che è. In altri termini, le proprietà contingenti dicono come sono certi oggetti, mentre i tipi, le specie, dicono che cosa sono quegli oggetti, consegnandocene l'essenza.

Per Aristotele e per i naturalisti pre-evoluzionisti, le specie erano realtà immutabili. Non erano viste come categorie logiche, frutto esclusivo dell'attività classificatrice della mente umana, ma esseri reali e l'ordine mostrato dalla classificazione era l'ordine stesso della

⁹ A. Borghini – E. Casetta, *Filosofia della biologia*, Carocci, Roma 2013, p. 124.

creazione divina. In questo sistema nulla, al di sotto della specie, era degno di attenzione. Non era preso in considerazione neanche l'individuo perché poteva essere conosciuto per quel che era solo in virtù della sua appartenenza alla specie. Le differenze individuali erano considerate nient'altro che accidentali e, in quanto tali, non venivano prese in considerazione.

Su questi principi logico-metafisici si basava la visione complessiva e rigorosamente gerarchica della realtà nota come *Scala Naturae*. Coerentemente con l'impianto ispiratore, su questa scala non trovavano posto gli individui ma solo le specie disposte sui vari gradini secondo un ordine di crescente complessità. Sul primo gradino comparivano le specie inorganiche, i minerali e i cristalli, poi quelle viventi più semplici, frutto della generazione spontanea, poi le specie vegetali e quelle animali fino ad arrivare al gradino più alto che ospitava la specie umana.

È d'obbligo mettere in evidenza l'armonia che regnava tra questa visione gerarchica aristotelica e la visione del mondo basata sul buon senso comune: anche per quest'ultimo le specie corrispondono a effettive organizzazioni del mondo reale e, con altrettanta evidenza, è lecito ordinarle secondo criteri di crescente complessità.

Questa bella visione unitaria e ordinata della realtà presentava però un inconveniente. Mentre la definizione di specie adottata da Aristotele risultava efficace per gli oggetti inanimati, non lo era altrettanto per quelli vivi, nei quali identificare un'essenza immutabile era spesso un'impresa ardua. Ad esempio, erano motivo di grande difficoltà fenomeni come il dimorfismo sessuale, le differenze morfologiche legate all'età – in particolare le metamorfosi – il polimorfismo e tutte le forme di cambiamento morfologico discontinuo. In questi, come in molti altri casi, il coefficiente di arbitrarietà, presente nell'identificazione delle proprietà essenziali, gettava l'ombra del dubbio sulla reale esistenza delle specie.

Fin dagli inizi del XIV secolo, varie considerazioni di ordine naturalistico e metafisico, indussero Guglielmo di Occam a proporre la teoria del *nominalismo* secondo cui ad esistere realmente sono solo gli individui mentre tutte le classi tassonomiche, specie comprese, non sono che prodotti della razionalità umana¹⁰. In Occam si osserva, quindi, un capovolgimento di causalità: gli individui non si assomigliano perché esistono le specie ma, al contrario, si possono creare delle specie perché gli individui si assomigliano.

Il riconoscimento della realtà degli individui a scapito delle specie e dei generi, fu uno dei primi segni premonitori della nascita della scienza moderna galileiana.

I dubbi nominalistici di Occam, comunque, non esercitarono alcuna influenza sull'attività dei naturalisti che continuò ad ispirarsi al pensiero essenzialista senza fare nessun passo avanti. Alcuni progressi si registrarono solo in campo botanico durante il XVI e il XVII secolo quando furono pubblicati numerosi *erbari* basati sui più diversi criteri di classificazione, dall'efficacia

¹⁰ J.J. Kupiec – P. Sonigo, *Né dio né genoma. Per una nuova teoria dell'ereditarietà*, Eléuthera, Milano 2009, p. 36.

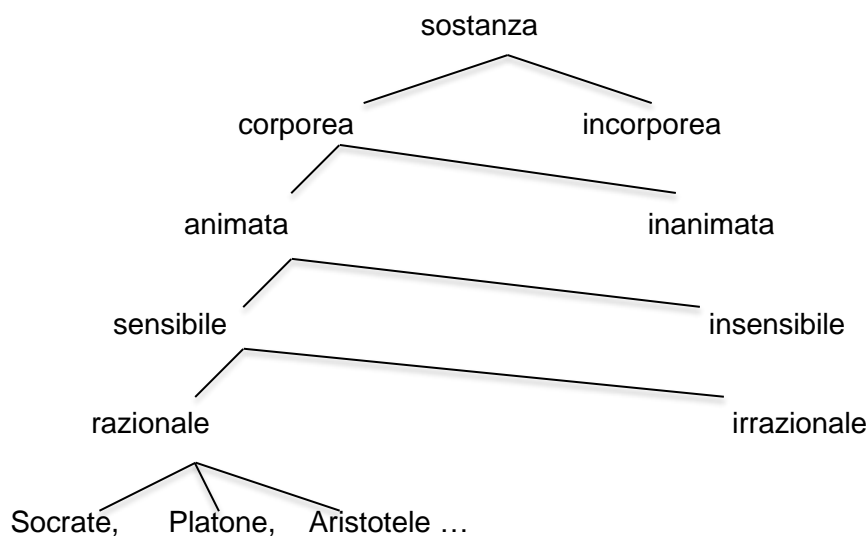
terapeutica ai significati allegorico-simbolici ¹¹. Comunque, indipendentemente da quali fossero i criteri ispiratori, le loro classificazioni continuavano a fondarsi rigorosamente su un unico principio gerarchico di incastro di gruppi, ereditato direttamente da Aristotele. Si scendeva per gradi dal più generale al più specifico: regno, ordine, famiglia, genere, specie o varietà. Ogni gruppo si differenziava dagli altri per il possesso di almeno un carattere che gli apparteneva in esclusiva e che permetteva di definirlo.

Linneo e l'albero di Porfirio

Questa modalità di classificare i viventi avrebbe toccato i suoi vertici nel XVIII secolo con il grande naturalista svedese Carlo Linneo¹². Il suo sistema traeva ispirazione dalla tradizione scolastica medievale e ricalcava con fedeltà l'*albero di Porfirio*.

Porfirio fu un filosofo neoplatonico vissuto nel III secolo d.C.. Nell'opera *Introduzione alle categorie di Aristotele* (meglio nota come *Isagoge*) descrisse i rapporti gerarchici fra i generi e le specie seguendo un processo dicotomico di successive divisioni per opposte proprietà¹³.

Un esempio classico di come l'albero di Porfirio potrebbe essere strutturato graficamente è la seguente¹⁴:



Un simile processo logico avrebbe potuto catalogare l'intero universo, ma solo a due condizioni. La prima è che gli oggetti da classificare fossero inseriti in una gerarchia di

¹¹ E. Mayr, *Sistematica biologica*, in *Enciclopedia del Novecento*, Treccani, Roma 1982, p. 818.

¹² E. Mayr, *Storia del pensiero biologico. Diversità, evoluzione, eredità*, Bollati Boringhieri, Torino 1999, pp. 121-129.

¹³B. Lonergan, *Sull'educazione. Le lezioni di Cincinnati del 1959 sulla «Filosofia dell'Educazione»*, Città Nuova, Roma 1999, pp. 222-223.

¹⁴ *Ibid.*, p. 223.

determinazioni essenziali; la seconda è che essi fossero definiti in modo assoluto e inequivocabile. Le differenze che contraddistinguono le specie, cioè, dovevano esserci o non esserci. Non erano ammesse situazioni intermedie.

È importante ricordare che, secondo il pensiero aristotelico, non è solo la classificazione degli esseri ad avvenire per aggiunta di differenze specifiche ma anche la loro concreta generazione. Il *genere* permette la definizione degli esseri perché li 'genera' nel senso più pieno del termine e la *specie* viene generata per addizione di differenze particolari che suddividono i generi fino a giungere allo specifico.

Secondo questa concezione, quindi, il processo descritto dall'albero di Porfirio, aveva una duplice valenza: *ontogenetica* e *filogenetica*. Non era utile soltanto a ordinare gli oggetti in classi descrivendo i rapporti logici esistenti fra di loro, ma spiegava anche il processo del loro ingresso nell'essere. Secondo la metafisica creazionista, l'aggiunta di differenze specifiche era lo strumento stesso di cui Dio si era servito per creare il mondo e l'albero di Porfirio descriveva la serie delle variazioni che il Creatore aveva dovuto apportare all'essere per far emergere l'uomo dalle tenebre.

Ispirandosi all'albero di Porfirio, dunque, Linneo organizzò il suo sistema di classificazione seguendo un criterio *dicotomico* basato sulla presenza o sull'assenza di precisi caratteri morfologici dell'apparato riproduttore. Pose in tal modo le basi di quella struttura gerarchica tassonomica che tutti conosciamo: gli 'atomi' del suo sistema erano le *specie*, che erano ricomprese in unità più ampie, i *generi*, i quali a loro volta erano compresi negli *ordini*, gli ordini nelle *classi*, le classi, infine, nei tre *regni*: minerale, vegetale, animale.

A Linneo si deve anche la geniale semplificazione della nomenclatura, ridotta a coppie di nomi che indicano il genere e la specie¹⁵. I biologi attuali, pur non condividendo i presupposti metafisici, giudicano punti di riferimento irrinunciabili tanto la nomenclatura quanto la tassonomia linneane. Ne è la riprova il fatto che gli stessi codici internazionali, che disciplinano la nomenclatura zoologica attuale, fanno riferimento esplicito alla X edizione del *Systema naturae* di Linneo.

Un simile, chiaro riferimento a Linneo nella tassonomia moderna appare come una vera e propria contraddizione. Non aveva forse, l'opera linneana, un impianto rigorosamente aristotelico mentre la scienza moderna è caratterizzata proprio dall'anti-aristotelismo? E poi, il riferimento alla classificazione binomiale di Linneo è la manifestazione di una pura convenienza pratica o, invece, ha una sua giustificazione più profonda?

Linneo e Galileo

¹⁵ E.P. Solomon – L.R. Berg – D.W. Martin, *Biologia*, EdiSES, Napoli 2009, pp. 434-450.

Per rispondere a questioni di fondamentale importanza come quelle appena esposte, è necessario fare preventiva chiarezza su ciò che si intendeva per *scienza* nel pensiero classico-aristotelico e ciò che si intende per *scienza* dopo la rivoluzione di Galileo.

Va sottolineato, prima di tutto, che nella concezione aristotelica non erano contemplate leggi universali. Il cosmo lo si pensava diviso in due mondi: quello *celeste* e quello *sublunare*. Il mondo celeste ospitava corpi perfetti e moti uniformi e circolari mentre il mondo sublunare era contraddistinto da corpi imperfetti, fundamentalmente differenti gli uni dagli altri e capaci di moti rettilinei. Inoltre, le montagne, gli alberi, i fiumi, ogni cosa dipendeva da un principio diverso. In un cosmo così concepito, ogni parte contribuiva alla costruzione del tutto con un ruolo determinato dalla propria natura (*essenza*). Non erano possibili eventi casuali.

Un sistema di questo tipo può, oggi, apparire ingenuo. Tuttavia nell'antichità era assolutamente plausibile. Di più, era evidente perché in completo accordo con i dati dell'osservazione e dell'esperienza; in una parola, del buon senso. Sarebbe del tutto fuori luogo sottostimarne l'efficacia considerandolo primitivo; era, al contrario, estremamente coerente. Nel sistema, tuttavia, si annidava un tarlo che ne minava la stabilità dall'interno: la *descrizione* corrispondeva alla *spiegazione*¹⁶. Per Aristotele, descrivere gli esseri mettendo a fuoco le loro differenze specifiche, significava spiegarli. Ad esempio, il sasso cade. Ma perché cade? Perché questa è la sua natura (*essenza*). E come sappiamo che questa è la sua natura? Perché cade!

Contro questo impianto conoscitivo insorse Galileo. La sua fu una vera 'rivoluzione metodologica' dalla quale ebbe origine la scienza moderna. Abbandonato l'impianto *descrittivo* aristotelico, ne propose uno *esplicativo* che aveva per oggetto le relazioni che legano i corpi tra loro. Un sapere basato su determinazioni quantitative e sulla ricerca delle cause formali¹⁷.

Una biologia coerente con l'impianto galileiano, quindi, non si sarebbe più dovuta basare sulla descrizione di caratteristiche morfologiche né sulla riunione in classi basata su semplici criteri di somiglianza ma sulle relazioni che quegli stessi caratteri permettono di intrattenere con il mondo circostante e la successiva riunione in gruppi strutturati in grado di esprimere tali relazioni.

Di fronte al monumentale lavoro linneano di stretta osservanza aristotelica, sorge la domanda sul perché, a più di un secolo dalla fondazione della scienza moderna, Linneo abbia continuato ad utilizzare l'impianto aristotelico. La risposta è semplice. L'opera di Galileo ebbe un'influenza diretta solo sui saperi ricompresi nel campo della fisica e dovette passare del tempo prima che si escogitasse la maniera più idonea di applicare il metodo agli

¹⁶ B. Lonergan, *Insight. Uno studio del comprendere umano*, Città Nuova, Roma 2007, pp. 81-82.

¹⁷ *Ibid.*, pp. 128-129.

altri ambiti della scienza. Perché anche la biologia assumesse la struttura di scienza moderna sarebbe stato necessario attendere, ancora per più di un secolo, l'opera di Darwin.

Siamo ora in grado di rispondere alla domanda che ci eravamo posta circa la legittimità dell'uso della nomenclatura e della tassonomia linneane da parte dei biologi moderni. La risposta è positiva per almeno tre motivi.

Il primo è che Linneo, ispirandosi alla dottrina aristotelico-scolastica secondo la quale le specie sono state chiamate all'esistenza per aggiunta progressiva di differenze specifiche, giunse ad una tassonomia in cui sono leggibili anche i legami di parentela tra le diverse specie. In questo modo, anche se involontariamente, Linneo precorse i tempi proponendo una classificazione che risultò geniale sia perché tecnicamente perfetta sia perché capace di far trasparire le linee genealogiche delle specie. Proprio quest'ultimo, infatti, sarà il criterio ispiratore delle opere di classificazione dopo l'introduzione dei principi che fondano la scienza moderna. In questo senso, Linneo fu un autentico precursore della sistematica evolutiva¹⁸.

Il secondo motivo che spinge a dichiarare legittimo l'uso della tassonomia linneana è di tipo metodologico. Affinché possa essere concepita una teoria a partire da numerosi dati empirici, è indispensabile che gli stessi dati siano preventivamente organizzati in un ordine che faciliti la formulazione della teoria stessa. Che i dati empirici siano posti nel giusto ordine è di grande importanza anche nel processo di verifica della teoria. L'ordine dei dati, proposto da Linneo, si è dimostrato prezioso in ambedue i processi.

Il terzo è un motivo di ordine pratico. La classificazione linneana è tanto potente da riuscire a mettere in ordine un numero sconfinato di dati e, al tempo stesso, tanto semplice da poter essere applicata senza particolari difficoltà.

Il tentativo di Buffon

Tra i primi a svincolare le specie viventi dal riferimento alle proprietà morfologiche essenziali legandole alle proprietà relazionali, fu il naturalista Georges-Louis Leclerc, conte di Buffon, vissuto in Francia nel XVIII secolo¹⁹.

Fin dalle prime battute del suo testo monumentale *Histoire naturelle*, Buffon criticava la concezione realista delle classi presente in Linneo. Lo faceva, proprio come lo farebbe qualsiasi evolutivista moderno, nel nome di una natura che «procede per gradazioni sconosciute, e conseguentemente non può prestarsi del tutto a tali divisioni, poiché passa da una specie a un'altra, e spesso da un genere all'altro, attraverso sfumature impercettibili»²⁰.

Era fermamente convinto che la natura potesse essere conosciuta solo mediante la descrizione completa di tutte le sfumature e respingeva qualsiasi operazione di inclusione in

¹⁸ J.J. Kupiec – P. Sonigo, *Né dio né genoma. Per una nuova teoria dell'ereditarietà*, cit., p. 33.

¹⁹ E. Mayr, *Storia del pensiero biologico*, cit., pp. 129-131.

²⁰ G. Barsanti, *Buffon. Teoria della natura*, Theoria, Roma-Napoli 1985, p.50.

gruppi come generi, ordini e classi, che esistono, diceva, solo nella nostra immaginazione. Questa chiara professione di nominalismo, oltre a non riferirsi agli individui, sulla cui realtà non potevano esistere dubbi, non interessava neppure le specie. La continuità dinamica, che per Buffon era la caratteristica fondamentale della natura, trovava il fondamentale principio unificatore nel meccanismo della riproduzione. Il criterio *genetico* compariva così all'orizzonte della biologia sistematica, contribuendo all'affermazione di un modo nuovo di affrontare il problema della classificazione in sintonia con i principi della scienza galileiana.

Buffon, quindi, aveva intuito che le specie sono passibili di trasformazione. Non era, però, riuscito a liberarsi del tutto da certi modi tradizionali di concepirle e nello stesso momento in cui sottolineava l'importanza della variazione individuale, continuava a rifarsi all'idea di *prototipo*, una sorta di 'stampo interiore' deputato a dar forma alla materia vivente. Per conciliare queste due esigenze apertamente antitetiche, si ispirò alla dottrina scolastica che distingueva l'essenza dall'esistenza: il prototipo, nell'atto di realizzarsi, si altera. Le variazioni individuali, poi, sono accidentali e non toccano il modello inalterabile. Lo testimonia il termine stesso che utilizza per descriverle: non parla di variazione, cambiamento o trasformazione, ma di *degenerazione*. È così che, nello stesso testo, dopo aver avanzato l'ipotesi dell'evoluzione delle specie, Buffon finisce per ricadere nel fissismo.

Forse a motivo di queste contraddizioni interne, Buffon non fu in grado di elaborare un'organica teoria dell'evoluzione fondata su un meccanismo esplicativo.

La scala di Lamarck

Ciò che a Buffon non era riuscito, fu portato a compimento da Jean-Baptiste Lamarck, anch'egli francese, di una quarantina d'anni più giovane di Buffon. Lamarck elaborò la prima teoria evoluzionistica della storia del pensiero biologico, fondata su precisi criteri di trasformazione delle specie²¹.

La convinzione nominalistica, ampiamente diffusa tra gli evoluzionisti dell'epoca, lo portò a contestare l'esistenza reale dei gruppi di Linneo: «La natura non ha formato realmente né classi, né ordini, né famiglie, né generi, né specie costanti, ma solo individui che si succedono gli uni agli altri e che assomigliano a quelli che li hanno prodotti»²². Secondo Lamarck, quindi, in natura esistono solo individui che si somigliano perché appartengono alla stessa linea riproduttiva mentre «le loro specie hanno una costanza solo relativa e non sono invarianti che temporaneamente»²³.

Le specie, dunque, sono insiemi di individui simili che cambiano nel corso del tempo. Esse mantengono, tuttavia, una relativa omogeneità a causa del meccanismo deterministico di variazione proposto dallo stesso Lamarck. È convinto, infatti, che individui identici che

²¹ E. Mayr, *Storia del pensiero biologico, cit.*, pp. 288-306.

²² J.B. Lamarck, *Filosofia zoologica*, La Nuova Italia, Firenze 1976, p. 63.

²³ *Ibid.*, p. 59.

subiscono la stessa influenza ambientale cambiano in maniera identica perché è lo stesso ambiente ad indurre causalmente le variazioni.

Detto ciò, risulta chiaro il motivo per cui la teoria di Lamarck è stata così di frequente ridotta alla descrizione dell'influenza esercitata dall'ambiente sugli organismi viventi, espressa dalla ben nota formula della *ereditarietà dei caratteri acquisiti*. In realtà, la sua concezione va ben oltre questa semplice affermazione. Innanzi tutto, egli ritiene che in natura sia operante una tensione alla sempre maggiore complessità e al perfezionamento dei sistemi viventi. Da questo criterio segue necessariamente un modo di ordinare le realtà viventi secondo una scala di crescente complessità e perfezione. Una rinnovata *Scala Naturae* sul cui primo gradino trovano posto i più semplici esseri viventi e poi a salire, di gradino in gradino, le specie sempre più complesse fino a giungere all'uomo che, occupando il gradino più alto, costituisce anche il fine verso cui la tendenza naturale è indirizzata.

Nel lavoro tassonomico, Lamarck introduce la distinzione tra *distribuzione generale* e *classificazione*. Alla distribuzione generale è affidato il compito di definire il numero e le caratteristiche dei gradini della scala degli esseri e le viene attribuito il carattere dell'oggettività. Al suo interno trovano posto quattordici grandi classi – i quattordici gradini della scala – che vanno dagli Infusori ai Mammiferi. Ogni classe corrisponde a una struttura corporea ben precisa e il passaggio dall'una all'altra avviene attraverso l'acquisizione di un organo o di un sistema di organi caratteristico della classe.

Se in natura fosse attiva soltanto questa tendenza alla complessificazione/perfezionamento, gli esseri viventi si ordinerebbero sulla scala in maniera omogenea e regolare ma i fatti testimoniano il contrario. Il motivo va ricercato, a parere di Lamarck, nel secondo principio-chiave della sua teoria: l'influenza dell'ambiente che si esprime attraverso l'uso o il disuso degli organi. Sono le condizioni di vita a far deviare gli esseri viventi dalla direzione uniforme che seguirebbero se fossero condizionati solamente dal piano della natura. Le condizioni di vita come il clima, la geografia, l'ecosistema ecc., sono imprevedibili e aleatorie e non fanno altro che mescolare le carte, creando deviazioni nella struttura dei viventi.

Se la scala degli esseri corrisponde alla distribuzione generale, tocca alla classificazione distinguere le specie prodotte dall'influenza delle circostanze. Mentre la prima è oggettiva, la seconda è arbitraria.

In conclusione, si può affermare che, con Lamarck, la classificazione diventa, per la prima volta, lo strumento e, insieme, il prodotto di una teoria organica tendente a dare una spiegazione dello stato dei viventi e del loro divenire.

L'albero di Darwin

Charles Darwin fece ciò che nessuno dei suoi predecessori era riuscito a fare: rinunciò, senza compromessi, alla nozione della fissità degli esseri viventi sostituendola con quella della variabilità, posta come proprietà fondamentale. Fu questa la base su cui costruì la sua teoria dell'evoluzione per *discendenza con modificazione e selezione naturale*. L'aspetto fondante del cambiamento di prospettiva teorica che si affermò con l'evoluzionismo darwiniano – e che avrebbe costituito il nocciolo del pensiero evoluzionistico successivo – fu la valorizzazione dell'individuo. Fin dalle prime pagine de *L'origine delle specie*, la sua opera fondamentale, Darwin, facendo eco alle affermazioni di Lamarck secondo cui non esistono le specie ma solo gli individui, concentra l'attenzione su questi ultimi evidenziando la concretezza delle loro infinite variazioni.

Darwin, nel nome di un nominalismo proclamato sempre con forza, abbandona definitivamente la nozione di realismo delle specie dandone anche la giustificazione teorica: il concetto classico di specificità non è quantificabile. Essa, di fatto, segna l'ingresso del pensiero biologico nella moderna scienza galileiana. È bene tener presente, infatti, che il passaggio dalla scienza descrittiva aristotelica a quella esplicativa galileiana «corrisponde esattamente al passaggio dalla definizione qualitativa degli oggetti mediante differenze specifiche non quantificabili, allo studio dei fenomeni attraverso la misura dei parametri che li determinano»²⁴.

Questo è, senz'altro, un rivoluzionario cambiamento di paradigma che porta, come conseguenza diretta, la necessità di identificare nuovi criteri di classificazione che siano in sintonia con l'osservazione che le specie non sono immutabili e che le caratteristiche morfologiche non possono essere che il sintomo di un altro genere di differenze, colte più adeguatamente dalle relazioni di tipo causale (parentale, ecologico) tra gli organismi. Le specie infatti sono, per Darwin, entità storiche e gli organismi che le vanno a costituire devono essere individuati sulla base delle loro relazioni con i gruppi parentali, o con l'ambiente, o con altri organismi che si pensa appartengano al medesimo gruppo.

Darwin, quindi, dopo aver demolito, con il suo approccio nominalistico, la concezione essenzialista e fissista della specie, arriva a proporre una definizione fondata sul nuovo punto di vista evolutivo: la specie è un insieme di individui che hanno un antenato in comune. Inoltre, poiché la riproduzione è sempre accompagnata da modificazioni, se ne deduce che la somiglianza più o meno marcata di due specie altro non è che l'indice di un legame di parentela più o meno stretto. In questa nuova ottica, quindi, anche la classificazione assume un significato del tutto nuovo: non più espressione statica della creazione divina, come lo era in Buffon e Lamarck, ma espressione del legame genealogico di tutti gli esseri viventi.

Non può più essere una scala, quindi, a rappresentare la totalità dei viventi. Non c'è posto per trasformazioni discrete (gradini) nella visione darwiniana ma solo per variazioni continue

²⁴ J.J. Kupiec – P. Sonigo, *Né dio né genoma. Per una nuova teoria dell'ereditarietà*, cit., p. 42.

e impercettibili. Proprio come un albero che cresce. Ed è un albero, una quercia maestosa, a rappresentare l'evoluzione dei viventi nelle opere ottocentesche che alla teoria di Darwin fanno riferimento. La base del tronco rappresenta il primitivo organismo vivente da cui tutti gli altri sarebbero derivati. Procedendo verso la cima dell'albero, le successive sezioni del tronco rappresentano gruppi di organismi via via più complessi: prima i protozoi, poi, nell'ordine, i metazoi, i vertebrati, fino a giungere ai mammiferi e all'uomo, posto sulla sommità del tronco. I rami che formano la chioma della quercia, biforcandosi a varie altezze, simboleggiano quei gruppi di organismi che, differenziatisi per variazioni spontanee da progenitori appartenenti al tronco, sono stati favoriti dalla selezione naturale, sono cresciuti di numero e hanno dato origine a nuove varianti: i ramoscelli sempre più sottili dell'albero.

I cespugli del dopo-Darwin

Era appena iniziato il XX secolo quando la riscoperta delle opere di Gregor Mendel portò alla nascita di una nuova scienza, la genetica, e determinò la rinascita del modo realistico di concepire le specie. A parere del biologo olandese Hugo De Vries, uno dei fondatori della nuova scienza, la specie è un'entità reale, corrisponde a tipi invarianti, e il passaggio dall'uno all'altro di questi tipi avviene per *mutazione*²⁵. Oggi la teoria della mutazione di De Vries, non ha più alcun seguito, ma la concezione realista della specie è stata raccolta e tramandata, sotto forme diverse, dalla genetica stessa.

Dall'incontro (innaturale!) della genetica e del suo modo di concepire la realtà della specie, con la teoria dell'evoluzione di Darwin nacque la *Sintesi moderna* erroneamente ritenuta sinonimo del *Neodarwinismo*²⁶.

I biologi attuali, che abbracciano per la quasi totalità le tesi della Sintesi moderna, concordano sul fatto che le specie – a differenza delle altre entità che compongono le tassonomie come le famiglie, i regni, gli ordini ecc. – siano entità reali. Ernst Mayr, uno dei padri fondatori della Sintesi moderna, completa la descrizione delle abilità naturalistiche del popolo Papua, citata in precedenza, con queste considerazioni: «Il fatto che l'uomo dell'età della pietra riconoscesse nella natura le stesse entità dell'esperto accademico occidentale confuta in maniera definitiva l'idea secondo cui la specie sarebbe solamente il prodotto dell'immaginazione umana. Lo stesso si può dire, evidentemente, per la definizione sofisticata delle specie che vivono vicino a noi ... Le specie sono il prodotto dell'evoluzione, non dello spirito umano»²⁷.

A livello pratico, vi è un largo accordo sul fatto che le specie vengano riconosciute per mezzo di caratteri morfologici, cioè tratti osservabili e misurabili, ivi inclusi quelli microscopici,

²⁵ A. Borghini – E. Casetta, *Filosofia della biologia*, cit., p. 74.

²⁶ F. Brancato – L. Galleni, *L'atomo sperduto. Il posto dell'uomo nell'universo*, San Paolo, Cinisello Balsamo (MI) 2014, p. 73.

²⁷ E. Mayr, *Biologie de l'evolution*, cit., p. 22.

fisiologici e molecolari. Questi tratti permettono di giungere alla specie, la quale, però, non viene definita su basi morfologiche ma storiche, sulla base, cioè, delle comuni relazioni di discendenza degli organismi che ne fanno parte.

Giunti a questo punto, è opportuno fermarsi a considerare il significato dell'impatto che la sintesi moderna ha avuto sulla spiegazione del processo evolutivo. La posizione di Darwin – è opportuno richiamarla – era che la variabilità individuale avesse le caratteristiche della casualità e che fosse la selezione naturale a dirigere le danze dell'evoluzione. In realtà, Darwin non usò mai il termine *casualità* in riferimento alle variazioni spontanee che ipotizzava, lo fece soltanto intendere. Fu però molto chiaro nell'attribuire alla selezione naturale il ruolo principale di guida del processo evolutivo. Ora, se è la selezione il principale responsabile, anche se non l'unico, dell'andamento dell'evoluzione ciò fa supporre che il materiale su cui esercita il suo influsso sia quasi totalmente plastico. La genetica ha invece dimostrato che esistono delle leggi che pongono delle limitazioni alla variabilità. Non è più possibile, allora, ipotizzare che ci sia un unico fattore esterno – come la selezione operata dall'ambiente – a dirigere i processi evolutivi ma anche fattori interni come le leggi genetiche e dello sviluppo. Di conseguenza, si deve pensare che il bisturi della selezione naturale non abbia avuto a disposizione un'infinita gamma di varianti su cui intervenire, ma solo quelle che avevano già superato le condizioni restrittive imposte dalle leggi della biologia molecolare e della genetica.

Un simile intervento di canalizzazione pre-selezione può contribuire a spiegare la cosiddetta *esplosione del Cambriano*. Per comprendere la sua importanza quale snodo decisivo nella storia della vita, è utile richiamare alla memoria la scansione temporale degli eventi che, più di tutti, hanno segnato l'evoluzione planetaria della vita. Dunque, la formazione della Terra, a partire da un disco di gas e polveri ruotante attorno al Sole, risale a circa 4 miliardi e mezzo di anni fa. Le più antiche evidenze indirette della presenza di forme viventi sul nostro pianeta provengono da rocce trovate in Groenlandia, vecchie di 3,8 miliardi di anni. La vita, quindi, è velocemente comparsa dopo il raffreddamento del pianeta, che si stima abbia richiesto circa mezzo miliardo di anni. Le più antiche testimonianze dirette della vita sono fossili di batteri vissuti 3 miliardi e mezzo di anni fa. Per un altro miliardo e mezzo di anni i batteri furono gli unici abitanti delle acque del pianeta. Poi, intorno ai 2 miliardi di anni fa, fecero la loro comparsa le cellule complesse (*eucarioti*), con struttura simile a quella delle cellule dei nostri corpi. Da allora, dovette passare un altro miliardo e mezzo di anni prima che comparissero organismi pluricellulari piccoli e semplici, la cosiddetta *fauna di Ediacara*. Circa mezzo miliardo di anni fa iniziò, poi, l'esplosione di vita del Cambriano. Intorno a 540 milioni di anni fa, in un intervallo di tempo sorprendentemente breve – se misurato con il metro delle ere geologiche – cioè tra i 5 e i 10 milioni di anni secondo le diverse stime, la vita sulla terra si trasformò completamente. Il numero e la varietà delle

specie aumentò a dismisura; gli animali, in particolare, divennero più grandi, più duri e più ingegnosi e, ciò che interessa di più, entro quel breve intervallo di tempo fecero la loro comparsa tutti i principali tipi di organizzazione corporea (*phyla*) presenti oggi sulla Terra²⁸.

Durante le ere che seguirono, ognuno di questi prototipi di organizzazione corporea subì successive modifiche e specializzazioni in modo pressoché indipendente dagli altri. Dal ceppo di Ediacara erano nati, quasi contemporaneamente, tanti polloni che crebbero, con il passare del tempo, emettendo ramoscelli laterali di nuove specializzazioni e trasformando così la vecchia e classica immagine della quercia darwiniana in un cespuglio fitto e rigoglioso. All'uomo, come una delle specie più recenti, spetta un posto apicale, ma non è, biologicamente parlando, il più alto in assoluto tra i tanti tronchetti del cespuglio; è solo al più alto posto del phylum dei Cordati²⁹.

Non più le scale, quindi, non più gli alberi, ma i cespugli sono oggi i simboli più adatti ad esprimere la struttura intima di quel fiume della vita dalla cui visione eravamo partiti.

²⁸ Cf. C. De Dève, *Polvere vitale. L'origine e l'evoluzione della vita sulla terra*, Longanesi, Milano 1998.

²⁹ Cf. M. Ferraguti – C. Castellacci (a cura di), *Evoluzione. Modelli e processi*, Pearson, Milano-Torino 2013.

PRELIMINARI DI BIOLOGIA CELLULARE ALLA COSTITUZIONE DEL SÉ UMANO

CARLO CIROTTO

In: A. Pavan e E. Magno (a cura di), *Antropogenesi. Ricerche sull'origine e lo sviluppo del fenomeno umano*, Il Mulino, Bologna 2010, pp 457-465

1. Un sistema di sistemi

Alla ricerca di un criterio capace di dar ragione delle realtà materiali dell'universo in evoluzione, François Jacob ne *La logica del vivente* invitava a considerare la realtà come un complesso dinamico di strutture che si dispongono su livelli di complessità crescente, legati l'uno all'altro da rapporti di causalità. Diceva Jacob: «A ciascun livello, unità di dimensioni relativamente definite e di struttura pressoché identica si associano per formare un'unità di livello superiore. Si può chiamare *integrone* ciascuna di tali unità formata dall'integrazione di sottounità. Un integrone si forma mediante la combinazione degli integroni appartenenti al livello immediatamente inferiore a esso e partecipa alla costituzione dell'integrone del livello successivo »³⁰. E Mayr, uno dei padri del neodarwinismo, ampliava così la frase di Jacob: «Ciascun integrone presenta nuove caratteristiche e capacità, assenti ai livelli inferiori di integrazione »³¹.

Al di là del fatto che il neologismo 'integrone' possa o meno incontrare il favore di chi legge, credo si debba riconoscere a Jacob il merito di suggerire un utile criterio di lettura del processo evolutivo, basato sul concetto di unità progressivamente più complesse che si costruiscono a partire da unità più semplici. Oggi potremmo sostituire più opportunamente la parola *unità* con *sistema*. Per sistema, infatti, si intende «una configurazione di elementi strutturati interagenti che danno origine a entità aventi caratteristiche, proprietà e aspetti peculiari »³². E' affascinante leggere l'universo come una storia di produzione di nuovi sistemi: gli elementi che popolano ciascun livello di complessità traggono origine dall'organizzazione degli elementi già esistenti nei livelli più bassi e sono spinti a loro volta a cercare nuove configurazioni attraverso l'unione con altri sistemi già formati.

Questa lettura dell'evoluzione universale si accorda bene con ciò che si conosce dei meccanismi dell'evoluzione biologica. Ernst Mayr, commentando il punto di vista di Jacob, fa notare la sua consonanza con il paradigma

³⁰ F. JACOB, *La logica del vivente. Storia dell'ereditarietà*, Einaudi, Torino 1971, 384.

³¹ E. MAYR, *Il modello biologico*, McGraw-Hill, Milano 1998, 15.

³² G. MINATI, *Sistemica*, Apogeo, Milano 1998, 44.

darwiniano: «Un moderno evoluzionista direbbe che la formazione di un sistema più complesso, che rappresenti un nuovo livello più elevato, è rigorosamente una questione di variazione genetica e di selezione. Non vi è alcun conflitto con i principi del darwinismo »³³.

L'intrinseca complessità che caratterizza i sistemi biologici fa sì che sia alquanto difficile, se non impossibile, giustificare con opportune teorie la stabilità dei vari tipi di sistema e quindi anche le transizioni degli uni negli altri. Tuttavia, al di là di ogni difficoltà teorico - quantitativa, sono i fatti stessi dell'evoluzione a fornire la convalida alla visione di Jacob³⁴. Passare in rassegna tali fatti esula dagli scopi di questa breve trattazione. Esiste comunque una ricca bibliografia alla quale rimando gli interessati³⁵.

2. Le proprietà dei sistemi

La frase con la quale Mayr ampliò quella di Jacob fa riferimento alle proprietà dei sistemi e, più esattamente, alle loro *proprietà emergenti*. Ma andiamo con ordine. Tenendo presente che un sistema è una configurazione ordinata di molteplici parti interagenti, non è difficile identificare due tipologie di proprietà che il sistema stesso può possedere. Alla prima classe appartengono quelle che derivano dalla somma delle proprietà di ogni componente. Un esempio è la massa del sistema che è la sommatoria delle masse delle sue subunità.

Alla seconda classe appartengono quelle proprietà che sono caratteristiche del sistema in quanto totalità. Sono, appunto, le proprietà emergenti che non possono essere attribuite ai singoli componenti ma sono ascrivibili solo al sistema globale. Le proprietà emergenti, a loro volta, possono essere prevedibili o imprevedibili³⁶. Un convincente esempio delle prime è la durezza dei minerali. Intesa come resistenza che la faccia di un cristallo oppone ad essere scalfita³⁷, è assurdo attribuirle ai singoli atomi o alle singole molecole che formano il cristallo ed è relativamente semplice dimostrare che la durezza è strettamente correlata alla disposizione spaziale dei legami che uniscono tra loro le unità del reticolo cristallino. A tale riguardo, sono emblematici i casi del diamante e della

³³ E. MAYR, *Il modello biologico*, McGraw-Hill, Milano 1998, 227.

³⁴ Cfr. L. MARGULIS, R. FESTER (Eds.), *Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation*, MIT Press, Cambridge (Massachusetts) and London 1991.

³⁵ Cfr. S.C. MORRIS, *Life's Solution: Inevitable Humans in a Lonely Universe*, Cambridge University Press, Cambridge 2003.

³⁶ Cfr. R. VAN GULICK, *Reduction, emergence and other recent options on the mind/body problem*, *Journal of Consciousness Studies*, **8** (2001), 1-34.

³⁷ G. CAROBBI, *Mineralogia*, Sansoni, Firenze 1958, 139.

grafite che occupano rispettivamente il gradino più alto e quello più basso della scala delle durezza. In ambedue i cristalli l'unico componente è il carbonio; a variare è solo l'assetto dei legami che tengono uniti questi atomi tra loro ³⁸.

Per trovare esempi di proprietà emergenti imprevedibili, e quindi di vere e proprie novità, si deve prendere in considerazione lo stato di organizzazione della materia vivente, caratterizzato da livelli di complessità straordinariamente elevati. Nelle cellule, ad esempio, la proprietà di essere vivo è del sistema nella sua totalità, mentre i vari componenti molecolari o sopramolecolari, considerati separatamente, non lo sono. L'insieme delle caratteristiche di un essere che definiamo 'vivo' non è attribuibile né agli acidi nucleici, né alle proteine, né a nessun altro costituente chimico considerati separatamente ma al loro insieme organizzato e funzionante secondo le modalità descritte dalla biologia cellulare ³⁹.

3. *Le basi strutturali dei sistemi*

L'esperienza insegna che le modalità di unificazione di una pluralità di elementi sono fondamentalmente due: la modalità del *mucchio* e quella del *sistema*. Nella prima i singoli elementi occupano spazi adiacenti e mantengono inalterata la propria individualità; nella seconda si instaurano tra loro relazioni tali da modificarne le caratteristiche e permettere che emerga una nuova unità più complessa. Se il sistema è sufficientemente semplice, i singoli elementi che lo formano possono entrare in relazione diretta l'uno con l'altro; in sistemi di più elevata complessità, invece, è necessaria l'azione di idonee *strutture di integrazione*. In concreto, quindi, per dimostrare l'esistenza di un sistema semplice è sufficiente mettere in evidenza il verificarsi di interazioni a corto raggio mentre è la presenza di strutture di integrazione più articolate a denotare l'esistenza di un sistema complesso.

4. *Il sistema uomo dalla monocellularità alla pluricellularità*

Che cos'è un uomo per lo studioso di scienze naturali? Un fisico non ha difficoltà a rintracciare sistemi a lui ben noti: particelle subatomiche, atomi, campi energetici di vario tipo. Nulla di diverso da ciò che trova nel resto dell'universo. Un chimico ha qualcosa di più interessante da notare: accanto a

³⁸ ID, *Mineralogia...*, 267

³⁹ H. MATURANA, F. VARELA, *Autopoiesi e cognizione. La realizzazione del vivente*, Marsilio, Venezia 1985, 33.

molecole semplici c'è, nell'uomo, una straordinaria concentrazione di derivati del carbonio particolarmente complessi. Il biologo molecolare focalizza l'attenzione sulle interazioni varie ed ordinate di tali macromolecole fino a constatare l'emergenza di esseri viventi di dimensione microscopica: le *cellule*.

La scala delle complessità non termina alla cellula ma prosegue verso la *pluricellularità*. La cooperazione ordinata di cellule differenti per forma e funzionalità ha come esito un individuo pluricellulare e macroscopico: l'organismo umano. Una stima abbastanza attendibile attribuisce ad un adulto di medie dimensioni ben 750 milioni di milioni di cellule appartenenti a circa 135 tipi diversi ⁴⁰. Ricorrendo alla terminologia di Jacob, l'uomo, nella sua realtà biologica, può essere quindi definito un 'integrone cellulare'.

Un tale stato di pluricellularità, che caratterizza l'individuo adulto, è il punto di arrivo di un processo di sviluppo che ha come inizio lo stato di monocellularità dello *zigote*. Soprattutto lo studio degli stadi precoci dello sviluppo embrionale, allora, potrà fornire notizie preziose sulle modalità con cui la pluricellularità si afferma all'aumentare progressivo del numero di cellule. Potrà aiutare, ad esempio, a chiarire se il passaggio dalla mono- alla pluri-cellularità comporti stadi intermedi disordinati o se l'organizzazione in sistemi è onnipresente. Nel caso venga provata la seconda ipotesi, poi, dovranno essere evidenziate le strutture di integrazione che la rendono attuale.

5. Fecondazione: la prima integrazione

Gli uomini, come tutti gli organismi pluricellulari a riproduzione sessuata, iniziano la loro vita individuale come esseri monocellulari originati dalla fecondazione di una cellula uovo da parte di uno spermatozoo. Sia gli spermatozoi che le uova sono cellule altamente specializzate, che nella fecondazione si fondono mettendo in comune i loro materiali e formando così lo zigote. E' importante sottolineare come questa fusione non sia una semplice sommatoria di due cellule per darne una semplicemente più grande, come avviene in altri casi nell'organismo quando più cellule si fondono per formare un *sincizio*. Nella fecondazione la fusione comporta una riorganizzazione dei costituenti delle due cellule sessuali tanto profonda da originare una cellula, lo zigote, totalmente diversa dalle due di partenza. Il materiale nucleare, prima di tutto, si riorganizza per assumere l'assetto tipico delle cellule diploidi, lo stesso

⁴⁰ A. BOMPIANI, E. BROVEDANI, C. CIROTTO, *Nuova genetica nuove responsabilità*, San Paolo, Cinisello Balsamo 1997, 10.

che verrà fedelmente riproposto in tutte le cellule del futuro organismo. Ma anche il resto della cellula, il citoplasma, si riorganizza profondamente. I diversi materiali di cui è composto vengono talmente modificati sotto il profilo qualitativo, quantitativo e di distribuzione topografica che la cellula che esce dal processo di fecondazione non condivide più nessun carattere morfologico o funzionale con le cellule sessuali di partenza. La caratteristica più appariscente dello zigote, ad esempio, è la sua propensione a dividersi in cellule figlie, cosa che né lo spermatozoo né l'uovo sono in grado di fare. Poco importa che quasi tutti i componenti dello zigote siano gli stessi dell'uovo; a seguito della fecondazione infatti sono profondamente cambiate le loro relazioni spaziali e funzionali. Lo zigote è un sistema, un integrone, nel quale sono organizzati in modo del tutto nuovo gli elementi molecolari e sopramolecolari dell'uovo e dello spermatozoo ⁴¹.

A buona ragione la fecondazione può essere letta come la riproposizione, a livello ontogenetico, di quel processo di *simbiogenesi* che a livello filogenetico ha condotto, due miliardi di anni fa, alla comparsa delle cellule eucariotiche attraverso la fusione di cellule batteriche preesistenti ⁴².

6. *L'integrazione cellulare nell'embrione precoce*

«Nessuno di coloro che studiano lo sviluppo embrionale può negare di essere pieno di stupore e meraviglia» affermava Wolpert, uno degli embriologi più eminenti del nostro tempo ⁴³. E' affascinante osservare al microscopio le prime ore di sviluppo dell'embrione che, abbandonato lo stadio di monocellularità, si avvia a diventare un pluricellulare sempre più organizzato. Racchiuso nel suo involucro trasparente, si può osservare lo zigote dividersi in due cellule figlie e queste suddividersi ancora, e ancora fino a raggiungere il numero di otto quando un radicale cambiamento di forma ci induce ad arrestare la nostra osservazione e aprire una nuova serie di indagini ed approfondimenti.

Nel periodo dello sviluppo che va dallo stadio di zigote allo stadio di otto cellule l'embrione ha l'aspetto di una bolla trasparente contenente dei chicchi sferici, le cellule. Per questa loro forma e per il fatto che i loro contatti sono relegati alle limitate superfici compatibili con la sfericità, le cellule sembrano esprimere una certa riluttanza alla relazione reciproca. Ad una accurata analisi morfologica e

⁴¹ L. RAUNICH, G. GIUDICE, H. MANELLI, *Biologia dello sviluppo*, Piccin, Padova 1998, 87-104.

⁴² Cfr L. MARGULIS, R. FESTER (Eds.), *Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation*, MIT Press, Cambridge (Massachusetts) and London 1991.

⁴³ L. WOLPERT, *Il trionfo dell'embrione*, Sperling & Kupfer, Milano 1993, 228.

biochimica, inoltre, esse risultano identiche: non è ancora iniziato il processo del differenziamento che porterà di lì a poco alla comparsa di tessuti specializzati ⁴⁴.

Tutto farebbe pensare ad una fase dello sviluppo durante la quale il processo della moltiplicazione delle cellule prevale su quello della loro organizzazione. E' come se l'embrione in un primo momento si preoccupasse soprattutto di aumentare il numero delle sue cellule, rimandando a tempi successivi l'impegno della loro organizzazione. Di primo acchito sembrerebbe, insomma, trattarsi di un 'ammasso' più che di un 'sistema' di cellule.

L'analisi bio-molecolare delle superfici di contatto, però, non conferma questa impressione. Al contrario, dimostra che nei punti in cui le cellule si toccano si stabilisce tra loro un dialogo di natura chimica che porta prima al reciproco riconoscimento e poi all'unione. Questo dialogo è affidato soprattutto ad una famiglia di proteine di membrana, le *caderine*, che hanno l'aspetto di lunghe catene sub-microscopiche sporgenti dalle cellule ⁴⁵. Se le parti terminali delle caderine di una cellula incontrano quelle di una cellula sorella adiacente avviene il riconoscimento reciproco seguito immediatamente dalla saldatura. Le cellule coinvolte si ritrovano, così, legate l'una all'altra. E' stato dimostrato che nell'embrione umano, come negli altri vertebrati, caderine specifiche sono presenti ed attive già allo stadio di due cellule ⁴⁶. Questa tipologia di organizzazione cellulare è la medesima che rimarrà attiva nei tessuti epiteliali per il resto della vita.

La conclusione obbligata di tutte queste osservazioni è che le cellule dell'embrione, fin dagli stadi più precoci dello sviluppo, sono ben lontane dal formare dei 'mucchi'. Al contrario, sono legate da una rete di interazioni che, partendo dal reciproco riconoscimento, giungono a conferire unità a tutto il sistema. L'embrione precoce non si preoccupa solo di aumentare il numero delle sue cellule ma anche di organizzarle in sistema e la rete di interazioni basata sulle caderine costituisce la sua prima, vera struttura di integrazione cellulare.

7. Una novità nell'embrione di otto cellule

⁴⁴ Cfr G.L. FLANAGAN, *Prima di nascere*, Mondadori, Milano 1996.

⁴⁵ S.F. GILBERT, *Biologia dello sviluppo*, Zanichelli, Bologna 2005, 69.

⁴⁶ ID, *Biologia dello sviluppo*,... , 70; U. DREWS, *Testo atlante di embriologia*, Zanichelli, Bologna 1996, 186.

Proseguendo l'osservazione dell'embrione che si sviluppa, giunti allo stadio di otto cellule si assiste ad una spettacolare variazione della morfologia embrionale. Le cellule, inizialmente sferiche, si adattano l'una contro l'altra formando un compatto aggregato sferico nel quale è assai difficile continuare a distinguere le singole cellule. Non a caso questo processo è chiamato *compattazione* embrionale ⁴⁷.

Il cambiamento di forma delle cellule che porta ad una loro adesione più estesa suggerisce che durante i pochi minuti del processo di compattazione si verifichi un evento importante nel cammino verso una compiuta pluricellularità. Ciò che avviene è mostrato dalla microscopia elettronica: l'adesione stretta di ogni cellula alle sue vicine è accompagnata dall'apertura di canali che, attraversando le pareti delle cellule adiacenti, fanno sì che il contenuto di ognuna si ritrovi in continuità con quello delle vicine. Attraverso questi canali, tecnicamente detti *giunzioni comunicanti*, avvengono numerosi scambi di materiali e di segnali sia chimici che elettrici⁴⁸. Grazie a questa rete di scambi, ogni cellula 'conosce', in ogni istante, lo stato in cui si trovano le altre.

Con la compattazione dell'embrione, allora, alla struttura di integrazione delle caderine se ne aggiunge un'altra ben più efficiente: le giunzioni comunicanti che renderanno possibili, in breve tempo, quei processi differenziativi e quei movimenti coordinati che non cessano di destare meraviglia e curiosità negli embriologi ⁴⁹.

Con lo straordinario aumento del numero di cellule e con l'inizio del differenziamento cellulare, però, anche questa struttura dovrà essere ulteriormente affiancata da altre più efficienti: il *sistema sanguigno* e quello *nervoso*.

8. *L'integrazione cellulare operata dal sangue*

Nell'embrione umano, all'inizio della quarta settimana dello sviluppo, il cuore inizia a battere e prende così avvio la circolazione sanguigna ⁵⁰. Il sangue è un tessuto di consistenza liquida, mantenuto in movimento dalla pompa cardiaca all'interno di una fitta rete di vasi e capillari che raggiunge tutte le regioni dell'organismo. Un'idea della ricchezza della rete è data dalla lunghezza stessa

⁴⁷ S.F. GILBERT, *Biologia dello sviluppo*, Zanichelli, Bologna 2005, 326.

⁴⁸ ID, *Biologia dello sviluppo...*, 326.

⁴⁹ Cfr G.M. EDELMAN, *Topobiologia. Introduzione all'embriologia molecolare*, Bollati Boringhieri, Torino 1993.

⁵⁰ U. DREWS, *Testo atlante di embriologia*, Zanichelli, Bologna 1996, 68.

dei vasi e dei capillari che, per un adulto di medie dimensioni, è stimata in circa 2.000 Km!

Trasportati dal sangue, giungono alle cellule dell'intero organismo l'ossigeno per la respirazione, le sostanze necessarie alla nutrizione, le difese contro gli attacchi degli agenti esterni ed anche un numero straordinariamente elevato di molecole grandi e piccole che fungono da segnali chimici. Emessi come messaggi da cellule e tessuti a ciò adibiti, trasportati dal flusso ematico, i segnali giungono alle cellule destinarie, che possono trovarsi anche in regioni distanti dell'organismo, e le stimolano a compiere determinate operazioni. Esempi universalmente noti sono gli ormoni, che costituiscono la base di molte nostre pulsioni e sono la causa determinante di molti nostri comportamenti.

Ai messaggi 'in andata' seguono poi quelli 'di ritorno'. Le cellule e i tessuti che hanno modificato il loro comportamento a seguito dell'ordine giunto tramite il sangue, utilizzano lo stesso mezzo per segnalare al mittente l'avvenuta mobilitazione. Si origina così un complesso dialogo chimico che è la condizione necessaria perché si stabilisca e si conservi lo stato di equilibrio del corpo e lo stato di ordine dell'organismo ⁵¹.

Il sangue è da considerare, allora, una struttura di integrazione che va a sommarsi, a partire dalla quarta settimana dello sviluppo, alle altre strutture già presenti. Dal sangue può essere integrato un numero virtualmente illimitato di cellule. A suo carico però esiste un handicap: la relativa lentezza nel trasportare i segnali.

9. L'integrazione cellulare operata dal sistema nervoso

Se la lentezza di trasmissione dei segnali legata al suo funzionamento 'idraulico', costituisce una seria limitazione all'attività di integrazione svolta dal sangue, il sistema nervoso supera questo limite grazie al suo funzionamento 'elettrico'. Il sistema nervoso non ha la consistenza liquida del sangue ma si presenta come una fitta rete tridimensionale di cellule ferme, capaci di trasmettere segnali di natura elettrica. E' noto che la velocità di propagazione degli impulsi elettrici è di molto superiore a quella di un liquido che fluisce all'interno di un vaso ed è questa capacità di utilizzare un mezzo di comunicazione più veloce che fa del sistema nervoso una struttura di integrazione cellulare nettamente più efficiente del sistema sanguigno. Questo

⁵¹ F. MANDELLI, A. FERRARI, *Il sangue in L'universo del corpo*, V, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma 1998, 396-405.

fatto comunque non genera concorrenza tra i due sistemi. La loro, piuttosto, è una fattiva collaborazione in ambiti di attività che sono tra loro complementari.

Nell'embrione, il sistema nervoso nasce come *piastra neurale* nel corso della terza settimana dello sviluppo e si trasforma in *tubo neurale* durante la quarta. Negli stadi successivi una serie molto complessa di trasformazioni porta gradualmente alla formazione del sistema nervoso centrale e di quello periferico così come li osserviamo nell'adulto.

Per la sua struttura e il suo funzionamento, il sistema nervoso è altamente plastico; è in grado cioè di modificare il suo assetto in risposta agli stimoli che riceve. Il sistema nervoso centrale riceve i segnali da quello periferico e, dopo averli elaborati, invia segnali di risposta adeguati. Attraverso la via nervosa non solo vengono unificati, e quindi ricevono risposta, gli stimoli interni all'organismo ma anche quelli che provengono dall'ambiente esterno. Il sistema nervoso quindi non è solo un'efficiente struttura di integrazione delle cellule dell'organismo, ma allarga alla realtà circostante i suoi campi di azione. La mente umana, quale espressione dell'attività cerebrale, è la più evidente dimostrazione dell'opera ordinatrice del sistema nervoso che non è limitata alla sola comunità delle cellule che compongono l'organismo ma si spinge ben oltre, raggiungendo i confini della stessa realtà cosmica.

10. *Conclusione*

La curiosità del biologo che ha seguito le tracce delle strutture di unificazione attive nell'uomo nel suo auto-costituirsi come individuo pluricellulare è, a questo punto, soddisfatta. L'ontogenesi umana è in realtà una successione di sistemi cellulari sempre più complessi il cui stato ordinato è assicurato da strutture di integrazione di tipo diverso a seconda del numero e delle caratteristiche degli elementi che formano il sistema. Non c'è nessuno stadio dello sviluppo in cui, per l'assenza di un principio organizzativo, le cellule appaiano come dei semplici ammassi.

Sorge, a questo punto, una serie ulteriore di domande riguardanti la fine della vita. Proprio come l'opera di costruzione del pluricellulare uomo a partire dallo zigote può essere utilmente letta alla luce dell'attività coordinata di molteplici strutture di integrazione, non potrà lo stesso criterio di lettura far luce anche sui processi in atto nell'uomo che muore?

Questo però è un altro argomento che, pur interessandoci da vicino, non è ora il caso di affrontare.

NEURONI, RETI ED EMERGENZE

CARLO CIROTTO

Conferenza tenuta all'Università Urbaniana il 16-3-2010

1. Introduzione

Una delle caratteristiche più avvincenti degli esseri viventi è la plasticità, proprietà che consente agli individui di svilupparsi negli ambienti più diversi e alle specie di mutare durante i tempi lunghi dell'evoluzione. Tale proprietà è di solito legata a configurazioni a rete, presenti nelle strutture biologiche a tutti i livelli di complessità. È tipico di una struttura a maglie, infatti, offrire percorsi alternativi ai flussi di energia, materia e informazione che l'attraversano. La stessa teoria del "Darwinismo neuronale" proposta da G. Edelman per spiegare la comparsa di configurazioni funzionali cerebrali durante i processi dello sviluppo embrionale e dell'apprendimento in generale, è basata sull'attivazione e la successiva stabilizzazione, mediante l'uso, di percorsi interni ad una struttura neuronale reticolare. È difficoltoso verificare sperimentalmente il costituirsi di tali percorsi durante la neurogenesi embrionale. È possibile però aggirare la difficoltà studiando il comportamento di strutture reticolari analoghe. Il processo di formazione della rete vascolare ematica, in particolare, viene qui presentato e discusso come possibile campo di verifica della teoria di Edelman, considerata nella sua valenza generale e quindi estensibile a tutte le strutture a rete che conferiscono plasticità allo sviluppo dell'embrione. La costituzione di ordinate strutture reticolari è generalmente accompagnata dalla comparsa di caratteri nuovi, assenti nelle singole maglie della rete ed anche nelle sue primitive configurazioni. Si tratta delle "proprietà emergenti" delle quali vengono qui approfondite alcune peculiarità ed è discussa la loro applicabilità alle problematiche mente-cervello.

2. La plasticità della vita

Una delle caratteristiche degli esseri viventi, presente nel mondo inorganico solo in forma molto attenuata, è la *plasticità*, la capacità cioè di modificare i propri equilibri interni in modo da rispondere, nel modo più efficace, alle

innumerevoli sfide che l'ambiente esterno ed interno continuamente pongono. È grazie ad essa se moltissime forme di vita crescono e prosperano anche in ambienti impossibili: acque caldissime, elevate concentrazioni saline, acidità o basicità estreme, ecc. La vita ha così conquistato tutti gli habitat del pianeta tanto che non esiste regione, dal fondo degli oceani agli strati più alti dell'atmosfera, che non presenti una qualche traccia di attività biotica (Morpurgo, 1991).

La vita riesce ad affrontare efficacemente tali sfide impossibili attivando le proprietà "di riserva" dei suoi componenti, quelle normalmente non utilizzate appieno ma passibili di esserlo al mutare delle condizioni. Essendo la gamma delle proprietà dei singoli costituenti più estesa di quella delle proprietà effettivamente impiegate nella costituzione del sistema stesso, è sull'attivazione delle proprietà poco o per nulla utilizzate che l'organismo si basa per ristabilire la sua unità messa alla prova.

Un'immagine può aiutarci a cogliere concetti che, ad un primo impatto, possono apparire ostici; si tratta della rete con le sue maglie fatte da nodi e da fili che li collegano. Grazie a questa sua struttura, la rete può organizzare e riorganizzare il suo funzionamento ogni qual volta se ne presenti la necessità.

Un esempio di plasticità che offre l'opportunità di chiarire, approfondendoli, i principi appena enunciati è la modalità di formazione del sistema sanguigno durante lo sviluppo embrionale, così come in questi ultimi tempi è stata chiarita dal gruppo di ricerca di cui faccio parte (Ciotto *et al.*, 2000, p. 11).

2.1. La rete dei vasi sanguigni

A chi guardi, anche superficialmente, un embrione di pollo a 3-4 giorni di sviluppo non può sfuggire il fatto che il corpo embrionale è in continuità con una vasta membrana adagiata sopra il tuorlo – il sacco del tuorlo – solcata da una fitta rete di vasi sanguigni. Mettendo a confronto più embrioni, si nota anche la grande somiglianza nella forma delle ramificazioni vascolari. È identica soprattutto la disposizione dei grossi vasi, tanto da suggerire a più di un embriologo che la configurazione della rete vascolare sia sotto il controllo diretto dei geni.

Una tecnica istologica semplice ed efficace ha permesso di seguire, con visioni panoramiche successive, il processo di formazione del sangue e dei vasi sanguigni fin dall'inizio. A circa 30 ore di sviluppo iniziano ad apparire,

variamente distribuiti nel sacco del tuorlo, alcuni ammassi cellulari di diversa grandezza nei quali le cellule periferiche e quelle interne subiscono differenti destini: quelle periferiche si appiattiscono, saldano insieme i loro bordi e formano sottili pareti di contenimento mentre quelle interne si differenziano in globuli rossi e plasma sanguigno. Con il trascorrere del tempo e l'accrescersi delle strutture, le pareti delle isole adiacenti giungono in contatto e si fondono formando una rete irregolare di cavità contenenti il fluido sanguigno. Ben presto le contrazioni cardiache spingono il sangue a farsi strada all'interno di questa intricata rete scegliendo, in accordo con le leggi della dinamica dei fluidi, i percorsi meno tortuosi e di minor resistenza. Alcune cavità ne risultano prescelte e vengono inondate dal sangue in movimento mentre altre ne rimangono prive.

Nelle ore che seguono, la configurazione di quest'abbozzo iniziale di circolo si definisce ulteriormente mediante la formazione di pareti vasali supplementari che, quasi abbracciando il flusso sanguigno, si interpongono tra la massa liquida in movimento e le pareti delle cavità preesistenti. La strategia dell'embrione sembra essere quella di costruire la rete vascolare definitiva solo dopo che il sangue stesso abbia scelto la propria strada. Pensa poi il fluire continuo del sangue a rimodellare la forma dei vasi in modo che assumano quelle configurazioni arrotondate e prive di asperità che li contraddistinguono nella loro forma definitiva.

2.2. La rete dei nervi

È interessante notare che i processi appena descritti, coinvolti nella formazione dei vasi sanguigni embrionali, sono assai simili a quelli posti da Edelman a base della formazione e della stabilizzazione delle configurazioni neuronali cerebrali (Edelman, 1995; Edelman & Tononi, 2000). Infatti, anche l'ipotesi di Edelman, generalmente nota come *selezione dei gruppi neuronali* o *darwinismo neurale*, prevede in un primo momento la formazione di una fitta rete primaria di neuroni che entrano in contatto casuale tra loro. Solo in un secondo momento, gli impulsi nervosi provenienti dall'interno e dall'esterno dell'organismo fanno sì che vengano delineati dei circuiti preferenziali nell'ambito della rete primaria, con il rafforzamento dei contatti coinvolti. In un terzo momento, infine, la correlazione di diverse configurazioni neurali in un'unica mappa più complessa è assicurata dal reiterato passaggio di impulsi nervosi lungo i percorsi di connessione sia all'interno di ogni configurazione di rete sia tra le stesse diverse configurazioni.

L'evidente somiglianza tra l'ipotesi di Edelman riguardante la definizione delle mappe neurali e il processo di formazione della rete vascolare embrionale, da noi studiato, non è un fatto puramente casuale, come potrebbe apparire a chi si limitasse a sottolineare unicamente la differenza esistente tra una rete in cui scorrono liquidi ed una rete in cui passano impulsi di natura elettrica. In ambedue i casi, infatti, le specifiche configurazioni assunte dal flusso dipendono da fattori estranei alla rete stessa: nel caso dei vasi sanguigni dipendono dalla posizione del cuore e dalla sua gittata, nel caso della rete neurale dipendono dalla dislocazione, dalla sensibilità e da altre caratteristiche fisiologiche degli organi di senso esterni ed interni. Nell'uno e nell'altro caso, poi, il risultato finale è il disegno e la stabilizzazione di una rete di connessioni che fondano un comportamento di coerente risposta a stimoli esterni alla rete stessa.

2.3. Reti di altro tipo

La plasticità dei vivente si basa soprattutto su sistemi strutturati a rete. Se ne trovano di molti tipi e a tutti i livelli di complessità (Capra, 1997). Al livello cellulare, ad esempio, sono significative le fitte reti delle reazioni metaboliche, che permettono ai processi chimici indispensabili alla vita di poter seguire, se necessario, tragitti alternativi pur giungendo ai medesimi risultati finali. Al livello dei tessuti, le interazioni di tipo chimico e di tipo fisico tra cellule adiacenti formano anch'esse reti estese e fitte il cui risultato è di stabilire interrelazioni unificanti. Al livello dei singoli organi e dell'intero organismo sono fin troppo evidenti le reti "idrauliche" della linfa e del sangue o la rete "elettrica" dei nervi. Al livello di comunità super-individuali è sufficiente citare le reti alimentari come esempi di reti di interazioni materiali o le reti delle comunicazioni interindividuali come esempi di reti di interazioni simboliche.

Responsabili dello stato di integrazione intra- ed inter-sistemica sono sempre strutture a rete. I materiali che ne costituiscono gli elementi possono differire anche significativamente da caso a caso ma le relazioni che li legano sono fondamentalmente dello stesso tipo, a rete. Sono le strutture a rete che permettono agli organismi e alle loro comunità di essere plastici, di rimodellare cioè la loro struttura biologica in conformità agli stimoli che provengono dall'ambiente e di utilizzare tali rimodellamenti per fornire risposte coerenti (Robertson, 1999).

E che dire delle proprietà delle reti in quanto tali? Dobbiamo attenderci proprietà nuove, di tipo emergente, dipendenti, più che dalla loro stessa natura, dalle modalità secondo cui i componenti sono legati insieme?

La risposta a questa domanda è decisamente positiva. È sufficiente prendere in considerazione le reti *scale free* studiate dal gruppo di Barabási per convincersene (Barabási, 2004). Si tratta di reti le più diverse: da quelle biologiche delle relazioni fra attivazioni geniche o dei flussi metabolici o del cablaggio neuronale, alla struttura del web come rete informatica simbolica, alle relazioni fra gli attori di Hollywood in termini di partecipazione agli stessi film. Ciò che unisce tutte queste reti è il fatto di possedere la medesima struttura di collegamento: pochi nodi dotati di moltissimi legami e moltissimi nodi dotati solo di pochi legami con i vicini più prossimi. Detto in maniera matematicamente più corretta, in tali reti la probabilità di un nodo scelto a caso di avere un certo numero di legami segue una *legge di potenza*.

Una conseguenza della distribuzione a legge di potenza è che i fenomeni da essa regolati appaiono *scale free*, cioè privi di una scala privilegiata di osservazione (come quella del valore medio e della deviazione standard nelle distribuzioni normali). Riportato all'architettura dei sistemi molecolari di regolazione della cellula, significa che non esiste un livello centrale da cui tutti gli altri ricevono istruzioni ma che ogni livello si organizza da sé mantenendo legami con gli altri attraverso quegli elementi di snodo, capaci di un elevato numero di collegamenti, che assicurano la coerenza del tutto.

Ai casi studiati da Barabási, vanno aggiungendosene tanti altri tratti dal campo della biologia. Tutti trovano spiegazione nel modello di funzionamento a rete, nel quale ciò che è d'importanza cruciale non è tanto la struttura fine specifica di ogni singolo elemento, ma la capacità di inter-relazione (Kauffman, 2005).

La rete che ci interessa più da vicino, quella che riveste per noi un'importanza particolare, è ovviamente la rete neurale in quanto substrato biologico del comportamento tipico dell'uomo, quello che siamo soliti qualificare come "culturale". I dati sperimentali ottenuti con le moderne tecniche neurobiologiche non lasciano alcun dubbio sul diverso coinvolgimento delle aree cerebrali corticali nelle varie tipologie di attività culturali (Maffei & Fiorentini, 2000). È stato anche possibile farne un mappaggio che si va facendo di giorno in giorno più completo. È grazie all'attività della rete dei nostri neuroni cerebrali se possiamo godere di un'opera d'arte o concepire un'idea geniale o decidere un comportamento. Ed è al livello delle configurazioni neurali che va cercata la base

biologica delle nostre peculiarità psico-intellettive, non al livello dei singoli elementi della rete (i neuroni) né, tanto meno, ai livelli ancora più elementari della biochimica o della biofisica cellulari. Neanche il genoma ha il potere di influenzare direttamente i contenuti delle nostre attività umane. Il corretto funzionamento del genoma e del proteoma è solo la condizione indispensabile perché i singoli neuroni funzionino al meglio. La rete però è un'altra cosa e il buon funzionamento dei singoli elementi/neuroni è solo condizione necessaria, ma non sufficiente, per il buon funzionamento della rete nel suo complesso.

Le configurazioni della rete possono, invece, essere influenzate *dall'alto*, dal livello *culturale*. È ciò che l'uomo ha sempre fatto in maniera indiretta nel corso della storia e che oggi riesce a fare in modo mirato orientando, con le nuove tecniche manipolative, la stessa evoluzione biologica.

3. Emergenze

Il funzionamento delle strutture a rete è spesso accompagnato dalla comparsa di caratteristiche nuove, spesso chiamate *emergenze*. Questo particolare aspetto ha rappresentato per lungo tempo un problema molto dibattuto non solo in biologia ma in tutti i campi della scienza. Il motivo sta nel fatto che l'emergenza rappresenta la differenza più significativa tra il pensiero *riduzionista*, dominante, e quello *olistico*, minoritario.

Per i riduzionisti, i sistemi non sono altro che la somma dei loro componenti e, di conseguenza, le loro proprietà sono soltanto la somma delle proprietà dei singoli componenti. Non esistono proprietà nel tutto che non siano già presenti nelle parti. Per i sostenitori dell'olismo, invece, le proprietà e le modalità di azione di un sistema sufficientemente complesso, come quelli a rete, non si possono compiutamente spiegare con la semplice somma delle proprietà e delle modalità di azione dei suoi singoli componenti. Per costoro le proprietà emergenti esistono perché «il tutto è più che la somma delle parti»⁵².

Ovviamente, tra riduzionisti ed olistici non è mai corso buon sangue. I riduzionisti sono convinti che l'emergenza sia un criterio metafisico che inquina irrimediabilmente la falda profonda e pura della scienza. I sostenitori del concetto di emergenza, dal canto loro, insistono che essa, lungi dall'aver una connotazione metafisica, è da considerare semplicemente come una proprietà immanente della natura e sottolineano il fatto che nuove proprietà effettivamente

⁵² Con questa frase, considerata l'emblema delle posizioni olistiche, si vuol intendere la non riducibilità delle proprietà di un sistema alla pura sommatoria delle proprietà degli elementi che compongono il sistema stesso.

emergono ogni qual volta un sistema complesso viene originato da componenti più semplici.

Si può, in concreto, affermare l'esistenza di novità qualitative, emergenti dal dinamismo universale? Per un biologo (ma anche per un fisico o un chimico) la risposta positiva sembrerebbe scontata. Basta infatti paragonare lo stato della nostra Terra in tre momenti diversi della sua storia: quando era ancora un pianeta privo di vita, quando ospitava solo popolazioni batteriche e quando, ai nostri giorni, alla prorompente varietà dei viventi complessi si sono aggiunti gli organismi pensanti, cioè noi. C'è una grande differenza di tipo qualitativo tra il primo, il secondo e il terzo momento! È evidente, quindi che il nostro universo è stato di fatto capace, almeno sulla scala lunga dell'evoluzione geologica e biologica, di produrre novità. Quanto meno la vita e il pensiero.

Una volta evidenziata l'emergenza di fatti nuovi sulla scala dei miliardi di anni di storia della Terra, ci si può chiedere se una analoga osservazione possa essere fatta anche ad una scala spazio-temporale che sia più consona all'esperienza umana. Gli emergentisti, ovviamente, rispondono di sì, portando esempi di eventi che vengono definiti emergenti e dei quali è invece opportuno operare una rivisitazione critica per far chiarezza su quelle che paiono essere tipologie diverse di emergenza.

3.1. Emergenze di valore specifico

Per l'autorevolezza di colui che l'ha formulata e per la frequenza con la quale viene citata e fatta propria da autori altrettanto autorevoli non si può non partire dall'argomento pro-emergenza di T.H. Huxley. L'esempio presentato è l'emergere della *liquidità* dell'acqua dalle nature *gassose* dei reagenti idrogeno ed ossigeno (Huxley, 1870, pp. 532-533). In questo caso *emergenza* ha il significato di cambiamento nelle proprietà chimico-fisiche associato al cambiamento di stato delle sostanze coinvolte nella reazione. La liquidità in cui si trova l'acqua a temperatura ambiente, però, non è una qualità *nuova* nel senso che l'idrogeno e l'ossigeno ne siano assolutamente privi. Ne sono privi solo alla normale temperatura ambientale ma è sufficiente abbassarla perché, in corrispondenza di un punto critico, compaia la "liquidità" anche nell'idrogeno e nell'ossigeno. Ciò che nell'acqua è diverso è solo la condizione fisica (la temperatura) alla quale avviene la liquefazione. Ci troviamo cioè di fronte ad una diversa modulazione di una qualità comune alle molecole in confronto.

Un tale tipo di emergenza sarebbe definita da R. Van Gulick, filosofo e specialista di queste problematiche, «emergenza di valore specifico» (Van Gulick, 2001).

3.2. Emergenze moderate

Per incontrare esempi di proprietà che con minori remore si potrebbero definire *emergenti* è opportuno prendere in considerazione sistemi che per dimensioni vengono apprezzati dai nostri sensi – e quindi appartengono al cosiddetto *mesocosmo* – ma che sono costituiti da elementi del *microcosmo*, atomi o molecole. Pensiamo ad un cristallo. È fatto da particelle (ioni, atomi, molecole) legate le una alle altre da un reticolato di interazioni che si ripetono con grande regolarità nello spazio tridimensionale. I cristalli, come tutti i corpi solidi, hanno una proprietà ben nota: la durezza. Per durezza si intende «la resistenza che la faccia di un minerale oppone ad essere scalfita» (Carobbi, 1958, p. 139). La durezza del nostro cristallo, quindi, è una proprietà di un sistema macroscopico che si evidenzia nelle sue interazioni con altri sistemi macroscopici. Se però andiamo a cercare la qualità *durezza* a livello dei singoli componenti del sistema, degli ioni, atomi, molecole che costituiscono il cristallo, ci accorgiamo che la nostra ricerca è priva di senso. È infatti senza senso attribuire questa qualità ai singoli componenti microscopici.

Si può, allora, considerare la durezza come un buon esempio di qualità emergente? Solo in parte. Infatti, mentre non vi è dubbio che la durezza del cristallo sia una qualità del tutto nuova rispetto ai singoli costituenti, tuttavia essa non presenta i caratteri dell'imprevedibilità. La struttura del reticolo cristallino, infatti, è in grado di giustificare appieno la durezza del cristallo. E così, conoscendo la struttura del reticolo è possibile prevedere – e oggi anche programmare – la durezza del cristallo. Il diamante, ad esempio, che è al vertice della scala delle durezze, è tale perché il suo reticolo cristallino è, come dicono i cristallografi, *cubico a facce centrate* (Carobbi, 1958, p. 267), mentre la grafite, che insieme al talco è il cristallo meno duro, è tale perché il suo reticolo è *diesagonale bipyramidale* (Carobbi, 1958, p. 268).

Van Gulick definirebbe la durezza «proprietà moderatamente emergente» (Van Gulick, 2001).

È importante notare che sia il sistema cristallino *diamante* che il sistema *grafite* hanno come unico componente chimico il carbonio. Differiscono tanto profondamente in durezza non perché siano fatti da materiali diversi ma perché

sono diversamente organizzate nello spazio le interazioni atomo-atomo. Le proprietà del sistema in quanto unità, insomma, dipendono dal tipo di interazione che si stabilisce tra i singoli costituenti materiali. Questi ultimi, d'altro canto, sono importanti in quanto capaci di stabilire tra loro quelle determinate tipologie di relazioni. Per comprendere le proprietà di un sistema - semplice come un cristallo o di complessità più elevata – quindi, non basta elencarne i costituenti. Questa operazione è immensamente meno importante della descrizione del come interagiscono i costituenti stessi, cioè della ragnatela di relazioni che sono capaci di intessere tra loro.

3.3. *Emergenze radicali*

Gli esseri viventi, la cui forma più semplice è rappresentata dalla cellula, sono sistemi complessi. Un sistema complesso è un insieme in cui gli elementi subiscono continue modifiche che sono singolarmente prevedibili, ma di cui non è possibile, o è molto difficile, prevedere uno stato futuro (Longo, 2001, p. 111). Solo il sistema *in toto* ha i caratteri della vita: le parti che lo costituiscono, prese singolarmente, ne sono prive. È assurdo attribuire ad esse, in quanto singole, la qualità di essere vive (Buiatti, 2000, p. 16). Solo quando sono tutte insieme, ingabbiate, per così dire, in una ben precisa ragnatela di rapporti, emerge la qualità *vita*.

Si può, allora, parlare di *emergenza* nel caso della vita? La risposta non può che essere affermativa e, in questo caso, anche nel senso più pieno del termine. Infatti, non solo assistiamo alla comparsa di una novità, ma tale novità è così sorprendente da essere anche totalmente imprevedibile. Nessuno, infatti, pur conoscendo alla perfezione i singoli costituenti molecolari di una cellula e lo schema delle loro interazioni – ipotesi ben più fantastica del demone di Laplace! – potrebbe prevedere le proprietà vitali del sistema.

Secondo la classificazione di Van Gulick, siamo in presenza di una «emergenza radicale» (Van Gulick, 2001).

3.4. *Un'emergenza speciale*

Un esempio di emergenza radicale, citato assai di frequente, è quello della mente/coscienza come qualità emergente della rete neurale (Geary, 2005).

L'argomento, indubbiamente pieno di fascino, è, esso stesso, di estrema complessità. La rapida espansione delle neuroscienze ha messo a disposizione

una massa inimmaginabile di fatti, dati, risultati sperimentali riguardanti tutti i livelli organizzativi del sistema nervoso, da quello sub molecolare a quello macroscopico anatomico e comportamentale.

Prendiamo ad esempio il cervello. Con i suoi cento miliardi di neuroni, che esibiscono cento trilioni di connessioni, il cervello umano è l'oggetto più complesso dell'universo conosciuto – fatta eccezione, ovviamente, per l'interazione dei sei miliardi circa di simili cervelli e dei loro possessori all'interno della rete planetaria degli scambi culturali.

Gli anatomisti ci mostrano nei minimi particolari i singoli neuroni e la loro intima organizzazione ingrandendoli mezzo milione di volte o più; i biologi molecolari, impegnati a localizzare molecole specifiche all'interno dei neuroni, vedono il cervello come un complesso diagramma di cablaggio in cui l'esperienza è codificata in termini di alterazioni di determinate vie e contatti nervosi; gli elettrofisiologi e gli studiosi di *brain imaging* traducono in immagini vivide ciò che, all'inizio del secolo scorso, Sherrington definiva «telaio incantato» di mutevoli oscillazioni elettriche; i neuroendocrinologi ci presentano le funzioni cerebrali come costantemente influenzate da onde di ormoni che, raggiungendo ciascun neurone, eccitano i suoi recettori in parossismi di attività (Vincent, 2008).

Il problema, tuttora aperto, è come riunire questa enorme massa di dati in una teoria unitaria e coerente. Impresa non facile, anche perché il cervello è ricco di comportamenti paradossali: è una struttura fissa e insieme un fascio di processi dinamici in parte correlati e in parte indipendenti; le sue proprietà sono al tempo stesso localizzate e delocalizzate, riferibili cioè a ristretti gruppi di cellule per certi aspetti e al funzionamento dell'intero sistema per altri. Di alcuni di questi gruppi cellulari si è raggiunta una buona conoscenza ma sul modo con cui si relazionano tra loro e con la restante totalità del cervello, si è ancora al livello di supposizioni (Rose, 2005).

Sarebbe interessante applicare anche a questi sconfinati campi della complessità il criterio dell'emergenza e sono convinto che si otterrebbero risultati significativi. L'emergenza, infatti, diviene evidente nel passaggio dai singoli componenti alla totalità organizzata.

Non è il caso però di farsi prendere da facili entusiasmi ed applicare automaticamente al cervello i criteri che pure hanno dato buoni risultati con i cristalli. Il cervello, infatti, è un sistema costituito da cellule e le cellule sono esseri viventi dotati, oltre che di uno straordinario ordine strutturale e funzionale,

anche di una spiccata *autonomia* tipica degli esseri viventi, che ben si esprime nella sostanziale imprevedibilità delle loro reazioni a stimoli esterni.

Bibliografia

Barabási, A.L. (2004) *Link. La scienza delle reti*, tr. it., Einaudi, Torino.

Capra, F. (1997) *La rete della vita*, tr. it., Rizzoli, Milano.

Buiatti, M. (2000) *Lo stato vivente della materia*, UTET, Torino.

Carobbi, G. (1958) *Mineralogia*, Sansoni, Firenze.

Cirotto, C., I. Arangi e L. Barberini (2000) "Yolk sac vascularization and erythropoietic sites in early embryos of birds", *Animal Biology* X: 11.

Edelman, G.M. (1995) *Darwinismo neurale. La teoria della selezione dei gruppi neurali*, tr. it., Einaudi, Torino.

Edelman, G.M. E G. Tononi (2000) *Un universo di coscienza. Come la materia diventa immaginazione*, tr. it., Einaudi, Torino.

Geary, D.C. (2005) *The Origin of Mind. Evolution of Brain, Cognition, and General Intelligence*, American Psychological Association, Washington DC.

Huxley, T.H. (1870) "Lay Sermons. Addresses and Reviews", *British Quarterly Review* 104: 532-533.

Kauffman, S.A. (2005) *Esplorazioni evolutive*, tr. it., Einaudi, Torino.

Longo, G.O. (2001) *Homo Technologicus*, Meltemi, Roma.

Maffei, L. e A. Fiorentini (2000) *Arte e cervello*, Zanichelli, Bologna.

Morpurgo, G. (1991) *La natura della vita*, Zanichelli, Bologna.

Robertson, I.H. (1999) *Il cervello plastico*, tr. it., Rizzoli, Milano.

Rose, S. (2005) *Il cervello del ventunesimo secolo. Spiegare, curare e manipolare la mente*, tr. it., Codice, Torino.

Van Gulick, R. (2001) "Reduction, emergence and other recent options on the mind/body problem", *Journal of Consciousness Studies* 8(9/10): 1-34.

Vincent, J.D. (2008) *Viaggio straordinario al centro del cervello*, tr. it., Ponte alle Grazie, Milano.