

PARTE SECONDA

SCRITTI SCIENTIFICI

Il concetto di artificiale¹

1. Importanza del concetto

Sono sotto gli occhi di tutti numerose e gravi modificazioni subite dal nostro pianeta negli ultimi decenni ad opera dell'uomo; molte altre ci sono riferite a ritmo crescente dai grandi mezzi di informazione e non si sta profilando alcuna chiara inversione di tendenza. Perciò queste modificazioni, assieme alle potenzialità non ancora dispiegate (in particolare a quelle delle armi atomiche), contribuiscono a rendere il futuro precario come mai lo è stato, incidendo profondamente sulla condizione umana. Tanto più che tutto ciò appare in stridente contrasto con le promesse della scienza e con le capacità raggiunte nel dominio delle forze naturali.

Questi temi sono stati spesso affrontati per descrivere e denunciare i pericoli che la situazione venutasi a creare sulla Terra comporta per la salute degli uomini, per la qualità della loro vita, per l'assetto delle società e i rapporti fra gli Stati. Sono state formulate previsioni, sono state prospettate soluzioni alternative a quelle intraprese dal potere poli-

1. Questo scritto costituisce la rielaborazione della parte più teorica della tesi di perfezionamento dell'autore, M. R., presso la Scuola di perfezionamento in Metodologia della ricerca filosofica e Filosofia delle scienze dell'Università di Padova. Relatore della tesi, discussa il 25.11.1981, è stato il prof. Massimo Aloisi [n.d.A.].

tico ed economico; ma anche gli studi più approfonditi si sono generalmente attenuti alla concretezza di fatti e di progetti particolari.

Tale atteggiamento è perfettamente legittimo e per molti versi auspicabile, ed è il più efficace per influire su scelte contingenti o di medio periodo, ma può diventare pericoloso quando viene elevato a filosofia. Io ritengo opportuno (sperando che non sembri solo ambizioso e che non porti a risultati scontati) esplorare proprio il terreno finora trascurato, quello che riguarda gli aspetti più strettamente teorici e generali di tale tematica, al fine di favorire una visione unitaria e complessiva dei problemi e delle soluzioni.

Un modo comune di avvicinarsi alla comprensione profonda di un fenomeno è quello di ricercarne le cause. Per quanto riguarda il rapido deterioramento della situazione fisica del nostro pianeta esse sono state riconosciute, di volta in volta, nell'incuria dell'intera umanità, nella sovrappopolazione, nel benessere, nell'aggressività ovvero nella tendenza individuale e collettiva ad emergere, nel capitalismo, nella produzione industriale. Più che passare ad una disamina delle cause elencate, alcune delle quali palesemente ingenue, voglio rimarcare che fra le cause di modificazioni di così ampia portata vanno inevitabilmente annoverate in posizione preminente le scelte politiche. Queste possono essere ricondotte a loro volta, in tutto o in parte, alla sollecitazione di fattori economici. Per coloro che ritengono che le responsabilità competano esclusivamente a quella particolare modalità produttiva che va sotto il nome di industria e alla particolare strutturazione sociale indotta dal capitalismo, si osserva che se tutto si fosse ridotto a questo, che peraltro non è poco, non si vede come conseguenza necessaria l'avvio ad una catastrofe ambientale. Infatti i più profondi analisti delle prime fasi del capitalismo, pur coscienti di questa possibile conseguenza, non ne poterono prevedere le proporzioni; semplicemente, alla denuncia delle conseguenze sociali del capitalismo, si aggiungeva qualche annotazione disgustata sugli abusi di certe fabbriche, sulla vita malsana dei ghetti proletari, sul deturpamento di certe zone prima amene, e così via. Ad essere sottovalutate, in quelle prime analisi, non era tanto la forza del nuovo assetto economico che si avviava a dominare il mondo, quanto la potenza dei mezzi che questo avrebbe avuto a disposizione.

Tali mezzi sono evidentemente, nell'epoca contemporanea, quelli forniti dal progresso tecnologico, il quale non può essere identificato con il capitalismo. Esso è iniziato prima e mantiene tuttora una relati-

va autonomia. Esso possiede anche proprie leggi interne di sviluppo indagate dagli epistemologi e dagli storici della scienza e della tecnica. Esso è favorito, tutto sommato con poche differenze rispetto ai paesi capitalisti, da regimi che più o meno legittimamente si dichiarano anti-capitalisti, ed è per molti versi agognato, come una merce preziosa fonderia di sviluppo e di indipendenza economica e politica, dai paesi sottosviluppati, molti dei quali sono indubbiamente antiimperialisti, se non coerentemente anticapitalisti.

D'altra parte non c'è motivo di credere che la crescita del patrimonio tecnico-scientifico porti inevitabilmente alla conseguenza accennata. I danni più gravi ed estesi sono sempre attribuibili ad un uso massiccio ed indiscriminato di tale patrimonio da parte di chi ne dispone, cioè da parte del potere economico e politico. Qui, tuttavia, intendo occuparmi dell'altro aspetto, delle modalità secondo le quali l'uomo² interagisce con il pianeta sul quale vive e mi preme osservare, innanzitutto, che il suo intervento sulla natura è iniziato ben prima del sorgere della tecnologia, avendo a disposizione soltanto conoscenze empiriche. Quindi, per andare alla radice del fenomeno, conviene indagare un concetto più comprensivo di quello di patrimonio tecnico-scientifico, cioè quello di *capacità di intervento artificiale*. Di questa capacità primordiale la tecnologia costituisce il distillato più raffinato e potente, come la scienza lo è della conoscenza empirica. Indagando il concetto di artificiale si affrontano nei loro aspetti unificanti e fondamentali i fenomeni dai quali sono partito.

Nell'uso corrente *artificiale* viene contrapposto a *naturale*. Si sfugge alla città, agli ambienti artificiali, per entrare in contatto con la natura, con gli ambienti naturali. Si cerca di utilizzare alimenti e terapie mediche più naturali in alternativa a quelli proposti dall'industria, troppo artefatti. Si raccomanda di vivere meno artificiosamente, di essere più naturali e spontanei. In tutti questi casi si rileva una contrapposizione fra naturale e artificiale, e nello stesso tempo un implicito riferimento ad una originaria condizione di natura o, più terra terra, alla vita di solo poche generazioni fa quando, salvo casi molto particolari e prescindendo da altre durezze dell'esistenza, l'inquinamento era sconosciuto, la città a misura d'uomo, il cibo genuino, la gente meno presa da problemi estranei alle sue esigenze più autentiche.

2. Rimane sottinteso che ci si riferisce in particolare a chi detiene il potere.

La contrapposizione fra i due termini, presente nel linguaggio corrente, può essere recuperata con l'avvertenza di non dimenticare che, a rigore, nulla di ciò che esiste, esiste al di fuori della natura. La natura, infatti, può essere identificata con il mondo, il cosmo, l'universo, cioè con tutto ciò che esiste sul piano materiale. A questa accezione si fa riferimento quando, ad esempio, si parla di leggi di natura. A queste leggi è soggetto tutto il mondo fisico, le stelle e le pietre come le macchine. Fra i due ordini di cose e di fatti sussiste un rapporto di appartenenza: l'ordine artificiale appartiene all'ordine naturale, vi è compreso.

Non rimane altro da fare che rassegnarsi al doppio significato di natura e del suo aggettivo. Tuttavia, proprio per il crescente peso sociale che i problemi cui si fa riferimento vanno assumendo, la seconda accezione di natura e naturale sembra ormai desueta e avviata sulla strada dell'abbandono definitivo. L'accezione che comporta la contrapposizione o la reciproca esclusione delle due qualità (naturale e artificiale) si presta a caratterizzare le situazioni che ci interessano senza creare vocaboli nuovi o modificare eccessivamente il significato di quelli correnti. La sua adozione sembra priva di particolari controindicazioni, sia che si sostenga l'irriducibilità delle due qualità, sia che l'artificiale venga riconosciuto solo come un aspetto della natura: l'essenziale è che si possa distinguerlo. Una volta definito ciò che è artificiale, si potrà ritenere naturale tutto il resto, tutto ciò che non è artificiale.

2. Definizioni naturalistiche

Fra i contemporanei, Monod si pone esplicitamente il problema di distinguere gli oggetti artificiali da quelli naturali e lo fa nel primo paragrafo del suo famoso saggio "Il caso e la necessità". I caratteri distintivi invocati sono in primo luogo la regolarità e la ripetizione: regolarità delle forme geometriche e ripetizione in numerosi esemplari. Al fine di escludere dagli oggetti artificiali, come egli ritiene opportuno, le molecole, basterebbe richiedere che tali oggetti fossero macroscopici, ma rimarrebbero sempre cristalli, viventi, alveari, ecc., che soddisfano le prime due condizioni pur essendo palesemente naturali. Bisogna allora invocare un'ulteriore condizione, che Monod individua nella morfogenesi: una morfogenesi non autonoma, ma esterna all'oggetto e realizzata secondo il progetto di un costruttore. Infatti, riprendendo la posizione

di Aristotele, egli scrive che la “struttura macroscopica di un ‘artefatto’ (un raggio di cellette costruito da un’ape, una diga eretta da castori, un’ascia paleolitica o un veicolo spaziale) risulta dall’applicazione ai materiali che lo costituiscono di *forze esterne* all’oggetto stesso”³, ma sostiene anche che, limitandosi a questo, si svuoterebbe “la nozione di oggetto artificiale del suo contenuto essenziale: cioè che tale oggetto si definisce, si esplica innanzitutto mediante la funzione che è chiamato ad espletare attraverso le prestazioni volute dal suo inventore”⁴.

La morfogenesi esterna è propria di alveari, dighe, asce e astronavi, ma non degli altri oggetti citati. La forma di un cristallo, ad esempio, non è plasmata da un agente esterno, come accade per le cellette di un favo, ma è determinata dai rapporti spaziali reciproci assunti spontaneamente dagli atomi in base alle loro geometrie intrinseche. I cristalli e gli altri oggetti citati sono invece esclusi tutti insieme dall’ultimo criterio, che rimane quello veramente essenziale, secondo Monod: gli altri non sono che indizi.

Un criterio di questo genere ha lo svantaggio di essere soggettivo, con tutte le difficoltà relative. Si tratta dello stesso criterio in base al quale Marx definisce l’uomo come quella specie che si distingue dalle altre proprio per la facoltà di costruire oggetti secondo un progetto: “l’ape fa vergognare molti architetti con la costruzione delle sue cellette di cera. Ma ciò che fin da principio distingue il peggior architetto dall’ape migliore è il fatto che egli ha costruito la celletta nella sua testa prima di costruirla in cera”⁵.

Il paragone con le api fatto da entrambi i pensatori rintuzza in qualche modo la tentazione di screditare questo criterio a causa della soggettività, poiché si è generalmente disposti ad accettare di buon grado che le api costruiscano le cellette di istinto senza concepire preventivamente alcun progetto. Anche Monod ritiene che noi abbiamo “valide ragioni per pensare che tale attività è puramente automatica, attuale ma non coscientemente proiettiva”⁶. Però la cosa non è altrettanto scontata per altri animali. Monod stesso non esclude che siano da considerarsi artificiali le dighe dei castori, in quanto a questi animali si tende a

3. Monod (1970), p. 23 (corsivo di Monod).

4. Ibidem, p. 21.

5. Marx (1964), p. 212.

6. Monod (1970), p. 20.

concedere quello che si nega alle api, cioè una scintilla di quell'intelligenza, portatrice di cultura, che si suole contrapporre all'istinto, talvolta perfettissimo, ma sempre cieco.

Sorprende in uno scienziato come Monod la frammistione fra una terminologia soggettiva (o introspettiva) e una oggettiva, tanto più che in qualche pagina più avanti dello stesso scritto egli richiama esplicitamente il principio di oggettività come fondamentale per la scienza. Ma questa incongruenza non costituisce l'unica obiezione che si può sollevare sulla sua soluzione. Le stesse api sono forse un po' bistrattate, dal momento che alcuni etologi sono convinti che il loro psichismo sia sufficientemente elevato da comprendere dei rudimenti culturali: ma si tratterebbe solo di scegliere un esempio meno problematico. Invece non gli si può lasciar passare altrettanto facilmente l'esclusione di certe molecole dal mondo artificiale in quanto vi sarebbero ricompresi solo oggetti macroscopici. Se è più che comprensibile che a questi ultimi siano riservate le analisi di Aristotele e financo di Marx, è più che sorprendente la posizione assunta dal nostro biologo molecolare. È ovvio che può essere artificiale non solo la forma, ma anche il materiale di cui un oggetto è costituito, ad esempio la plastica (è del tutto irrilevante che una singola molecola di plastica sia microscopica). Inoltre sembra semplicistico il richiamo, come caratteri distintivi degli artefatti, della regolarità e della ripetizione (§ 5).

Amsterdamsky (qui accolgo per semplicità il suo suggerimento) annovera la soluzione di Monod fra quelle naturalistiche, le quali partono "dalla convinzione che la via alla conoscenza dell'uomo passa per lo studio delle sue caratteristiche naturali"⁷ e non esitano a collocare "i processi psichici umani [...] all'interno dell'ordine naturale"⁸. In effetti Monod è esplicito: "bisogna riconoscere alla Biologia un posto centrale poiché, tra tutte le discipline, essa tenta di raggiungere più direttamente il nocciolo delle questioni che è indispensabile risolvere prima di poter anche solo porre in termini che non siano metafisici il problema della 'natura umana'"⁹; e Wilson sottoscrive il concetto: "L'unica via per progredire è studiare la natura umana nell'ambito delle scienze naturali"¹⁰.

7. Amsterdamsky (1980), p. 800.

8. Ibidem. p. 804.

9. Monod (1970), p. 11.

10. Wilson (1978), p. 8.

All'estremo opposto delle concezioni naturalistiche Lorenz sostiene che l'uomo possiede delle facoltà esclusive che fanno di lui l'unico autentico animale culturale. Il suo agire oltrepassa l'ordine naturale, e gli oggetti da lui forgiati potremmo a ragione definirli artificiali. Di una concezione analoga sarebbero portatori, secondo Amsterdamsky, Popper ed Eccles: essi si discostano da Lorenz nel considerare improvvisa e "indeterministica" la comparsa delle facoltà psichiche superiori, in particolare della coscienza, nell'uomo. Sembra implicito che ciò conferisca alla specie la prerogativa delle trasformazioni artificiali del mondo.

In pratica questi tre pensatori assumono *a priori* che i caratteri psichici necessari e sufficienti per la produzione di artefatti siano appannaggio esclusivo degli uomini. Non si vede perché i castori non potrebbero godere di qualche barlume delle facoltà superiori della nostra specie, come ammettono Monod e Wilson. L'atteggiamento scientificamente corretto, in ogni caso, consiste nel definire che cosa si intenda per oggetto artificiale, nello stabilire da quali facoltà psichiche dipenda la sua produzione, e nel controllare *poi* quali organismi siano in possesso di tali facoltà, senza affrettarsi a riconoscerle solo all'uomo.

3. Il presupposto "culturale" dell'artificiale

L'introduzione di una terminologia soggettiva nelle concezioni naturalistiche può sollevare qualche riserva sulla ripartizione degli autori contemporanei fatta da Amsterdamsky. Tuttavia si ha l'impressione che tale terminologia, comunissima nel linguaggio corrente, derivi più che altro da pigrizia mentale, e che Monod, ad esempio, sarebbe stato disposto a correggerla per rispettare il principio di oggettività. Ciò avverrebbe se, nella concezione di Monod, il ruolo di agente morfogenetico esterno venisse assunto, invece che da un progettista cosciente, da un *animale culturale*. L'intervento artificiale si verrebbe così a configurare come una modificazione materiale prodotta su base culturale. Definendo che cosa sia la cultura viene automaticamente definito che cosa sia artificiale. Una modificazione materiale prodotta senza l'intervento della cultura è, viceversa, da considerarsi naturale. Non ci rimane che verificare se la scienza ci fornisca un metodo oggettivo e universale per riconoscere la cultura, potendo così stabilire quali animali la possedano e in quali comportamenti rivolti a modificazioni materiali questa intervenga.

Intanto è evidente che tutte le modificazioni producibili sono di natura materiale, anche se molto spesso sono tutt'altro che facili da descrivere. Non mi riferisco tanto alla costruzione di oggetti artificiali, quanto ai connotati astratti che si possono conferire agli artifici. Un ordine dato a voce da un generale può provocare effetti materiali enormi, ma anche effetti che di solito non sono considerati sotto il profilo materiale, come stati d'animo, obbedienza, trasmissione ed esecuzione dell'ordine. L'effetto materiale, in realtà, non è solo quello finale; sono effetti materiali anche tutti quelli intermedi. L'ordine a voce del generale induce certamente particolari stati e minute modificazioni nel cervello dei suoi uomini, ed è in conseguenza di queste modificazioni che essi reagiscono all'ordine, magari insubordinandosi. La stessa cosa accade quando si dà un ordine ad un cane o ad uno di quei calcolatori studiati proprio per essere governati mediante la voce. In quest'ultimo esempio si conoscono già allo stadio di progetto i processi materiali che si realizzano al suo interno. Ma è indubbio che processi materiali, sia pure in gran parte sconosciuti, e non solo nei dettagli, si realizzano nei cervelli. Un fenomeno è materiale indipendentemente dal fatto di conoscerlo compiutamente, risultato che potrebbe non essere mai conseguito di fatto. Poco importa in questa sede se a tali processi materiali si accompagnino processi di carattere immateriale, in quanto ciò non interferirebbe assolutamente con il nostro discorso.

Altrettanto evidente è che qui si usa il termine cultura in senso lato, in un senso che si possa eventualmente applicare anche ad animali. Essa, in poche parole, è l'insieme delle informazioni apprese dagli individui di una specie. La sua esistenza presuppone il possesso di quelle particolari facoltà psichiche, brillantemente indagate dall'etologia moderna, che predispongono all'apprendimento, dove per apprendimento si intende una "modificazione adattativa del comportamento"¹¹ che estende i programmi comportamentali innati. La cultura presuppone anche un ambiente sociale nel quale essa si forma e si trasmette, almeno parzialmente.

Ammettendo una continuità, oltre che una fusione, fra "sapere istintivo" e cultura, fra i moduli comportamentali "a coordinazione ereditaria"¹² e quelli reclutabili al condizionamento, risulta in parte una questione di

11. Lorenz (1980), p. 225.

12. *Ibidem*, p. 112.

scelte convenzionali stabilire in quale momento della sua evoluzione una specie abbia varcato il limite fra le due condizioni. Sembra di capire che, per il solo fatto di richiedere una scelta “arbitraria”, tale soluzione risulti per Amsterdamsky viziata di antropocentrismo. In realtà la scelta non costituisce un elemento essenziale del discorso, ma solo un elemento di semplificazione. Inoltre il rispetto del principio di oggettività è proprio la migliore garanzia contro l’antropocentrismo. Scelte di questo genere si impongono continuamente in tutti i campi della scienza e nessuno pensa per questo di accusare l’intera scienza di antropocentrismo.

Per concludere questo punto, definendo come artificiale ogni modificazione della materia effettuata in base a comportamenti culturali (frutto di apprendimento), si è dimostrata la possibilità di fare rientrare il concetto nell’ambito della scienza, con tutto quello che ciò comporta.

4. Definizioni antinaturalistiche

Alla conclusione appena raggiunta si oppongono le soluzioni antinaturalistiche del problema, fra le quali Amsterdamsky annovera quelle che presuppongono “che il soggetto possa avere di sé la conoscenza propria di un soggetto trascendentale, conoscenza che sarebbe perciò indipendente dal suo essere collocato nell’ordine naturale”¹³. Esse, cioè, partono dalla coscienza e dall’attività simbolica che contraddistinguono l’uomo. L’attività simbolica, in questo caso, non va vista come un portato evolutivo, ma come un sistema di forme simboliche, come un “principio aprioristico del funzionamento della conoscenza e dell’esperienza umana, e non una schematizzazione del mondo”, né “un apriorismo condizionato biologicamente”. Il pensiero prende contatto con il mondo solo tramite la mediazione di questo principio, mediazione che Cassirer qualifica artificiale.

Amsterdamsky avanza un’obiezione logica e la relativa controrisposta: “La ricerca della genesi c’imprigionerebbe sicuramente, in tale approccio, in un circolo vizioso: si cercherebbe la determinazione naturale delle forme simboliche, mentre sono proprio tali forme la condizione di ogni conoscenza, tra cui la conoscenza della natura. Ma questo ‘puro es-

13. Amsterdamsky (1980), p. 804.

sere' di cui scrive Cassirer è naturalmente il contenuto degli atti cognitivi con cui ha a che fare il soggetto, un contenuto che occorre distinguere dall'attività conoscitiva stessa ed il cui studio deve costituire il punto di partenza"¹⁴. Tuttavia mi sembra che gli approcci naturalistici tendano un ulteriore agguato permanente a simili soluzioni, chiamandole a spiegare i gradi intermedi del sistema simbolico o di chi per esso; gradi intermedi che sembra del tutto legittimo supporre nell'evoluzione della specie, nell'ontogenesi e nella variabilità individuale fino ai casi patologici estremi. Per questi gradi intermedi, ben presenti a tutti, della condizione umana non può venire alcuna luce da una posizione filosofica aprioristica.

In generale dalle soluzioni antinaturalistiche promana una filosofia monocorde tutta centrata sull'uomo (standard), al quale viene concessa assiomaticamente l'esclusiva della coscienza, dell'attività simbolica, della cultura, dell'artificio, e così via. Si sottraggono questi concetti ad un esame comparativo che comprenda, per esempio, gli animali "superiori". Ma è ovvio che la comparazione riprenderebbe comunque, magari coniando termini nuovi, stadi presimbolici o preartificiali, per esprimere la diversa intensità che qualità psichiche comuni (ce ne sarà pure qualcuna!) raggiungono nell'uomo e negli animali superiori.

Eppure non è possibile, secondo Amsterdamsky, sfuggire alla antinomicità dei due approcci filosofici ereditati dal realismo e dall'idealismo. Come orientarsi dunque? Questo autore sostiene (non illudendosi, suppongo, di sfuggire all'antropocentrismo), che "le basi della nostra classificazione (in naturale e artificiale¹⁵) vanno cercate nelle concezioni storicamente mutevoli della nostra natura e (...) la questione del rapporto reciproco dell'ordine artificiale e di quello naturale è in sostanza un cripto-problema, che rinvia perciò a un altro rapporto: quello tra ciò che è naturale e ciò che è artificiale in noi stessi"¹⁶. Questa affermazione resta sospesa finché non si dice quale rapporto leghi i termini dell'antinomia al nostro interno con gli stessi termini fuori di noi. Risulta peraltro evidente dal contesto¹⁷ e dal fatto che si parla di fini¹⁸ dell'atti-

14. Amsterdamsky (1980), p. 805.

15. Parentesi dell'autore, M. R.

16. Amsterdamsky (1980), p. 798.

17. *Ibidem*, pp. 807 sgg.

18. *Ibidem*, p. 819.

vità umana, che si fa appello esclusivamente alla pura soggettività. Con il che è concesso allontanarsi *ad libitum* dal senso comune, ritenere artificiali le grandi foreste e/o naturali le grandi metropoli. La ricerca di un criterio è affidata da un lato alla mutevolezza storica dei grandi pensatori e dall'altro (perché no?) alla mutevolezza quotidiana della riflessione intimistica.

Ci viene chiarito anche che ci si riferisce alla soggettività dei giudizi di valore. Sarebbe perciò un valore comune a connettere i termini dell'antinomia al nostro interno con gli stessi termini fuori di noi. Questa conclusione di Amsterdamsky è decisamente errata. Pur essendo vero che il giudizio di "naturale" viene comunemente scambiato con un giudizio di "legittimo" se non di "auspicabile", non c'è alcun legame necessario fra i due piani di giudizio. Una cosa è riscontrare delle qualità nel mondo, fosse anche quello dentro di noi, un'altra cosa è decidere se accettarle o respingerle. Fra i due problemi non c'è alcuna relazione logica.

Del resto non si capisce quali difficoltà si possano evitare, per questa via, quasi mancassero le soluzioni naturalistiche o antinaturalistiche al problema della determinazione dei valori. Wilson, tanto per citare solo il caso più recente e discusso, vi dedica parecchi capitoli del suo libro sulla natura umana, rovesciando completamente la proposta di Amsterdamsky. Perché non pensare, infatti, che debba considerarsi legittimo ciò che è "secondo natura", invece che procedere nel senso opposto? Inoltre, ritornando al senso comune, non tutto ciò che viene ritenuto artificiale viene ritenuto automaticamente anche cattivo, come non viene ritenuto necessariamente benefico ogni fenomeno naturale. I valori differiscono inevitabilmente da persona a persona, da società a società, da periodo a periodo dell'esistenza individuale e della storia. Essi attraversano perciò, e in modo mutevole, le stesse categorie di naturale e artificiale.

5. Caratteri "culturali" dell'intervento artificiale

Partendo dalla definizione già data (§ 3), conviene precisare che l'intervento artificiale è il tramite fra cultura e ambiente, è il mezzo di cui si serve la cultura per provocare modificazioni materiali. La cultura umana è depositata nei nostri cervelli oppure in libri, pellicole, nastri magnetici; però essa deve passare per qualche cervello individuale per

imprimersi nel mondo materiale. Ciò avviene sempre attraverso un movimento muscolare o, meglio, attraverso un comportamento, cioè un complesso di movimenti coordinati. Nel tradurre la cultura in artefatti intervengono quindi i muscoli, tipicamente quelli chiamati spesso, con infelice intromissione dell'elemento soggettivo, muscoli volontari¹⁹: essenziale, per il mio discorso, è che si tratti di muscoli che partecipano a comportamenti appresi.

Affinché possa verificarsi un intervento artificiale è essenziale anche un'altra cosa: che l'ambiente permetta il movimento stesso, ossia che si modifichi in seguito ad esso, che ceda in qualche sua parte. Il movimento costituisce di per sé una transizione spaziale, una variazione della geometria corporea che si traduce in una variazione della geometria ambientale.

Indubbiamente, nell'uomo, è alla mano che spetta la priorità nel campo degli interventi artificiali. Essa ha rappresentato il maggiore strumento della cultura in passato, ma i suoi movimenti sono fondamentali anche oggi, sia che manipoli qualche strumento, sia che si limiti a premere un bottone (generalmente dopo una fase preparatoria di ben altre dimensioni), sia che scriva. La comparsa e l'evoluzione del linguaggio, nel passato, e oggi l'enorme capacità di utilizzarlo da parte dell'informatica, rendono estremamente importante come mezzo di intervento artificiale umano anche il complesso degli organi impiegati nella comunicazione verbale. Anche in questo caso compaiono movimenti muscolari, i quali producono rapide variazioni geometriche che si trasmettono all'aria traducendosi in onde sonore, ossia in compressioni e depressioni alterne del mezzo.

In ogni caso l'uomo non ha altra possibilità di intervento, di interazione con l'ambiente, che quella meccanica; egli si limita ad intervenire meccanicamente anche quando invia segnali radio a migliaia di chilometri di distanza o quando produce idrogeno mescolando pezzetti di zinco ed acido solforico in un apposito apparecchio. Verosimilmente rimane legata a questa modalità di manifestazione anche l'eventuale

19. Se la cosa non pone problemi immediati per l'uomo, mostra subito la corda riferendosi ad animali. Hanno essi una volontà? Ogni loro muscolo scheletrico è sotto il suo controllo? Si può verificarlo empiricamente? Le difficoltà sorgono dall'uso di un termine, come volontà, che deriva dall'introspezione e non dall'analisi scientifica, che non risponde al criterio di oggettività.

cultura di altre specie animali²⁰. Anche in esse, dunque, l'intervento artificiale consiste sempre, almeno all'origine in una modificazione geometrica dell'ambiente.

Il fatto di manifestarsi per mezzo dei muscoli non è l'unica caratteristica della cultura che si imprime negli artefatti. Un suo aspetto di grande interesse è quello di essere collettiva, di dipendere da un certo grado di socialità. Perciò la mano e la lingua del singolo agiscono, in un certo senso, come strumenti dell'intera società. L'intervento artificiale socialmente determinato è il lavoro. Nella produzione industriale, cioè nel più massiccio intervento artificiale della storia, il lavoro è organizzato dalla società. Anche quando esso è individuale presuppone comunque una società nei cui comportamenti rientra. Già una selce lavorata non avrebbe senso né utilità se non in una certa comunità in possesso di una determinata cultura. I comportamenti sociali che si traducono in lavoro, in attività volta alla produzione, sono completamente acquisiti e tramandati nell'ambito di una comunità. Essi non hanno nulla di ereditario in senso biologico. Possono variare da comunità a comunità; possono essere imposti da una comunità ad uomini di cultura diversa, come accadeva agli schiavi; possono essere imposti in qualche misura anche ad altre specie, come gli animali domestici, i quali, in tal modo, partecipano a loro volta in qualche misura delle interazioni culturali umane.

Proprio a causa del carattere collettivo della cultura, gli artefatti sono generalmente stereotipati. Ad essi la cultura riserva un ruolo determinato nella società, e il ripresentarsi spaziale e temporale del ruolo si ripercuote sulla ripetizione dell'artefatto. La ripetizione, dunque, è la regola del lavoro, non solo di quello industriale. La regolarità delle forme geometriche richiamata da Monod (§ 2) si può assimilare alla ripetizione: alcuni moduli geometrici ricorrono più frequentemente di altri nel mondo artificiale dell'uomo, fenomeno addirittura esasperato dall'industria nella sua corsa verso la semplificazione degli atti produttivi. Tuttavia questi caratteri non sono assoluti, non sono essenziali negli oggetti artificiali. Nessuno penserà di negare alla "nona" di Beethoven l'attributo di artificialità e neppure quello di unicità.

20. Si possono considerare comportamenti anche interazioni con l'ambiente secondo altre modalità (luminose, elettriche, ecc.).

La ripetizione, peraltro, è presente anche nell'ordine naturale, tanto più quanto minore è il livello di aggregazione della materia: mentre nell'interno di una classe di particelle si riscontra una assoluta uniformità, la variabilità cresce spostandosi verso gli aggregati di dimensioni maggiori (purché la temperatura non sia troppo alta). A livello di pianeti o di organismi viventi la complessità è massima e vige l'unicità.

Sempre in forza del suo carattere sociale l'intervento artificiale, come ogni elemento della cultura e del lavoro umani, è legato ad usi ed esperienze precedenti. Per avere un significato nell'economia della società non può non riecheggiare elementi già presenti nella cultura. Tuttavia il fatto stesso di fondarsi anche sull'apprendimento lo rende suscettibile di innovazione. L'apprendimento, infatti, non riguarda solo comportamenti già in uso, ma anche l'elaborazione di soluzioni nuove. Nelle società umane più "progredite", alla massima ripetitività dell'artificiale industriale si accompagna la massima ricerca di novità culturali (le scoperte) da tradurre in novità artificiali (i prototipi, le opere d'arte, ecc.) da selezionare per la produzione in serie.

La cultura, d'altra parte, può subire anche delle perdite. Essa può estinguersi, in qualche sua parte, con chi la possiede (anche solo per mancanza di esercizio) o con i documenti nei quali è depositata.

6. Un artefatto è sempre parzialmente naturale

Se l'intervento primario è sempre meccanico, i suoi effetti secondari possono essere i più vari: essi interessano i vari livelli di aggregazione della materia a seconda del flusso energetico realizzato. Per realizzare un flusso energetico superiore a quello ottenibile con il semplice sfruttamento dell'energia muscolare, cui si limitano gli altri animali culturali, il metodo seguito dagli uomini è quello di rivolgersi ad una fonte di energia potenziale (opportunamente accumulata, di solito) e di provocare la sua trasformazione in altre forme di energia con il minimo di lavoro meccanico umano, come quando si apre la paratia di una condotta forzata.

Così negli acceleratori di particelle si creano le condizioni energetiche per scomporre i nuclei nelle loro particelle costitutive. Mediante le reazioni di fusione nucleare si provoca talvolta la formazione di nuclidi "artificiali" mai riscontrati in natura. In questi casi le particelle o i nu-

clidi vengono concentrati, vengono posti nelle condizioni desiderate, ma le particelle stesse sono *date*, come sono date le forze fondamentali e come sono dati la carica elettrica e tutti gli aspetti della materia che obbediscono a leggi di conservazione. Come nel gioco degli scacchi si muovono vari pezzi, anche togliendoli dalla scacchiera, ma la loro qualità e il loro numero rimangono invariati, così è per le particelle: esse ci sono date in qualità e numero dalla natura. Per la verità le sole particelle sicuramente immuni da ogni intervento artificiale sono quelle strettamente elementari, quelle non ulteriormente scomponibili e perciò immodificabili, cui i fisici credono ormai di essere molto vicini, e cui spetterebbe a ragione il termine "atomo". Esse rimarranno sempre naturali; artificiali potranno essere solo le loro combinazioni e disposizioni. Tuttavia le loro prerogative sono per lo più riservate anche alle particelle subatomiche più familiari. Così, nei nuclidi artificiali, di artificiale c'è la particolare combinazione delle particelle nucleari, non le particelle stesse, che rimangono naturali.

Molto più noti, nel campo delle esperienze ordinarie, sono gli interventi artificiali effettuati ai livelli superiori di aggregazione della materia, ad esempio i processi di ionizzazione di atomi e molecole. Effettuando il processo con energie sufficientemente elevate si crea il plasma, uno stato gassoso in cui gli elettroni sono in varia misura slegati dai nuclei. Se questo stato di ionizzazione estrema è una acquisizione tecnica recente, quella della semplice ionizzazione negli stati condensati, riguardante uno o pochi elettroni per atomo, è tutt'altro che recente, richiedendo energie molto più modeste, cioè energie dello stesso ordine di grandezza di quelle richieste nelle comuni trasformazioni chimiche.

Nel campo della formazione e della rottura di legami chimici la capacità di intervento raggiunta è decisamente straordinaria. In alcuni casi ciò veniva ottenuto da millenni in base a conoscenze empiriche, ad esempio nel ricavare il ferro dalla pirite con il fuoco di legna o nel ricorrere ai microscopici saccaromiceti per ottenere l'alcol dallo zucchero. In tutti questi casi il livello inferiore, quello degli atomi (o meglio dei nuclei) non viene modificato. Sono artificiali solo le combinazioni e le disposizioni relative che gli atomi sono indotti ad assumere, e le variazioni nella distribuzione spaziale degli elettroni interessati alla formazione dei legami fra gli atomi, o da questi legami influenzati. Per la chimica, quindi, gli atomi (o meglio i nuclei e gli elettroni interni) assumono il ruolo di materia prima fornita dalla natura.

Inoltre molti corpi, costituiti di materia ai livelli di aggregazione superiori, possono subire trasformazioni chimico-fisiche variabili entro un ampio intervallo di energia, tipo lo scioglimento in solventi o l'essiccamento. Nonostante si possano ricostituire con facilità le situazioni iniziali, per cui si suole parlare di fenomeni fisici, in effetti si verificano anche in questi casi rotture e formazioni di legami chimici, quelli responsabili delle forze coesive.

Ciò avviene anche quando l'uomo agisce sulla geometria degli oggetti, comunicandovi direttamente l'energia cinetica del proprio movimento muscolare o quella delle macchine. Infatti la rottura di un corpo solido o qualche altra modificazione della sua geometria, implica la rottura dei legami che tengono assieme gli atomi, gli ioni o le molecole di cui il corpo stesso è costituito. Lungo le superfici di rottura il corpo presenta una reattività particolare che dà luogo, per un tempo più o meno lungo, a reazioni che interessano qualche specie chimica dell'ambiente, per esempio l'ossigeno, ma il grosso del corpo può rimanere immutato.

Così, nel ricavare un'ascia litica da un nodulo di selce, l'uomo del paleolitico interviene artificialmente per conferire al nodulo una geometria particolare, non per cambiarne la natura chimica. Tranne che lungo le superfici di rottura, infatti, la selce non subisce alcuna trasformazione chimica: essa rimane il materiale naturale che era prima. La scheggiatura del nodulo di selce provoca anche transitori aumenti di temperatura sia a causa della percussione, sia semplicemente per il fatto di comunicare al nodulo la temperatura delle mani, ma anche questo non comporta trasformazioni chimiche.

In tutti i casi esposti la realtà viene modificata dall'intervento artificiale solo in alcuni aspetti, mentre per altri, a livelli inferiori di aggregazione, rimane praticamente immutata ovvero naturale. La modificazione, perciò, è sempre parziale. Questa parzialità dell'artefatto dipende dalle caratteristiche della materia, non da quelle della cultura. Dipende innanzitutto dal fatto che la materia, intesa come insieme di massa ed energia, esiste di per sé e non può essere né creata né annullata dall'uomo; l'uomo la può soltanto modificare. Dipende inoltre dal fatto che la materia non è continua e indifferenziata. La scienza moderna ne ha dimostrato in modo inequivocabile il carattere discreto che si concretizza nelle particelle, ed è a partire da questo risultato che si può parlare di livelli di organizzazione della materia stessa. Il più noto,

perché molto stabile alla temperatura della Terra (almeno per i numeri atomici sotto il 100, grossomodo, e con opportune proporzioni di protoni e neutroni), è il classico atomo. Ma sono ormai note anche altre combinazioni fra particelle subatomiche, sia pure a vita media molto breve e sconosciute allo stato spontaneo sulla Terra; ad esempio gli atomi di antimateria o il sistema binario elettrone-positone.

Il livello di organizzazione atomico della materia può costituire a sua volta aggregati molecolari. Livelli analoghi si possono certamente ottenere dagli atomi di antimateria e forse da altri aggregati di particelle. Le stesse molecole possono dare aggregati a loro volta. Inoltre a tutti questi livelli la materia può essere dispersa o riunita in corpi più o meno densi, come le stelle, i fasci di fotoni, i cristalli, gli alberi, e così via. In ogni caso l'intensità del flusso energetico (o la temperatura) in grado di modificare (ossia di rendere instabile) un basso livello di aggregazione è sufficiente anche per i livelli di aggregazione superiori, ma non viceversa. Poiché è più facile produrre bassi flussi energetici, i livelli inferiori sono generalmente al riparo dagli interventi artificiali.

Nonostante ciò, alla parzialità degli effetti dell'intervento possono essere mosse delle obiezioni. Intanto i livelli di organizzazione della materia sono distinti da noi per convenienza linguistica e scientifica. La loro distinzione, anzi, è spesso empirica e proposta attraverso esempi, in quanto sembra piuttosto difficile fornire un criterio per discriminare rigorosamente i livelli che vengono solitamente elencati. Non è corretto assegnare loro un valore ontologico solo perché vengono studiati da discipline distinte che li prendono in considerazione secondo la particolare ripartizione dei campi di interesse in vigore in un certo periodo storico, mentre in altri periodi ci troviamo di fronte a differenti ripartizioni e alla competenza di differenti discipline. Certamente se aspettassimo a studiare i batteri patogeni finché non fossimo in grado di ricostruirne la complessa organizzazione a partire dalla miriade di particelle elementari che li costituiscono, terribili epidemie continuerebbero a flagellare l'umanità. Tuttavia l'opportunità pratica di studiare ogni livello con la propria specificità anche linguistica non deve significare attribuire questi livelli alla natura, trasferendo ad essi una incomunicabilità che riguarda semmai i cultori delle diverse discipline.

Questa obiezione di principio può essere sostanziata con esempi pratici. Si è già visto che l'azione meccanica per rompere un nodulo di selce dà il via anche ad una debole reattività superficiale. Analoghe con-

sequenze hanno gli interventi artificiali a bassa energia che implicano il semplice spostamento di corpi, come raccogliere legna o arare la terra. Perciò modificare la geometria dei corpi (ovvero dell'ambiente) non significa lasciarne rigorosamente intatta la struttura chimica: spesso questa viene interessata dall'intervento, almeno in certe parti. La stessa cosa si può dire per i nuclei atomici, anche se le modificazioni sono di solito talmente trascurabili da non poter essere rilevate con i nostri strumenti di misura. La stessa cosa vale per le particelle: un esempio può essere costituito dal neutrone, il quale decade se è libero, mentre è stabile se è inserito in un nucleo. Perciò operare con protoni e neutroni per modificare i nuclidi non lascia queste particelle rigorosamente inalterate: per i neutroni le cose cambiano passando dallo stato libero ad un nucleo o viceversa. Altre volte, pur non determinando variazioni nell'esistenza delle particelle, si determinano però variazioni nella loro velocità o in altre loro proprietà fisiche contingenti.

Generalizzando si può giungere ad affermare il principio esattamente contrario della parzialità (fatto salvo il numero delle particelle elementari dell'universo): l'intervento è sempre generale perché tutto influisce su tutto o, come è stato detto in modo più poetico "non puoi agitare un fiore senza disturbare una stella". Ogni particella estende le sue possibilità di alterazione a distanza infinita dal punto in cui si trova, e quindi non è pensabile un oggetto che possa passare inosservato, che possa astenersi dall'influire sugli altri e dal subirne l'influenza.

Se queste affermazioni sono vere da un punto di vista filosofico, è importante anche il loro grado di validità sul piano pratico. Certamente la scienza non è in grado di verificare il determinismo universale propugnato da Laplace. Tale incapacità può essere attribuita a due motivi: (1) i limiti di sensibilità e di precisione delle misure e (2) il principio di indeterminazione. Senza entrare nel merito, voglio soltanto mettere in evidenza che il primo motivo rimane in ogni caso, e impedisce da solo di determinare il disturbo delle stelle provocato dal tastamento dei fiori.

Il piano pratico e quello teorico vanno tenuti entrambi presenti. Il piano pratico, cioè la parzialità degli artefatti ai livelli superiori di aggregazione della materia, per il suo rilievo concreto e determinabile. Il piano teorico per la sua validità di principio, anche dove la scienza e la tecnica non sono ancora giunte. Trascurare il piano teorico corrisponde all'errore dei moderni razionalisti, i quali si illudono, e diffondono l'illusione, che tutto ormai sia prevedibile e determinabile, o che sia quan-

to meno trascurabile ciò che sfugge agli occhi della scienza contemporanea. Essi sono un po' gli eredi del macchinismo; di chi, concependo la natura ad immagine e somiglianza di una macchina, pensava che su ogni singola parte si potesse intervenire senza interferire sulle altre. Ora, dopo un'esperienza secolare e diffusa, questa tesi non appare sostenibile per le macchine e meno che meno per la natura in generale.

Infine la parzialità dell'intervento artificiale ha anche un'altra faccia, cui si è già accennato a proposito della scheggiatura della selce: l'artefatto è costantemente passibile di modificazioni da parte di agenti naturali. E quanto meno esso si discosta dalla natura, tanto più rapidamente torna a confondersi con essa. Basta pensare all'artificialità puramente geometrica dell'ascia litica, all'artificialità anche chimica di un oggetto di plastica, ai problemi posti dalle barre radioattive di una centrale nucleare.

7. Diagnosi di artificialità

Il problema di riconoscere eventuali oggetti artificiali si è posto effettivamente ai primordi dell'archeologia. L'eventuale lavoro umano riguardava prestazioni energetiche molto basse e modifiche di carattere essenzialmente geometrico. Proprio in simili casi risulta difficile definire un criterio di demarcazione fra naturale e artificiale perché minore è il grado di artificialità, cioè più vicino agli oggetti naturali è l'oggetto sospettato di artificialità in qualche suo aspetto.

Per tale demarcazione sembrano comunque essenziali tre elementi: (1) la stranezza, (2) il ruolo sociale e (3) la genesi. Ciò che potremmo chiamare stranezza è ciò che attira la nostra attenzione. Un oggetto, anche banale per un certo luogo, può risultare "strano" per la posizione in cui si trova rispetto ad altri oggetti, soprattutto se vengono individuate delle regolarità di posizione, ad esempio dei sassi ammonticchiati quando tutto intorno sono distribuiti a caso. Oppure può apparire strano se è di dimensioni particolari o disposto in modo particolare (ad esempio una pietra infissa nel terreno, piuttosto che coricata come le altre); se è di forma particolare (ad esempio le selci lavorate in un luogo ricco di selci); se la sua presenza non è comune in quel luogo (ossidiana, anche non lavorata, lontana da giacimenti). In casi del genere, che comprendono quelli annoverati da Monod (§ 2), il sospetto di artificialità riguarda sol-

tanto la stranezza geometrica, perciò ci si interroga solo sulla causa meccanica che l'ha prodotta. Non riguarda invece la composizione dell'oggetto o altre sue proprietà in quanto vengono considerate naturali, cioè proprie dell'oggetto indipendentemente da interventi meccanici umani. Ormai le scienze che indagano il passato della nostra specie sono molto progredite e un pezzo di selce o di ossidiana attira immediatamente l'attenzione di qualsiasi dilettante. Ciò dimostra che uno dei caratteri degli oggetti artificiali antichi è una stranezza un po' stereotipata, invero, soprattutto per quanto riguarda i materiali. Oggigiorno i materiali artificiali sono di un'enorme varietà; basti pensare all'enorme numero di molecole organiche sintetizzate per gli usi più svariati. Il grado di artificialità è più profondo: riguarda generalmente anche il materiale e non solo la situazione geometrica, anche se questa risulta ancora più stereotipata (superfici lisce, diedri retti, profili circolari, e così via).

La stranezza si può considerare un indizio statistico-probabilistico, sia pure difficile a giudicare in modo esauriente. Risulta strano ciò che è raro e insolito per gli aspetti considerati sopra. Tuttavia essa costituisce un criterio insufficiente, perché in natura si trovano delle cose strane (cristalli, meteoriti, massi erratici, residui di viventi, ecc.) provocate da eventi cui l'uomo è estraneo, e di cui sono responsabili altri agenti, da quelli vulcanici, a quelli astronomici, alle glaciazioni, al multiforme mondo dei viventi. In effetti ogniqualvolta si trovi un oggetto strano ci si pone (e se la pongono gli archeologi) altre domande. In particolare ci si interroga sul suo ruolo sociale e sulla sua genesi: se poteva servire a qualche cosa, e se e come poté essere prodotto dall'uomo, ovvero che posto occupava nella cultura materiale di quella società.

La prima domanda è certamente molto utile e interessante, però è altrettanto certamente facoltativa. Nessuno nutre dubbi sulla provenienza umana di oggetti decisamente "strani" quali il complesso megalitico di Stonehenge o le pitture rupestri, anche se ci sono varie teorie sulla loro funzione. Si può discutere anche su dettagli della genesi: se le pietre di Stonehenge siano state trasportate in quei paraggi da agenti naturali come i ghiacciai, o se siano state trasportate dall'uomo per acqua o per terra; se le pitture rupestri fossero tracciate da persone con posizioni particolari nella comunità o da chiunque ci si divertisse e avesse talento. La genesi umana rimane comunque fuori discussione.

In casi meno evidenti una conclusione analoga può essere tratta soltanto disponendo di prove più sostanziose. L'essenzialità è che l'ogget-

to in odore di artificialità risulti fattibile da parte dell'uomo di un certo periodo storico, cioè mediante il lavoro umano. La definizione di artificiale, in definitiva, richiede un'analisi genetica e storica al tempo stesso: la possibilità che uno o più individui umani abbiano prodotto un certo oggetto nella loro particolare situazione culturale e sociale.

Il ruolo sociale è una conseguenza di questo fatto: il lavoro umano è finalizzato all'utilità sociale, e quindi l'oggetto deve possedere un significato, un valore d'uso, deve ricoprire un ruolo nella società, appunto. Diventa organo dell'organismo sociale il quale non è costituito solo di uomini, ma anche di oggetti. La stranezza, con tutte le sue varianti di forma e di composizione, costituisce un'altra conseguenza inevitabile della genesi e del ruolo sociale²¹.

Si è condotta l'analisi giovandosi soprattutto di esempi paleontologici perché per la maggior parte della storia dell'umanità l'intervento artificiale si è limitato alla geometria macroscopica del mondo fisico. Ma la stranezza degli oggetti prodotti intervenendo agli altri livelli di aggregazione della materia o con altri mezzi di modificazione fisica non è inferiore a quella ottenuta con il puro intervento meccanico, come non è minore il relativo sospetto di artificialità. La stranezza può riguardare la temperatura, oppure la costituzione fine o la stessa composizione degli oggetti, ma non è quasi mai disgiunta dall'azione meccanica, e quindi da una stranezza geometrica. La diagnosi di artificialità è di solito più immediata. Gli artefatti industriali moderni sono, nella loro grandissima maggioranza, di questo tipo. La stranezza è molto spesso così netta che non si ritiene necessario ricorrere ai criteri 2 (ruolo sociale) e 3 (genesì umana), ma solo perché vengono dati per scontati. Le raffinate tecnologie moderne impediscono al profano di formulare adeguate ipotesi sul punto 3 per semplice difetto di conoscenza specialistica, e il punto 2 può venire soddisfatto anche senza nulla sapere del punto 3. Qualsiasi bambino americano è perfettamente in grado di spiegare la funzione di un televisore senza avere la minima idea della costruzione dei suoi sofisticati componenti. Avrà senz'altro dubbi maggiori sulla funzione delle semplici ataviche macchine usate nelle malghe alpine o nelle cave di pietra.

21. Preferisco parlare di ruolo sociale, anziché di funzione desiderata, per evitare l'introduzione di elementi soggettivi (vedi § 2 e 5).

Il bambino americano, piuttosto, sarebbe più che autorizzato a sollevare qualche obiezione sull'idea di stranezza; sull'idea che un televisore, nella stanza di soggiorno di casa sua, abbia un'aria più "strana" di un sasso o di una zolla di terra. Ma abbiamo detto che la stranezza è solo un indizio, come la spiegazione funzionale è solo una conferma; essenziale è la genesi. E noi sappiamo che la stanza di soggiorno, come la città, è generata dal lavoro umano. La stranezza si ha soltanto rispetto ad un ambiente sicuramente non generato dal lavoro umano. La cosa risulta più complicata del previsto perché, a ben vedere, non c'è attualmente ambiente terrestre sul quale non si registrino almeno ripercussioni indirette del lavoro umano.

8. Digressione sui viventi

Queste precisazioni valgono per tutta la realtà materiale, senonché negli organismi viventi si presentano in modo difficilmente riconducibile ai casi esposti. Se nei riguardi dei viventi ci si limita ad interventi meccanici come la raccolta della frutta o del fieno, la cattura di animali, la loro schiavizzazione, la messa a coltura di piante e la loro selezione, questi non sembrano implicare modificazioni ambientali diverse da quelle geometriche, a prima vista.

Ma esaminando la cosa più attentamente non si può negare che quando si stacca una mela matura dall'albero si provocano per lo meno delle modificazioni nel punto di rottura del picciolo. Gli effetti immediati sono certamente molto circoscritti, ma sono di una complessità che supera enormemente ogni possibilità di descrizione esauriente. Vi si realizzano subito un enorme numero di eventi fisici e chimici che si estendono anche ad altre parti dell'albero. L'energia in gioco è bassa e indipendente dalla potenza profusa nello staccare la mela: che lo facciamo tirando con la mano o con un trattore, o vibrando una sciabolata, l'energia è la medesima e dipende dalle strutture molecolari presenti nel picciolo della mela. Lo stesso discorso vale per la silenziosa sequenza di microeventi che si mette in moto e per l'umile effetto cicatriziale cui si perviene dopo qualche giorno. Dunque gli effetti, che possono benissimo essere infinitesimi (ma non sempre lo sono), si estendono inevitabilmente, in forme specifiche, all'intero organismo. Non hanno nulla a che vedere con le ri-

percussioni che un intervento localizzato dello stesso tipo provocherebbe in una pietra.

La complessità dell'organizzazione molecolare del vivente costituisce il principale ostacolo ad una ripartizione fra naturale e artificiale di ciò che ne resta in seguito all'azione culturale. Alcuni fenomeni biologici seguono il loro corso e quindi, anche se parzialmente influenzati dall'intervento artificiale, possono per altri aspetti considerarsi naturali. Innanzitutto rimane un fatto naturale l'esistenza del vivente in quanto tale. Anche senza inoltrarci nelle difficoltà di definizione della vita, l'aforisma "omne vivum e vivo" rappresenta una acquisizione fondamentale della scienza ed è stato difeso alla lettera dalla biosfera, non solo nel senso che non si verifica la generazione spontanea in natura, ma anche nel senso che non si è mai verificata una generazione indotta in laboratorio: l'uomo non ha mai costruito un organismo vivente.

Si potrà osservare che non è prudente proiettare questo dato di fatto nel futuro. Anzi, è del tutto legittimo prevedere, a scadenza relativamente ravvicinata, la progettazione e la costruzione *in vitro* di oggetti di tipo virale, cioè del tipo cui appartengono gli oggetti più semplici della biosfera. Ma già i virus di grandezza media presentano una complessità di ordinamento molecolare ai limiti delle attuali possibilità di una descrizione esauriente, e i batteri più piccoli rientrano già in un mondo la cui costruzione artificiale non può far parte dei piani della scienza, ma solo di quelli della fantascienza. Ciò trova spiegazione proprio nella già ribadita complessità strutturale; essa non può prodursi spontaneamente da materia destrutturata perché la probabilità che la sequenza di eventi richiesta si verifichi casualmente è talmente infima da escluderla, e l'uomo è ben lontano dal poterla produrre: le attuali risorse tecniche possono produrre delle sequenze di eventi molto complicate, ma non al grado di miniaturizzazione degli aggregati molecolari delle cellule.

L'uomo, peraltro, non è stato con le mani in mano. Nel secondo dopoguerra è riuscito a penetrare numerosi segreti fondamentali della "logica del vivente", e in qualche caso è in grado di interferire con tale logica in modo prestabilito. Così l'ingegneria genetica può modificare nel senso voluto una porzione del genoma di un batterio salvaguardandone invece il complesso dei meccanismi che lo fanno definire un vivente. Mentre questi meccanismi rimangono un portato naturale, vengono a risultare artificiali parte del genoma e le deviazioni che questa novità genera nei meccanismi normali della cellula batterica.

In questa logica profonda del vivente si può, a maggior ragione, interferire con azioni mutagene generiche, non prestabilite, che modificano il genoma con frequenza superiore a quella naturale in punti e in modi imprevedibili, con conseguenze altrettanto imprevedibili sulle funzioni da esso dipendenti. E deve risultare evidente che un genoma consegnatoci dall'evoluzione della biosfera, un processo durato qualche miliardo di anni, difficilmente potrà ricavare qualche cosa di buono per l'organismo da mutazioni casuali anche di entità modesta. Nella stragrande maggioranza dei casi si avrà un danno sotto forma di una caduta adattativa talvolta incompatibile con la vita stessa.

Questo tipo di interventi è a livello chimico: gli agenti mutageni di qualsiasi tipo sono tali solo se riescono a determinare qualche variazione nella struttura chimica del genoma. Essi possono essere anche naturali, ma presentati al vivente in modi o concentrazioni innaturali. In realtà non è possibile delimitarli: una azione mutagena non si può escludere per nessun fattore artificiale in grado di giungere direttamente o indirettamente a contatto con il genoma.

Questi agenti, accanto a molti altri, agiscono sulla logica del vivente interessando anche aspetti diversi dal genoma. In generale qualsiasi intervento artificiale, per quanto modesto, conferisce un tocco di artificialità al vivente stesso, anche se non compromette il fenomeno vitale, la capacità riproduttiva, il proseguimento del processo evolutivo; tutte queste cose, però, possono essere influenzate più o meno radicalmente.

I singoli viventi, e la biosfera nel suo complesso, non mancano di meccanismi i quali, evolutisi per tutt'altro scopo, cioè per far fronte a danni naturali ricorrenti, sono talvolta in grado di salvaguardare le proprietà fondamentali dei singoli organismi o dell'ecosistema anche di fronte a fattori artificiali. Compare insomma un certo grado di reversibilità del danno. Si parla di meccanismi omeostatici, i quali tendono a circoscrivere spazialmente e temporalmente gli effetti provocati. Tuttavia non esistono limiti di sicurezza assoluti: delle modificazioni vengono comunque iscritte. Si dice che i viventi in quanto tali hanno una memoria, anche questa come conseguenza della loro complessità ovvero della enorme improbabilità che ritornino in uno stato esattamente uguale a quello precedente l'intervento.

Quanto detto non significa che tutti gli eventi sgradevoli, la patologia, la morte, le stragi, siano il risultato di interventi artificiali. La predazione, il parassitismo, la competizione, le catastrofi, esistono anche come

fatti puramente naturali. Proprio i più ricorrenti fra loro hanno provocato la selezione dei meccanismi difensivi, di riparazione, e così via.

Comunque il corso naturale dell'evoluzione è stato modificato artificialmente anche in altri modi. I metodi di cattura, di coltivazione e di allevamento messi in atto dall'uomo, nonché la creazione di ambienti artificiali nei quali è andata insediandosi una piccola porzione della biosfera, hanno inevitabilmente influito sul corso dell'evoluzione anche a prescindere da una vera selezione artificiale effettuata con scopi precisi e in ambienti particolari (i campi, la stalla). Di artificiale, in tal caso, c'è la popolazione con le particolarità anatomiche e fisiologiche affermatesi e con tutte le ripercussioni generali che queste implicano. Vale la pena far notare come talvolta venga compromessa, nei viventi controllati dall'uomo, la stessa capacità riproduttiva. Ad esempio il mais non è in grado di disperdere i semi e andrebbe rapidamente incontro all'estinzione se non subentrasse in quella funzione l'agricoltore. È in gioco più la logica dell'organismo che non la logica del vivente nel senso dei meccanismi fondamentali delle cellule.

A questo punto non è possibile evitare una digressione nella digressione per l'interesse teorico particolare che presenta il problema. Mi riferisco, restando al livello organismico, alle modificazioni artificiali del comportamento negli animali addestrati dall'uomo, ad esempio quelli dei cosiddetti circhi equestri. In tali casi non si può negare che gli stessi contenuti culturali risultino artificiali. L'addestramento consiste proprio in una serie di comportamenti (dell'addestratore) volti ad istillare nell'animale dei comportamenti (appresi) particolari. La relativa modificazione culturale può essere senz'altro ritenuta artificiale.

Ma che dire, allora, della cultura normale di un animale culturale? Non è anch'essa trasmessa spesso attraverso un intervento culturale, l'addestramento, da parte di qualche adulto? Dalla definizione di artificiale data nel § 3 sembra seguire logicamente che la cultura è un artificio, o almeno lo è quella quota istillata mediante addestramento (ce ne può essere un'altra quota dovuta ad apprendimento per osservazione, per prove ed errori, ecc., cioè ad apprendimento che avviene senza un intervento specifico da parte di altri individui). Invece non può essere considerata artificiale la disponibilità ad apprendere, ossia ad impossessarsi di una cultura (se non per un calcolatore costruito appositamente). Questa disponibilità è indubbiamente naturale. Quindi possono essere tacciati di artificialità solo i contenuti della cultura stessa: ma ciò riguarda tutti i contenuti?

Poc'anzi ho detto che sono artificiali i comportamenti degli animali che danno spettacolo nei circhi equestri. Forse che i comportamenti culturali degli stessi animali in natura sono da considerarsi naturali? È precisamente quello che penso: la cultura ha anche dei contenuti naturali; sono quelli connessi con il nucleo dei bisogni fondamentali della specie indipendentemente dal fatto (del resto arduo da accertare) che siano appresi con o senza addestramento. Questa è la soluzione che ci suggerisce la logica dell'evoluzione. Non si sviluppa recipiente senza contenuto. Non ha senso lo sviluppo di una disponibilità all'apprendimento senza effettivo apprendimento. Se l'ambiente concede un premio riproduttivo ad un aumento della cultura aumenterà nell'ambito della specie la tendenza ad apprendere e si evolveranno parimenti le strutture che favoriscono tale tendenza.

Nell'uomo, che per il resto è un vivente al pari di tutti gli altri, è proprio la misura in cui la cultura contribuisce a definirne la natura che si pone con particolare drammaticità (oltre che con particolare difficoltà di analisi). È evidente che ogni bambino comincia a ricevere la cultura con il latte materno, come si usa dire, e questo latte culturale è altrettanto essenziale per la sua formazione umana che quello assunto dal seno o dal biberon; esso rappresenta un elemento essenziale per far parte a pieno titolo della nostra specie, per partecipare appieno della natura umana. Più che negli altri animali culturali, la sottrazione dei fattori ambientali che stimolano lo sviluppo dei raffinati tratti culturali della specie, ad esempio il linguaggio, si configurerebbe come un intervento artificiale di mutilazione.

Ma c'è indubbiamente dell'altro: si tratta del ritmo di modificazione della cultura. La velocità dell'evoluzione culturale non ha distaccato in modo netto nessuna specie da tutte le altre, né dalla velocità di adeguamento dell'ambiente circostante. Invece l'uomo ha distanziato tutte le altre specie tanto da espandersi su tutte le terre emerse, molto al di là degli altri primati. La rapidità della sua evoluzione culturale recente non permette nessun adeguamento ambientale prolungato per evoluzione delle singole specie o per assestamento dell'ecosistema, fenomeni che richiedono inevitabilmente tempi molto più lunghi.

Inoltre l'estrema divisione sociale del lavoro produce elementi culturali di parte. Frazioni dell'umanità, settori della società, esprimono così il loro interesse contro interessi e bisogni spontanei, contro aspetti più profondi ed essenziali della natura umana. La parte moderna del-

la cultura è essenzialmente artificiale, non ha quasi nulla a che vedere con la soddisfazione diretta dei bisogni primari. Forse una scelta di questo genere complica i problemi di analisi concettuale, invece che semplificarli, ma sembra più aderente alla realtà. Porta alla mobile conclusione che comunque è in base ad una cultura artificiale che si agisce, ed è inutile vagheggiare uno stato di natura che non ci è di nessuna utilità nelle scelte odierne. Costringe anche a dirimere ardui paradossi che ci troviamo ad affrontare come ricaduta di un passato incosciente o imprevedente o fazioso; ad esempio se rispetti più la natura umana favorire la contraccezione e ammettere l'aborto, oppure opporsi a queste soluzioni "artificiali". Ma è artificiale anche recuperare i nati prematuri con l'incubatrice o ricorrere alle cure mediche.

Riprendendo il discorso interrotto, non è solo a livello organismico che si rivolge l'intervento artificiale. A fini applicativi e di ricerca si fa ormai ampiamente ricorso anche a porzioni meno "autonome" della biosfera. Ad esempio si mantengono o si coltivano *in vitro* embrioni, organi, cellule; vi sono banche degli occhi, del sangue, dello sperma. Anche in questi casi è evidente che rimane un dato naturale ogni proprietà "vitale". Per contro viene artificialmente mantenuto in vita anche qualche cosa che sarebbe destinato a morire, a perdere le proprietà vitali, senza l'intervento artificiale. È evidente che gli occhi, ad esempio, sono destinati a morire insieme con il loro proprietario, se si lascia seguire alla natura il suo corso normale.

Come in tutti gli altri casi vale qui una certa ripercussione di ogni cambiamento al livello di aggregazione inferiore. Il livello di aggregazione ed energetico della vita è quello della chimica e della fisica tradizionali, con la specificità della complessità e della miniaturizzazione delle architetture molecolari coinvolte. L'unità di livello favorisce l'integrazione dei processi, che sarebbe più problematica in presenza di forti escursioni delle energie e dei livelli di integrazione. Ma non si tratta solo di questo. L'interdipendenza delle parti, che si rende necessaria in regime di economia di energie e di materiali, è un prodotto dell'evoluzione, è un fatto peculiare che contraddistingue la biosfera.

Inutile aggiungere che la maggior parte dei nostri bocconi di cibo sono staccati dalla biosfera, e in gran parte non sono crudi, ma trattati in vario modo. I trattamenti più comuni implicano un innalzamento termico (cottura). Nel corso di questo processo, quanto era rimasto di naturale del materiale messo a cuocere viene ulteriormente ridimensio-

nato: si disgregano le membrane cellulari, le proteine perdono la conformazione nativa, si idrolizzano molti legami ed altri se ne formano. Il grado di artificialità dei cibi può essere molto vario, interessando la loro provenienza e il loro trattamento.

9. *Artificiale “fuori ruolo”*

Le analisi filosofiche, solitamente preoccupate di rassicurare gli uomini sulla centralità del loro intelletto, tendono a trascurare i fatti sgradevoli, anche quando sono sotto gli occhi di tutti. Nessuno vuol negare le particolarissime potenzialità della nostra specie nella costruzione di oggetti, purché si ammetta parimenti che a questa attività sono indissolubilmente legate delle conseguenze che si stanno rivelando sempre più gravi. Ogni impostazione che non ne tenga conto non può non essere considerata storicamente superata, nonostante tanta parte della cultura contemporanea sembri non curarsene.

Mi riferisco al principio già affermato della generalità dell'effetto di qualsiasi intervento artificiale (§ 6) e al fatto che, nonostante le illusioni razionaliste, ciò si fa sentire non di rado e imprevedibilmente anche nella pratica. Inoltre, pur essendo l'intervento rivolto ad una parte specifica dell'ambiente per un motivo specifico, mobilita inevitabilmente la materia da un intorno più ampio, e in misura rilevante, come lo è l'intervento stesso. Questo intorno, tuttavia, è solo parzialmente connesso con lo scopo dell'intervento ovvero, per non cadere nel soggettivo, con l'oggetto artificiale risultante. In altri termini ogni intervento coinvolge, per sua stessa natura, una quota di massa ed energia che interessa l'ambiente al di là dell'oggetto risultante. È noto, del resto, che qualsiasi trasformazione energetica comporta quanto meno una perdita inevitabile sotto forma di calore che viene ceduto all'ambiente circostante, e il lavoro umano non può sottrarsi ai principi della termodinamica. D'altra parte l'energia muscolare comporta trasformazioni chimiche, come pure la più comune e la più primitiva fonte energetica non umana o animale, cioè la combustione. Inoltre vi sono sempre inevitabili trasferimenti di massa che nulla hanno a che vedere con l'intervento progettato. Se si spostano delle pietre si sposta sempre anche del terriccio o della polvere, si schiaccia qualche insetto, si abbassa il livello del suolo nel punto in cui si appoggia la pietra e lo si fa elevare nel pun-

to in cui la pietra era appoggiata prima. Per quanto microscopiche e secondarie, queste ricadute estranee alla funzione dell'intervento compaiono sempre.

Vi sono ricadute più caratteristiche, ovviamente. La paletnologia, per esempio, conosce bene i noduli di selce delle culture litiche. Essi rappresentano ciò che rimane dopo il distacco delle scaglie superficiali taglienti dal nodulo originario. Sono noti anche i rifiuti nei pressi di insediamenti preistorici, comprendenti ossa degli animali mangiati, armi diventate inservibili e altre scorie. Fin qui non si spaventa nessuno; tuttavia le ricadute estranee all'oggetto artificiale cui è finalizzato un lavoro possono essere estremamente rilevanti. Per produrre una tonnellata di acciaio si brucia un'immensa quantità di combustibile, si riscaldano e si disperdono 250 tonnellate d'acqua, si liberano nell'aria e sul terreno notevoli quantità di scorie. Per non ricordare certi orrori dell'industria chimica o dell'uso dell'energia nucleare. Il lavoro umano non viene compiuto per liberare scorie, ma queste conseguenze sono indissolubilmente legate all'intervento artificiale, anche se non sono inevitabili né la loro dimensione né la loro estensione.

Da notare, comunque, che queste sgradevoli ricadute non riguardano tanto gli altri livelli di aggregazione della materia, quanto quello più direttamente interessato dall'intervento. La ricaduta più ovvia e macroscopica della lavorazione del nodulo di selce per ricavarne l'ascia litica è la dispersione di schegge tutto attorno, ossia sempre di porzioni del nodulo originario con una geometria piuttosto casuale perché non ricercata (essendo le schegge estranee al "progetto") e con la stessa costituzione materiale del nodulo (a parte le superfici chimicamente reattive). Il carattere delle modificazioni è lo stesso dell'ascia, dell'oggetto artificiale vero e proprio; riguarda lo stesso livello di aggregazione della materia. Ciò è altrettanto vero per la preparazione dell'acciaio: i vari tipi di ricadute, soprattutto gli inquinamenti materiale e termico, riguardano lo stesso livello di modificazioni necessarie per ottenere l'acciaio.

Si rileva esplicitamente che le ricadute prive di ruolo sociale non si ripercuotono soltanto su ciò che è naturale, ma su tutto l'ambiente, compresi gli artefatti. L'inquinamento atmosferico, per intenderci, non compromette soltanto la salute dell'uomo e di tutti i viventi, non agisce solo sulla meteorologia del pianeta, ma rovina le opere in muratura e i documenti di carta dell'intera umanità, corrode le pietre del Partenone e l'epidermide dorata dei cavalli di San Marco.

Conviene pure notare come uno stesso materiale possa essere talvolta progetto e talvolta ricaduta. Nell'Europa del secolo scorso andavano in cerca di sambuco sia il pastorello sia l'insegnante di fisica: il primo scartava il midollo e ricavava uno zufolo dal bastoncino forato, il secondo toglieva il legno esterno e dal midollo ricavava delle palline leggere con le quali eseguiva gli esperimenti di elettrostatica. In generale, però, si tratta di prendere atto di una realtà meno idilliaca, nella quale si registrano vari tentativi di mettere a frutto in qualche modo le ricadute. Già all'uomo del paleolitico non interessava solo l'ascia; egli raccoglieva le scaglie più adatte, fra quelle che gli erano schizzate intorno, per utilizzarle a mo' di coltellini. Quanto alle altre, si confondevano presto con qualsiasi altro sasso del luogo. Oggi si recupera il ferro dai rifiuti solidi urbani, si nutrono i maiali con gli scarti dei caseifici, si inducono le anguille ad alimentarsi anche d'inverno allevandole nell'acqua di raffreddamento delle acciaierie. Ma non c'è nulla che arrivi a confondersi rapidamente con gli elementi naturali del luogo. Millenni di esperienza hanno dimostrato che gli scarti della stalla sono preziosi concimi di cui nulla va perduto. Il contenuto del letamaio rientra nei progetti del contadino allevatore. Oggi, in pochi decenni, si è giunti a questo: gli escrementi dei maiali vengono scaricati a perdere, e i campi vengono concimati con i prodotti delle industrie chimiche. È stato rotto un ciclo integrato fra natura e mondo artificiale. Nelle discariche riempite di scorie industriali non c'è nulla di cui si possa intravedere un utilizzo. Enormi quantità di ricadute artificiali vengono accumulate senza uno sbocco prevedibile: il resto, infinitamente superiore in quantità, viene disperso nell'atmosfera, nelle acque e sul suolo del nostro pianeta. La loro mancanza di ruolo sociale fa sì che non vengano conservate presso le comunità, la loro nocività induce ad allontanarle, facendole così dilagare e compromettendo alla lunga l'omeostasi degli ecosistemi su scala planetaria.

10. Sintesi conclusiva

Abbiamo visto, in primo luogo, che il problema della distinzione fra "naturale" e "artificiale" viene risolto in modo radicalmente diverso dalle maggiori correnti di pensiero del mondo contemporaneo. Da un esame essenziale delle loro soluzioni mi sento autorizzato a riformulare il

problema in termini tali da farlo rientrare nel campo scientifico. Infatti, secondo le scienze del comportamento animale (e umano), è plausibile una definizione oggettiva di “cultura” come insieme delle informazioni frutto di apprendimento e non di istinto. D’altra parte, se si ritiene artificiale tutto ciò che viene fatto su base culturale, come viene qui proposto, non sembrano emergere forzature rispetto a quanto viene ricompreso nel concetto di artificiale da parte del linguaggio comune.

In secondo luogo ho tentato di precisare gli effetti dei comportamenti culturali, ossia i caratteri degli artefatti. Questi ultimi possono essere unici o ripetuti, possono presentare elementi stereotipati come no; ma il loro carattere fondamentale sta nella conservazione di una quota di naturalità. Essi risultano sempre dalla modificazione su base culturale di qualche cosa che preesiste in natura e che sempre conserva residui maggiori o minori della sua naturalità. Inoltre si rimarca che l’intervento artificiale produce inevitabilmente delle conseguenze collaterali e che proprio queste sono aumentate a dismisura negli anni recenti della storia umana.

Lo scopo che mi ero prefisso consisteva nel controllare l’ipotesi che la particolare situazione di crisi accennata all’inizio di questo scritto fosse riconducibile, nei suoi tratti essenziali, a criteri interpretativi molto generali. Ritengo di avere effettivamente dimostrato che il concetto di artificiale gioca un ruolo fondamentale nell’approfondimento di tali criteri interpretativi. Inoltre accettarlo come concetto scientifico pone le premesse per un suo utilizzo basato sugli strumenti abituali della scienza: i dati empirici, la quantizzazione, eccetera. Infine l’individuazione dei caratteri essenziali degli artefatti può avviare l’analisi dei rischi e dei benefici ad essi connessi in termini più generali ed obiettivi. La strada per le indicazioni concrete rimane certamente molto lunga, ma mi sia consentito ugualmente di coltivare la speranza che anche da un contributo teorico possano discendere suggerimenti utili al miglioramento della qualità della vita umana presente e futura.

Ringraziamenti

Ho trovato sempre profonde e stimolanti le osservazioni del prof. M. Aloisi nel corso delle numerose conversazioni avute su questo scritto e sulla tesi di perfezionamento che lo ha preceduto (vedi nota 1). Inoltre ho

molto apprezzato la libertà e la comprensione che mi sono state concesse ad ogni passo nel prospettare soluzioni e nel rivederle, nel rifarmi ad altri o nel cercare in modo originale. Sono molto lieto che mi si offra ora l'opportunità di esprimergli, per tutto questo, la mia gratitudine.

Sono molto grato anche al prof. B. Battaglia e al prof. M. Gentile per le utili osservazioni e per il sostegno accordatomi. Di valido aiuto mi sono state anche le critiche e i suggerimenti degli amici A. Bincoletto, A. Bisazza, L. Grazian, L. Ossi e C. Zuliani.

Riferimenti bibliografici

Aloisi M. (1980), *L'uomo e la sua naturalità*, «Quaderni di critica marxista», 2, pp. 463-476.

Amsterdamsky S. (1980), *Naturale/artificiale*, in *Enciclopedia Einaudi*, vol. 9, pp. 792-821.

Aristotele, *Opere*, vol. 3, Laterza, Bari, 1973.

Bonner J.T. (1980), *The Evolution of Culture in Animals*, Princeton Univ. Press, Princeton.

Casini P. (1975), *Natura*, Isedi, Milano.

Chauvin R., Chauvin B. (1977), *Il comportamento degli animali*, Laterza, Bari, 1978.

Conti L. (1977), *Che cos'è l'ecologia*, Mazzotta, Milano.

Engels F. (ed. tedesca del 1952), *Dialettica della natura*, Editori Riuniti, Roma, 1971.

Jacob F. (1970), *La logica del vivente*, Einaudi, Torino, 1971.

Lorenz K. (1978), *L'etologia*, Boringhieri, Torino, 1980.

Marx K. (ed. tedesca del 1956), *Il capitale*, libro I, Editori Riuniti, Roma, 1964.

Mit - Club di Roma (1974), *I limiti dello sviluppo*, Mondadori, Milano.

Monod J. (1970), *Il caso e la necessità*, Mondadori, Milano, 1970.

Omodeo P. (1983), *Biologia*, UTET, Torino.

Pardi L. (1970), *Comportamento*, Enciclopedia della scienza e della tecnica, Mondadori, vol. 4, pp. 116-117.

Schmidt A. (1962), *Il concetto di natura in Marx*, Laterza, Bari, 1969.

Wilson E.O. (1978), *Sulla natura umana*, Zanichelli, Bologna, 1980.

La genetica fra storia e logica¹

in «Didattica delle Scienze», n. 130 (1987)

Nella stragrande maggioranza dei libri di testo perdura una vera e propria identificazione della genetica, al suo livello più elementare e fondamentale, con le famose leggi di Mendel. Da esse prende le mosse la ricapitolazione storica delle scoperte con il relativo ampliamento delle conoscenze. In generale questa linea espositiva, che potremmo chiamare storica, presenta qualche vantaggio, ma anche molte insidie: in primo luogo quella di incorrere facilmente in alterazioni della storia stessa, come ha messo efficacemente in evidenza Kuhn (1969, per esempio a pagina 168). La cosa è poco educativa di per sé perché l'alterazione della storia non differisce molto dalla sua manipolazione. Inoltre non è molto credibile un insegnamento delle scienze che non sia scientifico nei confronti delle vicende storiche.

Per non rimanere sulle generali applichiamo questa riflessione al caso Mendel richiamando brevemente la controversa questione dei suoi dati quantitativi e il problema del suo nome legato alle famose leggi. Nella sua memoria del 1866 Mendel riferisce tutti i suoi dati, cioè il numero dei vari tipi di piselli ottenuti dagli incroci. Questi numeri furono sottoposti da Fisher (1936) ad una serrata analisi statistica e risultò che avrebbero potuto essere stati manipolati. Infatti la probabilità che i numeri trovati da Mendel rispettassero così da vicino le proporzioni at-

1. Autori M. Rizzotti, A. Zanardo [n.d.C.].

tese fra i diversi fenotipi si rivelava bassissima. Peraltro il metodo statistico usato da Fisher viene contestato da Pilgrim (1986) e da Weiling (1986) i quali, adottando un controllo statistico differente, dimostrano come i dati di Mendel siano perfettamente compatibili con quelli che ci si potrebbe aspettare. Dati analoghi sono stati effettivamente ottenuti nel corso delle numerose ripetizioni dei suoi esperimenti effettuate dopo il 1900. Ma non è detto, ovviamente, che la questione sia chiusa.

Inoltre quando si parla di leggi di Mendel tutti sono indotti a ritenere che siano state enunciate come tali da lui, mentre non è così. Egli parla della legge scoperta per il pisello, la verifica per il fagiolo e si pone il problema della sua generalità. Tuttavia, secondo Monaghan e Corcos (1985), Mendel aveva per gli ibridi di pisello un interesse empirico e non teorico, per cui non c'era da aspettarsi l'enunciazione di leggi generali dell'eredità. In effetti tali leggi sono state enunciate nella forma attuale solo dopo la loro riscoperta nell'anno 1900. Fra l'altro nella tradizione italiana viene definita "prima legge di Mendel" quella dell'uniformità degli ibridi della prima generazione (detta talvolta della dominanza), mentre questa regola non viene presentata come legge nella tradizione anglosassone, che presenta come prima legge quella che nella nostra tradizione risulta seconda, cioè quella della segregazione o disgiunzione al-lelica (la terza legge è quella dell'assortimento indipendente).

Comunque non ci sono soltanto ragioni negative per superare, nella genetica, l'esposizione storica. Questo metodo espositivo è adatto alle discipline che non hanno raggiunto un'intelaiatura teorica sufficiente a precisarne e a collegarne i principi fondamentali. Quando tale fase viene raggiunta si opta per una sistemazione (e un'esposizione) della disciplina che parta dall'enunciazione dei principi fondamentali stessi e si sviluppi traendo da questi le conseguenze (logiche) rilevanti. In questo modo risulta chiara la distinzione tra ciò che si è assunto (i principi) e ciò che non può non essere vero una volta accettati i principi.

L'esempio più antico e più noto di questo tipo di sistemazione teorica è quello della geometria degli *Elementi* di Euclide, compilati intorno al 300 a.C. Negli *Elementi* vengono dapprima enunciati i famosi postulati, quindi si ricavano i teoremi. Questo rimane il modo più economico e rigoroso di sviluppare e di esporre la geometria, ed anche quello che mette in grado di impadronirsene correttamente nel minor tempo in quanto, una volta in possesso del nucleo centrale, l'intero corpo della geometria può essere dedotto col solo ragionamento essendo potenzialmente con-

tenuto nel nucleo centrale stesso. Anche ritenendo che lo scopo della geometria sia quello di descrivere i rapporti fra figure “reali”, nessuno si sognerebbe di dimostrare un qualsiasi teorema mediante misurazioni. Alcuni ritengono, comunque, che gli *Elementi* si discostino dai canoni del metodo assiomatico attuale (Fowler, 1983; Mueller, 1969).

Il metodo assiomatico sviluppato dalla moderna logica matematica è molto esigente. Ogni operazione si svolge secondo criteri rigorosi e formalizzati. La questione può essere eventualmente approfondita partendo dai primi capitoli del Crossley (1972) oppure dal libro della Dalla Chiara (1974) che è completo anche sul piano dei riferimenti storici e filosofici. Qui basterà dire che tutti i concetti e le relazioni sono rappresentati mediante segni convenzionali. La loro adozione implica la scomposizione di teorie complesse in ragionamenti elementari permettendo di riconoscere e superare le ambiguità delle espressioni del linguaggio ordinario.

In effetti una strutturazione logica di una teoria (o del nucleo centrale di una disciplina) consiste in una serie di proposizioni con diverso valore. Essenzialmente alcune sono definizioni, altre assiomi, altre teoremi. Le proposizioni sono asserzioni riguardanti relazioni fra i concetti studiati dalla disciplina. Alcuni di questi concetti e relazioni possono essere definiti sulla base di altri (generalmente più semplici); le definizioni sono appunto quelle proposizioni che introducono nuovi enti mediante altri già noti. I concetti e le relazioni che non vengono definiti per mezzo di altri vengono detti primitivi e costituiscono le nozioni fondamentali o primitive. Vale la pena di notare che una nozione può essere primitiva sia perché, allo stato attuale della conoscenza, è impossibile una sua scomposizione in nozioni più semplici, sia perché una tale scomposizione non è significativa dal punto di vista della disciplina in oggetto; sarebbe quindi opportuno parlare di nozioni primitive rispetto alla disciplina (e alle attuali conoscenze). Gli assiomi sono le proposizioni assunte come fondamentali, cioè non dimostrabili. Le proposizioni da essi ricavate per deduzione sono i teoremi; ricavare un teorema significa dimostrarlo.

Il metodo assiomatico moderno è stato successivamente applicato alla matematica, alla fisica e alla chimica. La biologia si è dimostrata piuttosto refrattaria ad una riduzione a pochi e semplici principi basilari (Aloisi, 1962). Tuttavia la genetica rappresenta proprio la parte della biologia che ha assunto fin dai primi anni del secolo una struttura formale piuttosto precisa. In fondo le stesse leggi di Mendel, con il loro carattere quantitativo, attestano questa particolarità della genetica.

A suo tempo (1952) un biologo inglese, Woodger, propose una rigorosa struttura formale della disciplina partendo proprio dalle leggi di Mendel. In pratica diede una forma assiomatica all'esposizione tradizionale. Ma la medesima teoria può essere svolta assumendo diversi assiomi e diverse nozioni fondamentali. Un indice della economicità di un sistema è costituito dalla diminuzione, rispetto agli altri, delle nozioni fondamentali e degli assiomi. È difficile condurre un confronto completo fra diversi sistemi assiomatici, tanto più se questi non vengono sviluppati completamente nella stessa direzione, nel senso che ciascuno può privilegiare settori differenti della genetica.

Oggi si può compiere un'operazione analoga a quella di Woodger, con grandi vantaggi dal punto di vista dell'economia dei principi fondamentali, partendo dalle acquisizioni della genetica molecolare. Dall'inizio del secolo i progressi della genetica sono stati enormi e, quel che è più importante, non sono consistiti solo in ampliamenti delle conoscenze, ma sono avvenuti su un piano realmente fondamentale qual è quello molecolare, che si può considerare il piano ultimo delle spiegazioni biologiche. Questi progressi hanno posto in evidenza la limitatezza dei principi precedenti, a cominciare dalle cosiddette leggi di Mendel. È possibile dimostrare rigorosamente che tali leggi non sono altro che casi particolari di leggi più generali ricavabili da pochi principi fondamentali. I tempi sono maturi, insomma, per una ristrutturazione del corpo fondamentale della disciplina. In questa nuova strutturazione logica della genetica diminuisce il numero degli assiomi, cioè delle assunzioni non dimostrate, rispetto a quello dei teoremi, cioè degli asserti dimostrabili. Il sistema formalizzato elaborato dagli autori a partire dal 1981 dà molta importanza proprio alla economia di simboli, di nozioni primitive e di assiomi rispetto, soprattutto, al sistema di Woodger. Senza appesantire con formalismi questa esposizione basterà dire che le nozioni primitive si riducono a due concetti e a tre relazioni. I concetti (o costanti individuali) corrispondono all'insieme dei "tratti di DNA" e all'insieme degli "zigoti neoformati". Le relazioni sono quelle di "è identico a", di "è omologo a" e di "generano"; quest'ultima si applica a due zigoti parentali P_1 e P_2 che generano uno zigote filiale F . Mediante tali nozioni risulta possibile definire (sia pure con alcune semplificazioni), il "cromosoma" e altri enti significativi. Questo apparato permette di enunciare tre assiomi (A 1-3) che nel linguaggio ordinario suonano nel modo seguente:

A1: *In ogni zigote ogni cromosoma ha un unico cromosoma omologo.*

A2: *I due zigoti parentali (P_1 e P_2) contribuiscono con un cromosoma ciascuno ad ogni coppia di cromosomi omologhi di uno zigote filiale (F).*

A3: *Per ogni cromosoma dello zigote parentale c'è un cromosoma omologo nello zigote filiale.*

Questi tre assiomi stabiliscono quella che può essere chiamata una “meccanica cromosomica” dalla quale è possibile ricavare alcune leggi elementari dell’eredità, purché si prescindano dall’esistenza degli eterocromosomi, dalla ricombinazione e da altre complicazioni che si possono specificare in dettaglio (Rizzotti e Zanardo, 1986). Inoltre è evidente che ci si riferisce ad individui e non a popolazioni, ma la trasformazione di questi principi dell’eredità individuale in principi dell’eredità delle popolazioni non è concettualmente complicata. Una volta compiuta questa trasformazione e assunte opportunamente altre proposizioni (Rizzotti e Zanardo, 1983) si possono ricavare le cosiddette leggi di Mendel. Se ne ricavano anche svariate altre; anzi, come già è stato detto, le leggi di Mendel risultano di fatto casi particolari di leggi più generali.

Come esempio di quest’ultima affermazione possiamo prendere quella che nella tradizione italiana è presentata come prima legge di Mendel. Nella forma individuale (invece che di popolazione) e nei riguardi dei cromosomi (invece che dei geni) essa si può così enunciare: *Due zigoti parentali omozigoti, ma differenti per un certo cromosoma, generano un unico tipo di zigote filiale.* Gli zigoti parentali citati corrispondono a quelli appartenenti a due differenti linee pure di Mendel; dello zigote filiale non si riferisce l’assetto cromosomico. La legge enunciata può essere ricavata dalla seguente che esprime qualche cosa di più, e precisamente l’assetto (eterozigote) dello zigote filiale per il cromosoma preso in considerazione: *Due zigoti parentali omozigoti, ma differenti per un certo cromosoma, generano uno zigote filiale eterozigote per quel certo cromosoma.* Questa, a sua volta, può essere ricavata da una ancora più generale: *Due zigoti parentali omozigoti per cromosomi omologhi generano zigoti filiali con un cromosoma omologo identico a quello di uno zigote parentale e con l’altro cromosoma omologo identico a quello dell’altro zigote parentale.* Ma l’omozigosi per un cromosoma è un caso un po’ speciale; in generale: *Due zigoti parentali generano zigoti filiali nei quali, per ogni coppia di cromosomi omologhi, è rappresentato uno dei due cromosomi omologhi di ciascuno zigote parentale.* Questa legge si ricava direttamente dai tre assiomi citati sopra.

Come si vede, anche da una presentazione informale nella quale sono state tralasciate varie precisazioni, la sequenza delle proposizioni si traduce in un lavoro lungo e pedante (Rizzotti e Zanardo, 1986). L'aspetto formalizzato (Zanardo e Rizzotti, 1986) è ancora più indigesto, come si può immaginare. In una ristrutturazione effettiva della esposizione della genetica è impensabile propinare la genetica formalizzata secondo la logica matematica ed è quasi altrettanto impensabile propinarla nella versione informale esemplificata sopra. L'una e l'altra sono servite solo a dimostrare la struttura più economica che la disciplina può assumere. Essa può avere efficacia didattica solo se messa in forma adeguata, come si fa con la geometria o con la fisica. Un tentativo in tal senso del tutto preliminare, ma dimostratosi didatticamente efficace, è già stato fatto con la genetica umana (Rizzotti, 1979), ma la riconversione dell'intera disciplina non può non richiedere molti anni di esperienze didattiche.

Naturalmente la genetica che si richiama a Mendel riguarda solo una parte dei fenomeni genetici. In particolare riguarda quelli che avvengono negli organismi eucarioti diploidi che si riproducono sessualmente. La genetica nel suo insieme riguarda invece tutti gli organismi, compresi quelli procarioti e i virus. Una ristrutturazione della disciplina fondata sulla genetica molecolare risulta più economica anche perché i suoi principi valgono per tutti gli organismi. È a questa concezione generale e fondamentale della genetica che dovrà rivolgersi con più impegno il processo di formalizzazione. Concludiamo rispondendo ad un paio di obiezioni che possono essere facilmente sollevate. Alcuni ritengono che lo sviluppo storico di una disciplina coincida con lo sviluppo logico. Invece non è così; anzi, di solito avviene il contrario: anche nella fisica le prime leggi scoperte furono meno generali di quelle formulate in seguito. Oppure può sembrare che mantenere il metodo tradizionale significhi partire dalle esperienze empiriche dando quasi l'illusione di ricavare le leggi da sé. Ma questo procedimento, se lo si preferisce, può essere seguito sia per ricavare delle leggi particolari, come quelle di Mendel, sia per ricavare le leggi più generali della genetica moderna. È solo una questione di scelta delle esperienze da proporre agli studenti.

Gli autori sono grati a R. Costa, professore di Genetica all'Università di Padova, per le segnalazioni bibliografiche e le utili osservazioni sul manoscritto.

Riferimenti bibliografici

ALOISI M. (1961), *Sulla formalizzazione del linguaggio biologico*, «Atti Soc. Med. Ch. Padova», 36, pp. 7-38.

CROSSLEY J.N. (1972), *Che cos'è la logica matematica?*, Boringhieri, Torino, 1976.

DALLA CHIARA SCABIA M.L. (1974), *Logica*, Isedi, Milano.

FISHER R.A. (1936), *Has Mendel's work been rediscovered?*, «Annals of Science», 1, pp. 115-137.

FOWLER D.H. (1983), *Investigating Euclid's Elements* (Review Article), «Brit. J. Phil. Sci.», 34, pp. 57-70.

KUHN T.S. (1962), *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Torino, 1969.

MENDEL G. (1866), *Versuche ueber Pflanzen-Hybriden*, «Verh. naturforsch. Verein Bruenn», 4, pp. 3-47.

MONAGHAN E., CORCOS A. (1985), *Mendel, the empiricist*, J. Heredity 76, pp. 49-54.

MUELLER I. (1969), *Euclid's Elements and the axiomatic method*, «Brit. J. Phil. Sci.», 20, pp. 289-309.

PILGRIM I. (1986), *A solution to the to-good-to-be-true paradox and Gregor Mendel*, J. Heredity 77, pp. 218-220.

RIZZOTTI M. (1979), *Tentativo di esporre in forma "assiomatizzata" le basi fondamentali della genetica umana*, Dispensa, Università di Padova.

RIZZOTTI M., ZANARDO A. (1981), *Assiomatizzazione e formalizzazione delle leggi elementari della genetica classica*, «Atti AGI», 28, pp. 339-340.

RIZZOTTI M., ZANARDO A. (1983), *Use of modal logic in the axiomatization of genetics*, Abstracts XV Int. Congress Genetics, p. 819.

RIZZOTTI M., ZANARDO A. (1986), *Axiomatization of genetics. 1. Biological meaning*, J. theor. Biol., 118, pp. 61-71.

WEILING F. (1986), *What about R. A. Fischer's statement of the "too good" data of J. G. Mendel's Pisum paper?*, J. Heredity 77, pp. 281-283.

WOODGER J.H. (1952), *Biology and language*, Cambridge Univ. Press., Cambridge.

ZANARDO A., RIZZOTTI M. (1986), *Axiomatization of genetics. 2. Formal development*, J. Theor. Biol., 118, pp. 145-152.

Considerazioni finali di *Materia e vita*

in *Materia e vita. Big bang, origine ed evoluzione del vivente*, 1991

È stato tracciato a grandissime linee il corso delle vicende passate dell'universo. Tale corso è stato ricostruito in base a quelli che vengono ritenuti essere i fenomeni fondamentali, i processi più generali cui è soggetta la materia. Sulla stessa base è stato prospettato il futuro dell'universo.

Passando ad una scala infinitamente più piccola è stata messa a fuoco l'evoluzione dei corpi del Sistema Solare e si è cercato di capire, in particolare, che cosa possa essere accaduto sulla Terra per conferire alla sua superficie delle proprietà tanto strane. Qui i gradienti di sostanze e di energia, i processi di avvicinamento alle situazioni di equilibrio, hanno messo in moto e alimentato delle strutture in grado di strutturare a loro volta, secondo il medesimo tipo di ordine, una quantità sempre maggiore di materia. Molto presto vennero meno le condizioni per la formazione ex novo di altre strutture simili, ma in quelle esistenti il reclutamento di nuova materia rimase mediamente più rapido della degradazione. Nonostante alti e bassi, il processo globale rimase quello di un aumento della massa dell'intera biosfera, e di una straordinaria diversificazione dei singoli filoni evolutivi al suo interno.

Si può dire qualche cosa anche sul futuro della biosfera? L'imprevedibile concatenazione di eventi determinanti per ogni sua tappa evolutiva impedisce di rifarsi, come per gli altri corpi dell'universo, ai processi generali della materia. Non si può escludere neppure il presentarsi all'improvviso di un episodio catastrofico in grado di compromettere le condizioni di esistenza dell'intera biosfera. In assenza di fatti del ge-

nere la biosfera dovrebbe proseguire la sua evoluzione per altri miliardi di anni, sfruttando in modo sempre più efficace i gradienti terrestri, crescendo e diversificandosi in forme imprevedibili.

Invece le cose stanno molto diversamente. Il destino della biosfera è finito nelle mani di un'unica specie e, a causa delle stravaganti attività di tale specie, ha subito un cambiamento paragonabile a quello di una catastrofe, ma con caratteri nuovi e un andamento singolare, rispetto alle catastrofi naturali: la catastrofe è iniziata lentamente qualche millennio addietro e da allora è avanzata ad un ritmo sempre maggiore.

In particolare la copertura vegetale dei continenti è stata ridotta a velocità crescente influenzando sulla meteorologia del pianeta, portando a sensibili modificazioni della composizione atmosferica e facendo mancare le condizioni di sostentamento a molte specie. Le specie "nobili" di cui è documentata l'estinzione in tempi preistorici o storici sono già migliaia; molte altre specie sono subestinte, cioè sopravvivono in uno stato di semicattività, con i comportamenti ordinari ormai inutili, con i cicli vitali sconvolti, con l'area di diffusione ridotta o comunque trasformata in modo innaturale. Praticamente tutti i Mammiferi selvatici (circa 3700 specie) si trovano in questa condizione: stilare elenchi delle forme minacciate è ormai inutile. La loro estinzione definitiva è solo questione di tempo dal momento che sta procedendo al ritmo di una specie all'anno. Allo stesso ritmo si stanno estinguendo gli Uccelli (circa 8600 specie).

Ma si estinguono continuamente anche altri Vertebrati, Insetti, Piante di ogni genere, e certamente tante specie "umili" di cui nessuno si occupa (batteri, amebe, vermi, funghi) e che non saranno mai neppure identificate e descritte. Si stima che il ritmo di estinzione globale causato dalla deforestazione e dall'inquinamento sia giunto intorno alle 5000 specie all'anno. Lo studio degli organismi viventi sta diventando una scienza "nostalgica", un po' come lo studio delle caratteristiche fisiche e culturali di quelle popolazioni umane che popolavano interi continenti prima che questi venissero invasi e sfruttati dagli europei.

È un po' deprimente paragonare l'andamento di questa catastrofe con quello della crescita delle conoscenze umane e delle capacità tecniche: la coincidenza non lascia adito a dubbi. Ciò vale, in verità, anche per la biologia e per i suoi sviluppi molecolari: l'affluire dei dati aumenta più rapidamente dei criteri adeguati a studi comparativi a largo raggio. La cosa è particolarmente evidente proprio nel caso dei geno-

mi. I continui successi dell'ingegneria genetica, alla quale vengono posti ormai obbiettivi colossali quali il sequenziamento completo del genoma della nostra specie, solleva spesso euforia, tanto che alcuni accentuano l'enfasi sul DNA al punto da sfiorare l'idolatria.

Questo atteggiamento dev'essere temperato da un paio di considerazioni. In primo luogo le tecnologie sono passibili di applicazioni che poco hanno a che vedere con il bene dell'umanità. Le manipolazioni genetiche potranno forse correggere difetti ereditari gravi, potranno forse migliorare certe produzioni vegetali, ma possono anche servire subito a costruire nuovi agenti infettivi a scopi bellici. Fra l'altro, più la scienza diventa complicata e costosa, più si restringe la rosa di coloro che sono in grado di utilizzarla; di conseguenza sfugge al controllo, comunque esercitato, da parte degli uomini comuni, cioè da parte della grande maggioranza dell'umanità.

In secondo luogo è impossibile determinare a priori tutte le potenzialità patogene di una particella infettiva, anche costruita a scopo benefico, nonostante le bonarie assicurazioni dei saccenti asserviti al potere economico. È illusoria perfino ogni garanzia sul destino dei batteri sparsi nei campi per impedire alle colture i danni del gelo. La miriade di fattori che influisce sull'evoluzione dei viventi sfugge ad ogni pretesa di descrizione esaustiva, di controllo e di previsione.

In effetti non va persa di vista la totalità della cellula e dell'organismo, il DNA è molto importante, ma non è tutto. Possiamo identificarlo con il genoma, secondo l'uso corrente, purché non si identifichi a sua volta il genoma con l'intera eredità biologica. Nel patrimonio ereditario della cellula c'è dell'altro. Jacob stesso ci avverte che il genoma "è soltanto un programma: nei processi di copiatura della sequenza nucleica ai fini della riproduzione e della sintesi proteica, l'acido desossiribonucleico svolge la funzione puramente passiva di matrice. Al di fuori della cellula, senza i mezzi per mettere in esecuzione i suoi progetti, senza gli apparecchi di copia e di traduzione, esso resta inerte, così come è inerte un nastro magnetico al di fuori del registratore. La memoria dell'eredità, come la memoria di un calcolatore, non agisce da sola. Il messaggio genetico, perfettamente funzionale in seno alla cellula, da solo non fa nulla; esso è in grado unicamente di guidare il comportamento di altri elementi cellulari [...] solo la cellula nella sua globalità è capace di crescere e di riprodursi, poiché essa soltanto possiede, nel medesimo tempo, il programma e le sue modalità di impiego, i proget-

ti e gli strumenti per realizzarli” (Jacob, 1970, p. 326). Infatti alla generazione successiva non vengono trasmessi solo i progetti, ma anche, per l'appunto, gli strumenti per realizzarli, cioè un'intera cellula.

Detto questo non si deve cadere nell'unilateralismo opposto di sottovalutare l'eredità sotto forma di DNA. Il genoma dei viventi attuali costituisce effettivamente un patrimonio inestimabile e irripetibile, seriamente minacciato, oltre che dalle estinzioni, dalla crescente diffusione di agenti mutageni di natura fisica e chimica prodotti dalle nostre società.

Troppi accettano la situazione descritta come un dato di fatto immodificabile e vedono ogni rimedio o nello sviluppo tecnologico o nel proseguire dell'evoluzione. Sul versante dello sviluppo tecnologico appare ben triste affidare la sopravvivenza e, se è lecito, un minimo di felicità, ad interventi farmacologici e chirurgici, a protesi e a correzioni genetiche; sull'altro versante basta osservare che i meccanismi evolutivi sono ben lontani dal poter adattare la nostra specie (come le altre) ai nuovi e profondi cambiamenti ambientali che l'industrializzazione sfrenata introduce incessantemente. Non a caso l'ascesa dell'uomo si è accompagnata soltanto ad estinzioni di specie e non alla comparsa spontanea di nuove specie.

Nulla vieta, al contrario, di considerare la situazione modificabile, suscettibile non solo di una battuta d'arresto, ma anche di un'inversione che tenda a ripristinare nei tratti essenziali l'ambiente in cui la nostra specie (con le altre) si è evoluta per milioni di anni. Tale ambiente costituisce tuttora, per l'uomo, la migliore garanzia di salvaguardia del suo genoma e della sua stessa integrità complessiva. Del resto le contropartite alla degradazione ambientale sono una minacciosa incertezza del futuro, un discutibile benessere materiale in alcuni paesi del mondo e l'arricchimento di pochi. Vale la pena di continuare a subire questa situazione?

Che tipo di sistema è un vivente?

in «Rivista di Biologia», *B. Forum*, n. 86 (1993)

Mario Ageno, il più noto biofisico italiano, nacque a Livorno nel 1915 ed è morto a Roma il 23 dicembre 1992. Nel 1992 ha pubblicato ben tre libri: *Metodi e problemi della biofisica* (Theoria), *Le origini della irreversibilità* (Bollati Boringhieri) e *Punti cardinali* (Sperling & Kupfer). Se quest'ultimo può essere considerato una sorta di lascito intellettuale complessivo, la sua opera più organica sul piano strettamente scientifico è uscita l'anno precedente (*Dal non vivente al vivente*¹). Fra i molteplici argomenti che quest'opera affronta, uno è degno da solo di un'analisi particolareggiata: si tratta del problema centrale della biologia teorica, cioè la definizione di organismo vivente. Che su tale definizione non ci sia accordo è noto (Morpurgo G., Sermonetti G., Riv. Biol. 85, p. 41). Ageno fa la scelta, non congeniale ai biologi (ma certo più congeniale a lui, che proveniva dalla fisica), di riferirsi esclusivamente ai parametri generali delle scienze fisiche. Come le nane bianche sono caratterizzate essenzialmente dalla densità e dallo spettro luminoso, così tutti i fenomeni, viventi compresi, vanno caratterizzati sulla base dei criteri discriminativi più basilari ed essenziali. La sua definizione, già proposta qualche anno addietro (*Le difficoltà del problema dell'origine della vita*, in Bullini et al., *La vita e la sua storia*, pp. 41-68. Scientia, Milano 1985; *Le radici della biologia*, Feltrinelli, Milano 1986), è di un'estre-

1. Mario Ageno, *Dal non vivente al vivente*, Theoria, Roma-Napoli 1991.

ma concisione: l'organismo vivente è “*un sistema chimico coerente dotato di programma*”.

La concisione obbliga però all'interpretazione. Finché si parla di *sistema chimico* è chiaro che si allude a condizioni compatibili con l'esistenza degli atomi, quanto meno. In effetti tali condizioni non vigono affatto nei corpi che racchiudono quasi per intero la massa rivelabile dell'universo, cioè le stelle: in esse gli elettroni sono svincolati dai singoli nuclei, perciò non danno luogo ad atomi. Di più, le condizioni della vita sono compatibili con l'esistenza di un grande numero di legami chimici diversi, quindi i viventi sono corpi freddi. Non troppo freddi, però, altrimenti viene meno la possibilità dei processi chimici ripetitivi che costituiscono il metabolismo. L'esistenza di una qualche forma di attività metabolica, almeno transitoria, è oggi ritenuta da tutti fondamentale (De Duve, *Blueprint for a cell*. Patterson, Burlington 1991; Koppers, *Information and the origin of life*. MIT Press, Cambridge 1990).

Tuttavia l'espressione *sistema chimico* non chiarisce a sufficienza che si allude a stati condensati della materia anziché a gas, né che si allude a sistemi delimitati, termodinamicamente aperti, lontani dall'equilibrio. Mentre altri (Omodeo, *La teoria del vivente e l'evoluzionismo*. Scientia, 118, pp. 31-49, 1983) si sentono costretti a precisare che il vivente è un “sistema aperto, benché delimitato, autoriproducibile ...”, Agno ricomprende tutte queste proprietà sotto la *coerenza*. In termini generali egli contrappone i sistemi coerenti a quelli legati. I primi sono caratterizzati da processi “coerenti”, mentre i legami fra le loro componenti sono pressoché ininfluenti; i secondi sono invece caratterizzati dai legami fra le componenti, mentre i processi sono ininfluenti per la loro costituzione. La differenza sembra però una questione di sottolineatura di un aspetto e dell'altro, e quindi una questione largamente soggettiva, che allontana dall'idea di riferirsi a parametri generali. Non si vede alcun motivo per contrapporre i due tipi di sistemi: un sistema condensato è per sua natura “legato”, perché non solo gli atomi, ma le stesse molecole degli stati condensati sono tenute assieme da legami chimici. Si tratterà di legami non covalenti, si potrà discutere di energia relativa dei vari legami; ciò non toglie che si sia in presenza di legami fra atomi. Allo stato condensato, perciò, un sistema coerente è un caso particolare di sistema legato. Potranno esistere dei sistemi coerenti parzialmente allo stato gassoso come il “cielo a pecorelle” (p. 144), ma questi non hanno a che vedere con i viventi, e comunque sono anch'essi legati, sia pure dal-

la forza gravitazionale invece che da quella elettromagnetica dei legami chimici. Singolare è che Ageno prenda le distanze anche da Prigogine con la motivazione che quest'ultimo, con le sue strutture dissipative, si occupa solo di sistemi coerenti strutturati. In realtà è fuor di dubbio che questi ultimi sono decisamente più interessanti dei sistemi coerenti non strutturati, come modello dei viventi; la strutturazione, semmai, dovrebbe essere talmente spinta da comprendere la delimitazione, il che non è affatto implicito nel concetto di struttura dissipativa. Del resto la delimitazione spaziale, lungi dall'essere incompatibile con i processi che contraddistinguono la vita, è loro indispensabile: in sua assenza i processi stessi si dissolverebbero a causa della dispersione delle sostanze che vi partecipano con ruoli essenziali. Quanto alla riproduzione e alla crescita, Ageno considera anche queste proprietà implicite nella coerenza in quanto "è da ritenere che la divisione in due della cellula avvenga quando l'aumento delle sue dimensioni incomincia a comprometterne la coerenza dei processi interni" (p. 167). A questo punto la coerenza viene ad assumere il ruolo di termine tuttofare che ricomprende le proprietà non altrimenti precisate, e che sono proprio quelle che è necessario precisare per definire la vita.

Se la coerenza costituisce almeno una idea originale, non si può dire altrettanto del *programma* che, come tutti i termini informatici, è ormai inflazionato. La mia critica controcorrente, perciò, non si rivolge solo ad Ageno, ma a tutti coloro che elevano il programma a termine definitorio. L'obiezione principale è che, a differenza della massa e dell'energia, le quali sussistono senza appoggiarsi all'informazione o a qualcos'altro, ogni programma, come ogni elemento informatico, richiede un supporto materiale, non può sussistere senza una massa o un'energia che lo registrino o lo trasferiscano. Quindi l'informazione ha carattere nettamente diverso dai parametri generali che si dovrebbero prendere in considerazione. Inoltre l'informazione, a meno che non ci si riferisca a quella globale di natura entropica, non discende oggettivamente dai fenomeni, in quanto implica la scelta soggettiva di determinati aspetti della realtà che si decide di trattare con i metodi della teoria dell'informazione. Una mela, per esempio, ci può far pervenire informazioni sensoriali, ci può offrire un'infinità di dettagli analitici, ma tutto ciò rimane una quota modesta del contenuto informativo entropico. Uno studioso dell'aroma di "mela acerba" può determinare la concentrazione dell'aroma nelle varie parti della mela, ma da tale dato non è ricavabile un de-

finito numero di bit, a meno di non fare altre scelte, di non fare altre assunzioni convenzionali o arbitrarie, comunque soggettive. In questo senso, allora, un'informazione può essere estratta da qualsiasi configurazione non casuale della massa e dell'energia.

È scontato che il programma degli organismi viventi viene identificato con il loro DNA. Per quanto ovvia possa essere questa idea, per quanto utile possa essere condurre le analisi relative avvalendosi della teoria dell'informazione, si tratta pur sempre di una scelta. L'informazione racchiusa in questo programma non ha nulla a che vedere con il contenuto informativo entropico del DNA, ma si basa sulla scelta soggettiva di isolare un aspetto di tale contenuto informativo, cioè la sequenza delle basi. Parlare di programma, in definitiva, non costituisce un risultato della ricerca, bensì una premessa, e precisamente un metodo di analisi. Lo stesso contenuto informativo di un enzima non si esaurisce in quello comunicatogli dal DNA. Un polipeptide, cioè una serie di amminoacidi legati fra loro secondo il "programma", non assume affatto il ruolo metabolico che gli compete a meno che non si avvolga nella cosiddetta conformazione nativa, cioè non formi un gomitolo nel quale, da un capo all'altro, tutte le ripiegature si succedano secondo un ordine tridimensionale ben preciso. Questo ordine viene assunto nell'ambiente cellulare nel quale si realizza la sintesi degli enzimi. Numerose ricerche hanno avuto successo nel determinare il corretto ripiegamento di polipeptidi enzimatici, con la completa assunzione della funzione, anche *in vitro*. L'ambiente, in queste ricerche, era costituito da una soluzione acquosa molto più semplice dell'ambiente endocellulare, una soluzione di ioni e altre piccole molecole in concentrazione opportuna. È evidente che una quota dell'informazione per l'assunzione della conformazione nativa proveniva da tale soluzione; una soluzione molto diversa avrebbe condotto ad una conformazione pure molto diversa con la conseguente assenza della capacità catalitica tipica dell'enzima. Dal genoma, insomma, proviene solo una parte dell'informazione richiesta per produrre enzimi funzionanti; una parte altrettanto essenziale proviene dall'ambiente chimico-fisico, al quale nessuno sarebbe disposto a riconoscere la qualifica di "programma".

Non si trovi ingenerosa una critica così serrata se non ci può essere replica dell'autore: la critica è portata alle idee e altri, se le condividono, possono replicare. Del resto il primo a non trovare la cosa disdicevole, salvo fare appello alla sua nota *vis polemica*, sarebbe stato proprio

Ageno del quale va grandemente apprezzata, anche su questo specifico tema, l'anelito alle "teorie di grande unificazione" che, se in fisica costituiscono una tendenza consolidata, non hanno ancora manifestato altrettanta forza attrattiva nei confronti dei biologi.

Com'è nata la vita

in *Biologia evolutivistica*, 1995

Gli anniversari, come quello di Montalenti, portano a riflettere sullo studioso ricordato, sulla sua opera e sui temi di cui si occupava, e in questo possono rivelarsi molto utili non solo al ricordo della persona e alla storia della scienza, ma allo stesso progresso della scienza. Nel 1994 sono caduti due importanti anniversari relativi agli studi sull'origine della vita, entrambi riguardanti A.I. Oparin. Questo biochimico russo, in effetti, nacque nel 1894 e pubblicò trent'anni dopo l'opera che diede l'avvio, per unanime riconoscimento, alla vera e propria ricerca scientifica su tale problema. I numerosi convegni tenuti in onore di Oparin hanno costituito una di quelle rare occasioni nelle quali si può veramente fare il punto su una questione che, come molte altre della scienza contemporanea, è soggetta ad un turbinoso progresso.

Si sono potute così constatare, volendo procedere secondo la successione temporale degli eventi, una notevole convergenza di idee sullo scenario primordiale della Terra, ampie divergenze sugli aggregati che precedettero le cellule e una maggiore precisazione dei problemi relativi alle caratteristiche delle prime cellule. Sono brillate per la loro assenza, invece, posizioni a sostegno di una provenienza della vita già formata dallo spazio e altre posizioni stravaganti che arrivano al grande pubblico più spesso di quelle serie.

Lo scenario primordiale

Tradizionalmente si dipingeva la Terra appena formata (4,5 miliardi di anni fa) come soggetta a un graduale raffreddamento che consentiva il condensarsi al suolo del vapor d'acqua fino a dar luogo a un vero e proprio oceano. Di questa fase si tende oggi a sottolineare la grande instabilità a causa del bombardamento incessante, protrattosi per mezzo miliardo di anni, da parte di corpi esterni. Si è calcolato che il subitaneo innalzamento termico dovuto agli impatti più massicci poté disperdere a più riprese nello spazio circumterrestre sia l'atmosfera sia l'idrosfera. Parecchi studiosi contemporanei vedono il bombardamento primordiale, soprattutto quello da parte delle comete, come una fonte decisiva di composti organici e perfino di acqua. L'acqua, che è un composto tipico degli spazi freddi, per esempio della zona esterna del sistema solare, sarebbe stata portata nelle zone prossime al Sole proprio dai nuclei cometari che sono costituiti in gran parte da ghiaccio.

Il violento scenario descritto è considerato da molti incompatibile con qualsiasi manifestazione vitale, ma non si può escludere che, lungi dal costituire un impedimento all'evoluzione del chimismo organico, esso fosse adatto a produrre macromolecole e aggregati organici proprio a causa delle forti variazioni termiche e delle conseguenti variazioni idriche. L'essiccamento, infatti, poteva costituire un fattore importante nel promuovere le condensazioni di micromolecole, per esempio amminoacidi e ossiacidi, in macromolecole polimeriche. Le macromolecole prodotte, a loro volta, dovevano tendere ad aggregarsi spontaneamente allorché ricompariva l'idrosfera. Nella stessa idrosfera poteva continuare la condensazione delle micromolecole in macromolecole, grazie alla presenza di argille e di altre sostanze opportune, in primo luogo i polifosfati. In effetti le tappe della progressiva complessificazione del chimismo organico primordiale, secondo le vedute più diffuse, sarebbero state le seguenti:

micromolecole → macromolecole → aggregati precellulari → cellule

Secondo lo schema tradizionale, la dotazione di acqua e di carbonio della Terra sarebbe stata sufficiente a giustificare la formazione della biosfera senza apporti esogeni. Le prime simulazioni in laboratorio del chimismo organico primordiale si rifecero proprio a questo schema, e

l'esperimento più citato è tuttora quello di S. Miller del 1953, nel quale erano a contatto un'idrosfera bollente e un'atmosfera nella quale scoccava in continuazione una scintilla a simulazione dei fulmini. Senza nulla togliere ai meriti storici e metodologici di tale esperimento, va riferito che le conclusioni tratte e le condizioni scelte sono state sottoposte a critiche di fondo. In primo luogo si contesta che gli amminoacidi siano l'esito delle reazioni che vi avvengono: i prodotti sono in realtà dei polimeri dell'acido cianidrico che solo a seguito dei metodi di purificazione impiegati danno luogo ad amminoacidi. Insomma, nella soluzione acquosa dell'esperimento, quella che simula l'idrosfera primordiale, non si troverebbero amminoacidi disciolti, salvo la glicina. In secondo luogo si reputa superato il modello di atmosfera adottato, che è caratterizzato dall'idrogeno e dai prodotti di massima idrogenazione di carbonio, azoto e ossigeno. Oggi si ritiene che il componente prevalente fosse, come su Venere e su Marte, l'anidride carbonica. E in un'atmosfera di questo tipo la produzione di amminoacidi è quasi nulla.

Lo scoglio è superabile ripristinando in qualche modo il modello precedente, in particolare ipotizzando un'adeguata concentrazione di idrogeno in certi luoghi e/o in certi momenti. Alcuni reputano che la luce ultravioletta proveniente dal Sole, agendo sulla superficie dell'oceano, portasse alla liberazione di idrogeno contestualmente con l'ossidazione del ferro disciolto. È presumibile però che l'idrogeno fosse rarefatto, presente solo durante il dì e soggetto a salire verso l'alta atmosfera per disperdersi poi nello spazio esterno. Altri reputano che l'idrogeno venisse liberato in abbondanza dai vulcani, i quali offrivano inoltre, con le loro tipiche variazioni termiche, quel regime di essiccamento periodico che poteva favorire la formazione delle macromolecole. Accanto ai vulcani emersi si attribuisce sempre maggiore importanza a quelli sottomarini, che pure si dimostrano adatti a sintesi di micro- e macro-molecole organiche.

In ogni caso, nel processo di complessificazione organica, l'inizio della tappa successiva non determina affatto la cessazione della tappa precedente, cosicché poteva esserci ancora produzione di micromolecole organiche quando già erano comparse le prime cellule. In effetti è probabile che le sintesi organiche siano cessate soltanto allorché l'ossigeno biatomico fece la sua comparsa nell'atmosfera; è noto che la sua presenza inibisce le sintesi nello stesso esperimento di Miller.

Che cosa precedette le cellule?

Le idee sulla natura dei primi aggregati organici e delle macromolecole che li costituivano, sono molto varie, come si è detto, ma ruotano attorno a tre ipotesi principali. I primi modelli di laboratorio furono proposti proprio da Oparin che li chiamò *coacervati*. Si rivelarono molto utili per indagare alcune proprietà degli ipotetici aggregati primordiali, ma venivano prodotti a partire da macromolecole ricavate da organismi attuali, come la gelatina o la gomma arabica, e ciò li fece ritenere inadeguati. In loro vece S. Fox propose le microsfele, cioè sferette della grandezza di un batterio costituite da proteinoidi, che sono polimeri prodotti riscaldando a secco opportune miscele di amminoacidi. Vescichette ugualmente microscopiche e con composizione analoga sono i marigranuli prodotti da ricercatori giapponesi riproducendo condizioni simili a quelle che vigono in corrispondenza dei vulcani sottomarini. Microsfele e marigranuli sono praticamente dei coacervati, costituiti però da macromolecole che tendono a simulare quelle primordiali.

La seconda ipotesi propone i *liposomi*, cui credette anche Mario Agnino, il maggiore studioso italiano dell'origine della vita. Si ritiene, in sintesi, che molecole simili ai lipidi si siano associate dando origine a vescichette delimitate da una membrana per molti versi analoga a quella che delimita le cellule attuali. Queste vescichette potevano prodursi alla superficie dell'idrosfera o in sospensione. Recentemente questa ipotesi è stata rilanciata in una forma originale da O. Wächtershäuser che prevede la loro formazione sulla superficie di cristalli di pirite in corrispondenza dei camini idrotermali sottomarini.

La terza ipotesi è anche quella più di moda e postula un "mondo di RNA" dominato da aggregati di acido ribonucleico (RNA) capaci di autoreplicazione. Gli enzimi che nelle cellule favoriscono le reazioni metaboliche hanno natura proteica, ma si è dimostrato che certi RNA si comportano come enzimi, e sono stati perciò chiamati *ribozimi*. Questo fatto ha portato a immaginare una fase dell'evoluzione della biosfera retta interamente dall'RNA. In questo periodo di entusiasmo per l'ingegneria genetica e gli acidi nucleici è giocoforza che un'ipotesi del genere venga continuamente corroborata da nuove scoperte o, meglio, che le nuove scoperte relative all'RNA vengano viste come prove a sostegno del "mondo di RNA". L'ipotesi conta inoltre sulla celebrità dei

suoi sostenitori, fra i quali gli scopritori della struttura del DNA, cioè J. Watson e F. Crick, e ricercatori famosi come T. Cech e L. Orgel.

Tutte e tre le ipotesi stabiliscono in pratica il punto di partenza, privilegiando rispettivamente le proteine, i lipidi o l'RNA, e ritengono che i composti che completano una cellula siano comparsi successivamente. Nessuna delle tre è esente da critiche di fondo: le prime due perché le giuste miscele di amminoacidi o di lipidi non sono molto plausibili, la terza perché è una grande costruzione barocca poggiante su piloni di argilla. Infatti nessuno sa dire come potessero comparire le unità dell'RNA e come potessero allinearsi con tanta regolarità.

In ogni caso si pensa che la moltiplicazione degli aggregati attraverso un meccanismo riproduttivo abbia segnato la transizione alle protocellule, mentre la comparsa di un meccanismo primitivo di "traduzione" avrebbe segnato la transizione alle cellule. Fu probabilmente la stabilizzazione dell'atmosfera e dell'idrosfera a consentire la trasformazione di alcuni aggregati organici in vere e proprie cellule. Con esse ha inizio l'evoluzione secondo il paradigma neodarwiniano, sostenuto con tanta convinzione da Montalenti, basato su mutazione e ricombinazione, su deriva e selezione, che sembra tuttora in grado di spiegare in modo pienamente soddisfacente le trasformazioni della biosfera.

Caratteristiche delle prime cellule

La documentazione fossile ci attesta l'esistenza di cellule di tipo moderno a partire da 3,8 miliardi di anni fa. Organismi fotosintetici liberarono ossigeno nell'atmosfera e colonizzarono le coste degli oceani per 3 miliardi di anni, fino agli inizi dell'era primaria, intorno a mezzo miliardo di anni fa.

Tuttavia la comparsa delle cellule di tipo moderno pone due problemi piuttosto astrusi ma estremamente dibattuti dagli specialisti: si tratta dell'origine del codice genetico e dell'origine dell'omochiralità. Sul codice, che è alla base del meccanismo della "traduzione", sono fiorite numerose ipotesi; sempre più spesso esse tendono a riconoscere una qualche forma di complementarità fra un certo amminoacido e il gruppo di tre unità di acido nucleico che "sceglie" quel certo amminoacido. Il secondo problema è dovuto al fatto che i viventi sono costituiti in larga misura da molecole asimmetriche. Si tratta della stessa asimmetria che

vige fra le due mani, che sono speculari ma non sovrapponibili; per questo si parla di chiralità (dal greco *cheir*, mano). Gli organismi viventi sono omochirali perché, fra due molecole chirali (come le due mani), ne utilizzano solo una per una determinata funzione, come se le due molecole fossero due composti diversi a tutti gli effetti. Molte ipotesi sono state avanzate per spiegare questa singolare proprietà, che differenzia i viventi da tutti gli altri oggetti molecolari dell'universo. Oggi una parte consistente degli studiosi propende per un collegamento (la cui esposizione sarebbe molto complicata) fra l'asimmetria molecolare dei viventi e l'asimmetria cosmica fra materia e antimateria. Anche se nessun esperimento è ancora riuscito a dimostrare la plausibilità di questo collegamento, esso ci ricorda che l'evoluzione riguarda il cosmo intero: l'evoluzione della vita terrestre non è che una sua singolare digressione.

Riferimenti bibliografici

- AGENO M. (1991), *Dal non vivente al vivente*, Theoria, Roma-Napoli.
- BRACK A., RAULIN F. (1991), *L'évolution chimique et les origines de la vie*, Masson, Parigi.
- CHYBA C., SAGAN C. (1992), *Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules*, «Nature», 355, pp. 125-132.
- DEAMER D.W., FLEISCHAKER G.R. (1994), *Origins of life. The central concepts*, Jones and Bartlett, Boston.
- DE DUVE C. (1991), *Blueprint for a cell*, Patterson/Carolina, Burlington.
- EIGEN M. (1992), *Gradini verso la vita*, Adelphi, Milano.
- FOX S. (1988), *The emergence of life*, Basic Books, New York.
- GESTELAND R.F., ATKINS J.F. (eds) (1993), *The RNA world*, Cold Spring Harbor Lab. Press, Plainview.
- HORGAN G. (1991), *Ipotesi sull'origine della vita*, «Le Scienze», 272, pp. 78-89.
- MOROWITZ H.J. (1992), *Beginnings of cellular life*, Yale U.P., New Haven.
- ORGEL L.E. (1994), *L'origine della vita sulla Terra*, «Le Scienze», 316, pp. 54-62.
- CHELA-FLORES J. *et alii* (eds) (1995), *Chemical evolution*, Deepak, Hampton.

PARTE SECONDA. SCRITTI SCIENTIFICI

RIZZOTTI M. (1991), *Materia e vita*, UTET, Torino.

RIZZOTTI M. (1995), *Vita, origine della*, in *Dizionario dell'ambiente*. UTET, Torino.

RIZZOTTI M. (1995), *Lipid vesicles: are they plausible primordial aggregates?*, J. Biol. Physics.

SCHOPF J.W., KLEIN C. (1992), *The proterozoic biosphere*, Cambridge U.P., Cambridge.

WÄCHTERSCHÄUSER G. (1988), *Before enzymes and templates: theory of surface metabolism*, «Microbiol. Rev.», 52, pp. 452-484.

YANAGAWA H. (1990), *Origin of life on the Earth*, in ASASHIMA M., MALACINSKI G. (eds), *Fundamentals of space biology*, Springer, Berlino, pp. 153-170.

Una definizione di vita¹

in *Defining life*, 1996

Alla ricerca delle giuste proprietà

Il concetto di vita ha subito notevoli cambiamenti nell'evoluzione delle riflessioni filosofiche e scientifiche. Questo libro tuttavia non mira ad una indagine di carattere storico, né si propone principalmente di commentare il lavoro di precedenti pensatori. Inoltre, il libro vuole tralasciare completamente ogni senso metaforico del termine "vita". Esso tratta invece della vita da un punto di vista strettamente scientifico, cioè come un fenomeno cellulare che in opportune condizioni è in grado di perpetuarsi. Partendo da questi presupposti, il lavoro si sviluppa tenendo conto dell'eccezionale progresso dell'approccio molecolare in tutta la biologia moderna.

Attualmente, la mancanza di riflessione teorica consente a chiunque di proporre la propria particolare idea di vita, senza alcuna particolare attenzione alle discussioni precedenti. Un esempio eloquente di questa situazione è dato dai manuali di biologia, dove gli autori presentano concetti diversi di vita, basati soprattutto su pregiudizi personali: segno che non c'è una nozione di vita comunemente accettata.

1. Questo testo è la traduzione in italiano della prefazione a *Defining Life* (Università di Padova, 1996, a cura di Martino Rizzotti, che comprende anche *What is life not?*), eseguita appositamente per questa raccolta dal prof. Alberto Zanardo dell'Università di Padova [n.d.C.].

Se si deve tendere ad un accordo il più generale possibile, si deve indagare su aspetti essenziali della vita, non solo su sue particolari manifestazioni. È frequente parlare di vita come se l'uomo fosse il rappresentante più significativo di questo fenomeno, specialmente da parte di autori con una limitata cultura di base in biologia. Conseguentemente, questi autori tendono a saltare direttamente dai batteri al cervello, cosicché le loro soluzioni risultano influenzate da presupposti antropocentrici o almeno zoocentrici. Possiamo trovare esempi di questo atteggiamento nell'autorevole libro curato da Heidcamp nel 1978 e contenente contributi di Dubos, Fox (che contribuiscono anche a questo volume), Loomer, Marler e Delbrück.

Invece, le attività neuronali o le facoltà cerebrali più avanzate non sono assolutamente caratteristiche essenziali della vita: esse sono solo sue particolari manifestazioni, in quanto compaiono solo in un gruppo di animali "progrediti". È attualmente ben noto che per tre miliardi di anni non vi furono veri e propri animali nella biosfera, sebbene migliaia e migliaia di specie viventi abitassero le acque del nostro pianeta. Questo dovrebbe togliere ogni dubbio circa il fatto che le funzioni cerebrali sono irrilevanti per la definizione di vita; l'unico vincolo è che tale definizione deve essere compatibile con la presenza di attività cerebrali, così come lo deve essere nei confronti delle altre particolari manifestazioni della vita, quali il metabolismo anaerobico, la fotosintesi e così via. Capire la vita significa capire i batteri, i funghi, le amebe, e non il cervello; capire le cellule, e non i complessi circuiti neuronali. Se il nostro scopo è progredire nella comprensione della vita, è molto più importante concentrarsi sui batteri che non sul cervello. In realtà, non possediamo ancora un'idea generalmente condivisa di cosa sia una cellula batterica. Definire i batteri è quasi lo stesso che definire la vita. Perché complicare il nostro scopo quando quello più semplice è già così complicato?

Sono stati fatti alcuni tentativi per superare gli approcci tradizionali eliminando riferimenti empirici agli organismi noti. Ciò significa che gli esseri viventi vengono considerati come un particolare gruppo di oggetti fisici. Ogni cosa nell'universo è un oggetto fisico (indipendentemente da cosa riteniamo essere un oggetto), cosicché questi tentativi consistono nel delimitare questo particolare gruppo sulla base dei più generali parametri fisici, le più generali quantità fisiche, quali la massa, la temperatura, la carica elettrica, e così via. Comprensibilmente, a causa della loro complessità, gli oggetti viventi non possono

essere facilmente caratterizzati da parametri semplici; gli autori generalmente preferiscono caratterizzarli per mezzo di proprietà complesse, la cui relazione con quei parametri non è sempre chiara. Ad ogni modo, una proprietà ci permette comunque di delimitare un sottoinsieme all'interno di un insieme più grande, dove il più grande di tutti, nel nostro caso, è costituito da tutti gli oggetti fisici. La maggioranza degli autori crede che la caratterizzazione degli oggetti viventi possa essere fatta solo identificando molte loro proprietà peculiari: essi costituiscono cioè l'intersezione di molti sottoinsiemi peculiari di oggetti cosmici (fig.1).

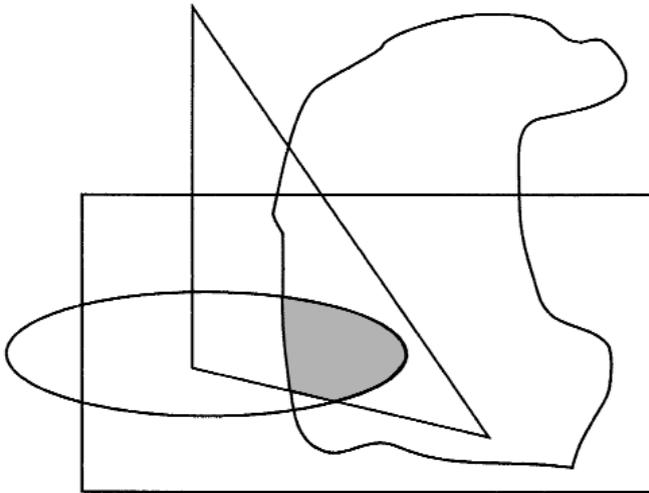


FIGURA 1. L'area grigia della figura piana mostra l'intersezione dei quattro insiemi rappresentati, ciascuno individuato da una proprietà peculiare. L'insieme rettangolare non è essenziale perché anche senza di esso l'intersezione non cambia.

Quante proprietà?

Il passo immediatamente successivo è formale, in quanto riguarda il numero di proprietà (o di insiemi corrispondenti) che sono necessarie per definire la vita (tabella 1). In pochi casi fortunati gli autori le elencano. Per esempio, per citare solo due famosissimi rappresentanti di so-

PARTE SECONDA. SCRITTI SCIENTIFICI

luzioni opposte, Monod (1971) e de Duve (1991), entrambi premi Nobel per la medicina e la fisiologia, enumerano rispettivamente 3 e 7 proprietà (tabella 2)

<i>Numero totale di proprietà</i>	<i>Autori</i>
2	Brack, Hartman
3	Cela-Conde, Colombo, Gánti, Lazcano, Luisi, Nakamura, Varela
4	Gaeta
5	Igamberdiev
6	Fox, Omodeo

TABELLA 1. Un tentativo di identificare ed enumerare le proprietà essenziali della vita secondo gli autori che hanno contribuito a questo libro.

<i>Proprietà</i>	<i>Monod</i>	<i>De Duve</i>
1	teleonomia	assimilazione
2	morfogenesi autonoma	conversione dell'energia in lavoro
3	invarianza riproduttiva	catalisi
4		informazione
5		isolamento controllato
6		autoregolazione
7		moltiplicazione

TABELLA 2. Elenco delle proprietà essenziali della vita secondo Monod (1971) e de Duve (1991). Il secondo autore usa espressioni più articolate (e più precise) di quelle usate in questa tabella; per esempio, invece di usare semplicemente la parola «informazione», scrive: «ogni sistema vivente deve essere in grado di... *informare* i suoi processi biosintetici, e non solo quelli, in modo da garantire che la propria riproduzione avvenga con precisione» (p. 4).

Tuttavia, si pone immediatamente il problema di quanto affidamento possiamo fare su queste enumerazioni. Nell'esempio considerato, possiamo dire che le tre proprietà di Monod sono state selezionate dal-

le sette di de Duve? Ciò non è assolutamente certo. Per esempio, l'invarianza riproduttiva di Monod corrisponde in qualche modo alla combinazione di due delle proprietà di de Duve, cioè l'informazione e la moltiplicazione. In generale, è difficile decidere fino a qual punto proprietà usate da autori diversi si sovrappongano tra loro.

Se le proprietà non sono confrontabili, ogni enumerazione fatta dagli autori non è una guida sicura al loro numero, ed è necessaria un'ulteriore analisi per determinarne il numero corretto. In generale, definizioni più brevi richiedono interpretazioni più lunghe, in quanto proprietà implicite sono talvolta celate dietro le poche parole usate. Oltre a questo, definizioni più brevi possono risultare insufficienti, cioè possono trascurare una o più proprietà essenziali. Inversamente, definizioni lunghe hanno il vantaggio di rendere esplicite più proprietà, ma spesso risultano ridondanti, e ciò significa che almeno una delle proprietà non è necessaria (nello stesso modo in cui l'insieme rettangolare della figura 1 non contribuisce a definire l'area grigia).

Quali sono le proprietà essenziali?

Si dovrebbero ovviamente considerare essenziali o primitive, e quindi citare nelle definizioni solo proprietà necessarie e mutuamente indipendenti. Tuttavia, in un sistema assiomatico la scelta di proprietà primitive non è obbligatoria. Sono possibili in genere molte varianti logicamente equivalenti, ed è una questione di importanza, semplicità, economia, chiarezza, opportunità, tradizione, o perfino simpatia decidere quale particolare sistema scegliere. Ad ogni modo, nel tentativo di identificare le proprietà essenziali, si dovrebbero scegliere proprietà il più "atomiche" possibile, per facilitare il confronto tra vari autori.

Le proprietà sono talvolta ordinate secondo una gerarchia che non è rigorosamente logica. Mentre de Duve, per esempio, non discute esplicitamente l'ordine dei suoi sette "pilastri della vita", Monod lo fa: egli riduce la teleonomia, sebbene la citi per prima, ad una proprietà secondaria derivante dall'invarianza. Questa derivazione non è una semplice deduzione, ma un risultato evolucionistico: la relazione causale può anche tradursi in derivabilità storica.

Questo libro

Una rassegna di punti di vista sul problema centrale della biologia teorica è sufficiente per dimostrare che la riflessione teorica in biologia è relativamente poco avanzata. Sebbene gli autori che hanno contribuito al presente volume siano noti come studiosi di questo argomento, e sebbene la gran parte di loro riconosca come riferimenti obbligatori certi aspetti della letteratura passata, come il lavoro di Schrödinger (1944), essi continuano ad avere opinioni diverse. Continuano ad essere pubblicati molti libri su questo problema (per esempio: Ho, 1992; Margulis e Sagan, 1995), ma una presentazione fedele della situazione può essere solo pluralistica. In questo modo, si evitano prese di posizioni strettamente individuali e l'oscuramento completo di punti di vista alternativi – meglio ancora se vengono coinvolte aree geografiche e tradizioni culturali diverse, in quanto questi fattori influenzano ancora la scienza dei nostri giorni.

Alcuni autori si ispirano fortemente ai pensatori del passato, anche se i loro studi non sono certamente di carattere storico. IGAMBERDIEV si rifà in modo particolare ad Aristotele ed identifica nel codice genetico l'“entelechia come conoscenza”. Ma egli attraversa anche aree diverse della scienza moderna, quali la logica, la fisica quantistica, la termodinamica e le funzioni delle proteine, il tutto in una prospettiva olistica. La prospettiva storica aiuta CELA-CONDE a chiarificare i vari contesti in cui il termine “vita” è stato usato con significati differenti. La sua analisi personale include tre “mondi”: quello fisico, quello biologico e quello cognitivo. OMODEO ricava la sua definizione dall'evoluzione del concetto di sistema vivente nella cultura europea degli ultimi due secoli. La sua definizione risulta molto vicina a quella di de Duve (1991, p.4): “un sistema [in grado di] mantenersi in uno stato lontano dall'equilibrio, di crescere e di moltiplicarsi, con l'aiuto di un continuo flusso di energia e materia fornite dall'ambiente”.

Un altro gruppo di autori è principalmente ispirato dalla sfida di sintetizzare la vita in laboratorio. GÁNTI analizza questo problema in termini di processi, ma il suo progetto di “automa chimico” è anche una “bozza per una cellula”, in accordo col titolo del famoso libro di de Duve. LUISI, LAZCANO e VARELA fanno uso del concetto di autopoiesi per rispondere alla stessa sfida. La loro “vita minima” può essere considerata il nucleo concettuale delle cellule reali così come un lavoro in fa-

se di avanzamento. Questo tipo di lavoro, sebbene basato su un diverso progetto, è considerato da Fox come già progredito e pieno di indicazioni ben sedimentate.

Altri autori basano principalmente la loro analisi su forme ipotetiche di vita primitiva. Il "mondo dell'RNA" è discusso da HARTMAN, che va al di sotto della cella minimale nel ritenere che i virus possano essere ciò che rimane dei più antichi replicatori. BRACK preferisce invece considerare le proteine come le macromolecole primitive, ma anche il suo sistema vivente minimale rimane molto al di sotto del complesso insieme di proprietà delle cellule moderne.

Caso, ordine e complessità costituiscono i principali concetti di riferimento dell'ultimo gruppo di autori. GAETA, nel discutere la comparsa della vita, sposta l'attenzione dai costituenti molecolari ai vari ambienti, i più interessanti dei quali sono quelli dove viene prodotta entropia ad un tasso elevato. Anche NAKAMURA fa uso di concetti termodinamici, ma egli dedica particolare attenzione alla comparsa di ordine e organizzazione. Partendo da basi simili, COLOMBO mette in evidenza l'accoppiamento tra effettori e regolatori come essenza ultima di oggetti dinamici dotati di ordine macromolecolare.

Naturalmente, ogni raggruppamento brevemente motivato deve essere visto solo come una prima guida per il lettore, in quanto esso può trascurare molti aspetti dei lavori. Per esempio, Fox, Gaeta e Nakamura discutono anche l'origine dello stato vivente. Questo è il motivo per cui i contributi sono semplicemente elencati secondo l'ordine alfabetico dei cognomi degli autori.

Oltre che agli stessi autori, che pazientemente aspettarono fino a quando tutti i problemi editoriali furono risolti, il curatore è grato a G. Marin, direttore del Seminario Biologico dell'Università di Padova, per aiuti essenziali e suggerimenti; è anche grato a M.C. Di Maio della Telecom di Venezia per discussioni, e ad un anonimo lettore di una casa editrice internazionale per osservazioni molto utili sull'intero manoscritto. Inoltre, il curatore è grato a C. Friso, F. Gatteri e R. Mazzaro del Dipartimento di Biologia dell'Università di Padova per gentili aiuti di carattere tecnico.

Riferimenti bibliografici

DE DUVE C. (1991), *Blueprint for a cell*, Neil Patterson Publ./Carolina Biol. Supply Co., Burlington.

EIRICH F.R. (1994), *Thoughts on the origin and nature of life and intelligence on Earth*, «J. Biol. Physics», 20, pp. 349-358.

HEIDCAMP W.H. (ed.) (1978), *The nature of life*, University Park Press, Baltimore.

HO M.V. (1993), *The rainbow and the worm*, World Scientific, Singapore.

MARGULIS L., SAGAN D. (1995), *What is life?* Weindenfeld & Nicolson, London.

MONOD J. (1971), *Le hasard et la nécessité*, Ed. du Seuil, Paris, 1970 (*Chance and necessity*, Knopf, New York).

SCHRÖDINGER E. (1944), *What is life?*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Fede e scienza oggi

in *Fede e ricerca di Dio oggi*, 1999

Il sapere scientifico progredisce per proprio conto, purché gli siano dati i mezzi, senza particolari contributi da parte di altri saperi. Certo, l'ispirazione per nuove ipotesi può venire da qualunque parte, ma si tratta del lato ideativo della scienza, lato per il quale non esiste un metodo. In ogni caso le posizioni fideistiche, siano esse già estinte, come quelle greco-romana e azteca, o siano tuttora seguite come quelle ebraico-cristiano-islamica e buddista, non apportano neppure al lato ideativo alcun contributo più rilevante di qualunque altra potenziale fonte di ispirazione, si tratti della contemplazione di un paesaggio o di una chiacchierata con gli amici. Possono essere tenute in un conto particolare, semmai, solo perché verso di esse si avverte maggiormente una esigenza di demarcazione perché continuano a influenzare porzioni consistenti dell'umanità. Si tratta cioè di demarcare con maggiore precisione la differenza che intercorre fra la conoscenza scientifica e le altre pretese forme di conoscenza o gli altri tipi di discorso, per esempio quello metafisico.

Si sente talvolta parlare dell'opportunità di un dialogo fra i sostenitori dei diversi saperi. Queste aperture sono apprezzabili perché contribuiscono comunque al progresso del pensiero e alla crescita personale più delle chiusure. Rimane però il fatto che l'apporto alla conoscenza scientifica da parte degli altri saperi è sostanzialmente irrilevante. Per di più queste aperture si accompagnano spesso a tentativi di ridimensionare la fiducia che generalmente si ripone nella scienza; si dice,

in sostanza, che gli stessi metodologi della scienza, per esempio Popper, riconoscono che le teorie scientifiche non offrono certezze e che sono soggette a continue revisioni e anche ad abbandoni.

Queste affermazioni dimenticano però il senso del relativo, finendo per travisare lo stesso pensiero di Popper. Egli, infatti, stabilendo il suo criterio di demarcazione fra scienza e metafisica, non lasciava dubbi su quale dei due saperi fornisse un modello più affidabile del mondo. Se vogliamo prescindere dalla stretta ricerca del rigore formale e allargare il confronto a tutti i discorsi possibili, giungiamo a conclusioni analoghe, anche se più articolate. Infatti, non c'è dubbio che la conoscenza venga anche dall'empiria, dalle esperienze individuali di qualsiasi genere, ma se si facesse una graduatoria dell'affidabilità delle diverse forme di conoscenza nel fornire un modello del mondo sempre più completo, preciso e condivisibile, non c'è parimenti dubbio che la conoscenza scientifica verrebbe al primo posto, seguita dalla conoscenza empirica, da quella letteraria e così via.

Passando a esaminare l'evoluzione, è noto che la scienza contemporanea (ma anche parte del pensiero antico) la vede dispiegarsi nell'universo intero nel senso che tutto è soggetto a cambiamenti, anche se i tempi e i modi possono essere diversissimi. La stessa evoluzione degli organismi viventi affonda le sue radici nell'evoluzione cosmica. Ne costituisce, è chiaro, un aspetto marginale perché la frazione di massa e di energia che l'universo riserva ai viventi è infinitesima; ma è altrettanto chiaro che si tratta di un aspetto di grandissimo interesse al quale il già citato Popper concesse, dopo anni di polemiche, la patente di scientificità.

Nonostante questo autorevole riconoscimento la biosfera (cioè l'insieme degli organismi viventi) è tuttora considerata da alcuni in una situazione problematica perché conosciamo solo quella che dimora sul nostro pianeta. Questo fatto, però, non dovrebbe sconvolgere nessuno perché la scienza ha spesso a che fare con fenomeni unici; anzi, ogni distribuzione momentanea della massa e dell'energia che si realizza nel corso dell'evoluzione dell'universo è irripetibile, a rigore. In effetti sono unici tutti i singoli corpi celesti, sono uniche le singole formazioni rocciose sui corpi freddi (pianeti, comete, ecc.), e la stessa biosfera può essere considerata una formazione rocciosa molto speciale. Si tratta però di capire se questa solitudine della biosfera dipenda o no da qualche singolarità "ambientale". In realtà la nostra galassia non ha nulla di veramente speciale rispetto ai dieci miliardi di galassie che popolano l'u-

niverso, così come il Sole non ha nulla di speciale rispetto ai miliardi di stelle che popolano ogni galassia.

Forse però è speciale la Terra. Questa eventualità non deriva dal fatto che i pianeti scoperti negli ultimi anni intorno ad altre stelle sono molto diversi da essa. Tale risultato è dovuto semplicemente ai limiti dei mezzi di indagine attuali: tutti gli specialisti sono convinti che il loro perfezionamento porterà alla scoperta di moltissimi pianeti simili alla Terra, a Venere e a Marte. Ma, per l'appunto, fra questi tre pianeti molto simili solo il nostro ospita una biosfera. Forse ne ospitò una anche Marte, ma essa scomparve quando scomparvero i mari. L'eventuale specialità della Terra non dipende, dunque, dalla sua costituzione interna, ma dal suo velo di acqua liquida in superficie. Non è detto, insomma, che un pianeta abbia una probabilità elevata di ospitare stabilmente acqua liquida in superficie per quattro miliardi di anni. Alcuni stimano che in una galassia possano esistere milioni di questi pianeti, mentre per altri la loro probabilità è talmente evanescente che la Terra potrebbe essere addirittura unica nell'intero universo.

La discordanza sulle stime non si può risolvere con la pomposa retorica dei "principi". In effetti la scienza non è immune né dalle mode né dalla retorica in senso lato. Nella fattispecie il principio richiamato è quello di mediocrità, secondo il quale si deve assumere che la situazione in un certo punto sia normale finché non sia dimostrata la sua atipicità. Così si deve ritenere che la Terra sia un pianeta comune finché non sia dimostrato il contrario. Come si è detto, i mezzi disponibili non consentono ancora di provare alcunché, e il principio richiamato non si può applicare con fondatezza ai casi dei quali sono noti pochissimi esempi. Per il momento rimane legittimo un nuovo geocentrismo, quello che assegna alla Terra una posizione privilegiata non più nella meccanica celeste, ma nelle condizioni che hanno permesso al chimismo organico, di cui i viventi sono un particolare sviluppo, di procedere tanto.

Il sospetto dell'unicità della Terra trascina con sé quello dell'unicità della biosfera. Anche se l'evoluzione del chimismo organico avesse portato altrove alla comparsa di cellule, per esempio di tipo batterico come si ipotizza per Marte, forse solo qui l'acqua liquida superficiale durò tanto a lungo da consentire la comparsa di organismi ben più grandi e complessi dei batteri. Comunque non c'è dubbio che la ricostruzione disponibile ai nostri giorni offre ormai un quadro coerente dell'evoluzione della biosfera terrestre nelle sue grandi linee. Anche i fattori in-

dividuati da Darwin e dai suoi epigoni per fornire una spiegazione plausibile dell'evoluzione degli organismi si dimostrano sostanzialmente soddisfacenti, tali comunque da non richiedere in alcun modo fattori aggiuntivi di carattere immateriale. Che rimanga ancora molto da chiarire non costituisce un punto di debolezza; qualche cosa da chiarire rimarrà sempre perché il mondo è complicato. Però non si avverte più l'esigenza di fornire "prove" della realtà dell'evoluzione, non più che di fornire prove dell'esistenza degli atomi o delle galassie. Direi che dell'evoluzione ci si è ridotti ad avversare ormai due soli punti: l'origine della biosfera e l'origine dell'uomo.

Sull'origine della biosfera viene esercitata dai cosiddetti creazionisti¹ una pura azione di disturbo, una polemica puramente corrosiva e disfattista che si limita a sollevare difficoltà, già ben note agli studiosi dell'argomento, senza sbilanciarsi nel fornire ipotesi alternative verificabili. Non si può considerare un'ipotesi verificabile, ovviamente, la proposta di una creazione della prima cellula da parte di qualche entità soprannaturale: con la bacchetta magica si risolve ogni problema senza risolverne effettivamente nessuno.

Per quanto riguarda la nostra specie, molti già stentano ad accettare la sua collocazione sistematica. Da due secoli dà fastidio ad alcuni che essa venga collocata fra i Mammiferi, i quali comprendono i Primati, i quali comprendono le Scimmie, le quali comprendono le Catarrine (cioè le scimmie africane), le quali comprendono gli Scimmioni², i quali comprendono una decina di specie fra le quali il sedicente *Homo sapiens*. Ma ci si rende poi conto che è spesso preferibile ricorrere alle Scimmie per mettere a punto nuove vaccinazioni o nuovi trapianti di organi, e si trangugia questa affinità zoologica per spirito di conservazione rifiutandone eventualmente la spiegazione più ovvia e ormai inoppugnabile: l'affinità è indice di ascendenza comune, ormai provata anche in questo caso al di là di ogni dubbio.

Significa forse che anche l'uomo debba ricadere sotto il principio di mediocrità? In effetti, oltre alla Terra, sembra piuttosto speciale anche

1. Vedi il libro *Come ha avuto origine la vita?*, Tipografia Watch Tower, 1985.

2. Nella lingua inglese vengono chiamate *apes* e corrispondono al termine sistematico più consueto che è Antropoidi; invece le altre scimmie, che hanno taglia inferiore, vengono chiamate *monkeys*.

l'uomo soprattutto perché, su un piano di pura obiettività, è l'unica specie che abbia raggiunto una civiltà tecnologica partendo dal livello culturale proprio degli altri scimmioni odierni. Anche altre specie mostrano capacità di apprendimento e talvolta una cultura segnaletica e/o costruttiva, ma quella umana sovrasta tutte le altre da molte migliaia di anni. Il distacco divenne incolmabile forse già intorno ai tre milioni di anni fa; tre milioni di anni prima la popolazione che diede origine alla nostra specie si separò riproduttivamente e quindi evolutivamente da quella che diede origine alle due specie di scimpanzé attualmente presenti, che si separarono fra loro solo un milione di anni fa. Si può aggiungere che, finché rimarrà l'uomo, esso non permetterà a nessuna specie terrestre di sviluppare una propria cultura tecnologica.

Il riconoscere una forte differenziazione dell'uomo negli ultimi millenni non ha nulla a che vedere, però, con il riconoscergli entità immateriali delle quali avrebbe l'esclusiva (anima, spirito), posizione che la maggior parte delle religioni adotta. Su questo punto non sono pochi gli scienziati atei o agnostici che fanno una concessione a mio avviso ingiustificata. Essi sostengono cioè, in accordo con la religione più influente del mondo contemporaneo³, che la scienza non è competente a intervenire su questa questione. Ma il problema è se queste supposte entità immateriali abbiano qualche cosa a che vedere con fenomeni materiali, in particolare con i comportamenti umani. Se non c'è interazione con la materia, allora l'esistenza di tali entità è un'assunzione puramente arbitraria, e naturalmente chiunque è libero di assumere l'esistenza di quello che gli pare, ma siamo al livello di affidabilità più basso della gerarchia della quale si parlava all'inizio. Se invece si pretende che queste entità interagiscano con la materia (per esempio nei cosiddetti miracoli) o con le azioni degli uomini (cioè attraverso i nervi e i muscoli), allora non si

3. «Les sciences de l'observation décrivent et mesurent avec toujours plus de précision les multiples manifestations de la vie et les inscrivent sur la ligne du temps. Le moment du passage au spirituel n'est pas objet d'une observation de ce type, qui peut néanmoins déceler, au niveau expérimental, une série de signes très précieux de la spécificité de l'être humain». Passo tratto dall'indirizzo di saluto di K. Wojtyła alla seduta sull'origine e l'evoluzione della vita della Pontificia Accademia delle Scienze del 22 ottobre 1996; vedi *Commentarii* (ex Aedibus Academicis in Civitate Vaticana) IV (3), 1997, p. 19.

vede perché la cosa non dovrebbe essere di competenza della scienza. Non si parla ovviamente di una competenza burocratica, ma di una effettiva possibilità di affrontare con metodi rigorosi l'ipotesi dell'esistenza di queste entità.

In definitiva non ci sono campi preclusi all'indagine scientifica; le sono preclusi solo quelli creati dalla fantasia, ma anche l'esercizio della fantasia, come l'attività onirica, rientra nella fenomenologia che prima o poi potrà essere esplorata scientificamente, sempreché se ne veda l'interesse e la cosa non contrasti, come in altri campi, con un bene che la società definisca superiore. Per esempio se questa esplorazione dovesse prevedere interventi sul cervello è ovvio che la società avrebbe tutto il diritto di opporsi. Solo la società, dunque, può dire che cosa è precluso all'indagine scientifica, ma si tratta di una decisione, non di una esclusione di principio.

La diffusione della vita nell'Universo

in «L'Astronomia», n. 201 (1999)

IL FENOMENO VITA è unico, raro o frequente nell'Universo? Le risposte sono le più varie; basti pensare a quelle fornite da due biologi insigniti del Premio Nobel, Monod e de Duve: per il primo il sorgere della vita è un evento straordinario e irripetibile, per il secondo, un imperativo cosmico. Tentare una risposta ponderata significa cercare di capire quanto siano diffuse le condizioni necessarie alla sua comparsa, senza dimenticare che nelle discussioni su tale questione vengono spesso trascurate le condizioni che della vita possono favorire il proseguimento o la fine, e che sono altrettanto importanti per stimare la sua frequenza cosmica.

A tutta la discussione si dovrebbe premettere una definizione di vita, ma la cosa richiederebbe una trattazione lunga e complicata; perciò conviene limitarsi a precisare semplicemente che per vita si intende quel complesso di fenomeni che presuppone un'organizzazione cellulare: empiricamente la vita può essere assimilata a tutti gli effetti alle cellule.

Tuttavia è lecito chiedersi se l'organizzazione cellulare, propria della vita terrestre che conosciamo, sia davvero imprescindibile. Qualche cosa di più semplice si dà per scontato agli inizi, ma il passaggio alla vita vera e propria, e quindi a una continuità della propagazione per via riproduttiva, non si ritiene possa prescindere dalle cellule.

Le cellule godono della strana proprietà di mantenersi stabilmente instabili, per esprimersi con un paradosso. In effetti, sono congegnate in modo tale da mantenersi lontane dallo stato di equilibrio, che coin-

cide con la situazione di minima energia e quindi con l'arresto di ogni dinamica globale. Questa peculiarità è dovuta alla velocità delle loro reazioni. In effetti i meccanismi che le caratterizzano hanno qualche probabilità di perpetuarsi solo se procedono a velocità elevata, cioè nettamente superiore a quella dei processi degradativi che portano verso l'equilibrio. In natura, questo risultato può essere conseguito solo attraverso l'allestimento di complicatissime architetture molecolari.

LA VITA RICHIEDE MOLECOLE COMPLESSE. Cerchiamo di chiarire questo concetto con un esempio. L'acido aspartico è un amminoacido molto comune nelle proteine di tutti gli organismi. Come tutti gli altri amminoacidi delle proteine, salvo la glicina, esso ha configurazione L. In realtà può esistere in due configurazioni opposte, L e D, speculari ma non sovrapponibili, come le due mani di una persona. Però solo la configurazione L viene utilizzata per la sintesi delle proteine. Questo è uno dei tanti aspetti di lontananza dall'equilibrio: l'energia minima si avrebbe infatti nella miscela racemica, cioè quella costituita da un ugual numero di molecole L e D. L'acido L-aspartico tende effettivamente a trasformarsi in una miscela racemica, ma la reazione è molto lenta, tanto che nelle proteine conservate in certi fossili si trova ancora una certa quota di acido aspartico nella configurazione D. Lo stesso avviene nelle proteine permanenti di organismi a vita lunga. Per esempio le cristalline, cioè le proteine che costituiscono la lente degli occhi dei mammiferi, sono sintetizzate nel corso dello sviluppo fetale e conservate per tutta la vita; ebbene, dopo qualche anno cominciano a essere rilevabili in esse tracce di acido D-aspartico prodotti per racemizzazione. Soltanto un ricambio molto più rapido rispetto alle reazioni spontanee che porterebbero verso l'equilibrio consente alle proteine di rimanere sostanzialmente prive di acido D-aspartico. Altre considerazioni ci spiegano perché si utilizza una soltanto delle due configurazioni opposte: per esempio, perché sarebbe assolutamente antieconomica la presenza di un doppione per tutte le reazioni implicate nella sintesi delle proteine.

Il punto critico è dunque la velocità di formazione. Non ci deve fuorviare l'esistenza di stadi quiescenti in spore, cisti e semi: in questi stadi la velocità metabolica si riduce a zero, ma crolla contemporaneamente la velocità di degradazione verso l'equilibrio. Quando una cellula è attiva, la velocità delle sue reazioni chimiche viene mantenuta elevata grazie a catalizzatori specifici, cioè a sostanze che aumentano la velocità di certe

reazioni ben precise. Per esempio, ce ne deve essere uno che seleziona il solo acido L-aspartico per il suo inserimento nelle proteine, escludendo completamente l'acido D-aspartico. Questo catalizzatore è un enzima, uno delle centinaia o più spesso delle migliaia che agiscono in ciascuna cellula. Ogni enzima, per essere così specifico, presenta una parte, chiamata *sito attivo*, che interagisce direttamente con la molecola da scegliere, nel nostro caso l'acido L-aspartico. Nel sito attivo ogni singolo atomo di un ben preciso elemento è a una distanza determinata da ciascuno di quelli circostanti e ha un suo particolare orientamento. Per ottenere tutto ciò, l'unica via è quella di costruire una complicata impalcatura molecolare *ad hoc*, cioè l'enzima nella sua interezza.

Se volessimo costruire qualche cosa del genere (cioè un sito nel quale si affacciano determinati pezzi con una precisa geometria) con il gioco del Meccano, dovremmo legare tutti i pezzi coinvolti nel sito stesso mediante una moltitudine di pezzi esterni che garantiscano il risultato desiderato. Come nel Meccano, le cellule partono da poche unità costruttive. In pratica, tutti gli enzimi sono ottenuti a partire da 20 amminoacidi e talvolta da qualche altro componente. Un tipico enzima è costituito da una catena di 3-400 amminoacidi scelti fra quei 20 e legati in modo tale da garantire che alcuni di essi, anche molto lontani fra loro lungo la catena, presentino l'atomo dell'elemento giusto alla distanza e con l'orientamento adatti a costruire un sito in grado di riconoscere per esempio il solo acido L-aspartico.

Se gli amminoacidi di partenza fossero 200 anziché 20, si potrebbero costruire enzimi con meno amminoacidi dello stesso tipo perché le unità costruttive sarebbero più varie, ma la cellula nel suo complesso dovrebbe fare un lavoro molto maggiore per sintetizzare tutti i 200 tipi. Il numero 20 costituisce una sorta di ottimizzazione del problema. La conclusione, comunque, è che gli enzimi sono necessariamente architetture molecolari complesse.

L'UNICITÀ DEL CARBONIO. Sorge allora il problema di capire quali elementi chimici possano soddisfare questa esigenza di complessità molecolare. Da tempo si sono considerate le varie possibilità e si è pervenuti alla conclusione unanime che l'elemento con più frecce al suo arco è il carbonio.

Questa proprietà non è né misteriosa né così speciale. Tutti gli elementi, e più marcatamente i più leggeri (diciamo la prima ventina),

hanno varie proprietà che li distinguono nettamente dagli altri, e in qualcuna di queste primeggiano rispetto a tutti gli altri. Per esempio, il fluoro, seguito dall'ossigeno, ha il primato dell'elettronegatività. Il carbonio non spicca per molte proprietà; ne presenta però alcune che ne fanno l'elemento privilegiato per la formazione di una grande varietà di molecole con caratteristiche geometriche definite. La ragione essenziale è che i suoi legami con gli elementi reattivi più comuni nell'Universo (idrogeno, ossigeno, lo stesso carbonio, azoto) oscillano attorno a valori di energia molto simili. Questo implica che un atomo di carbonio può legarsi indifferentemente a un atomo di idrogeno, ossigeno, azoto o a un altro di carbonio. Anche altri elementi sono in grado di legarsi a più elementi con lo stesso tipo di legame chimico del carbonio, ma non con altrettanta equanimità. Per esempio, il silicio si lega quasi esclusivamente con l'ossigeno, perché con esso stabilisce legami più energetici che con gli altri elementi. A questa particolarità energetica dei legami del carbonio si deve aggiungere almeno il fatto che un suo atomo si lega facilmente a ben altri quattro atomi che possono anche essere tutti diversi, e pure questo è un fattore che contribuisce alla complessità molecolare.

Se l'elevata complessità molecolare è dovuta essenzialmente al carbonio, ne consegue una delimitazione di tale complessità nel tempo e nello spazio. Infatti, il carbonio mancava nell'Universo primitivo: la sua formazione iniziale ebbe luogo all'interno delle prime stelle massicce, ed esso incominciò a contaminare lo spazio solo dopo le prime esplosioni stellari. In effetti, fu uno dei primi elementi reattivi, dopo l'idrogeno, a comparire in abbondanza, subito accompagnato, guarda caso, da ossigeno e azoto. L'elio è molto più abbondante del carbonio e secondo solo all'idrogeno, però non è reattivo, cioè non tende a formare legami chimici.

Comunque anche la quantità è importante, oltre alle proprietà adatte, perché influisce sulla probabilità di incontri fra gli atomi. In un primo momento la concentrazione degli elementi reattivi diversi dall'idrogeno era talmente bassa da non dare luogo a un loro chimismo apprezzabile.

Quando l'Universo ne fu sufficientemente arricchito si infittirono gli incontri e quindi le reazioni e le sintesi molecolari.

Dunque l'evoluzione del chimismo organico non è affatto un'esclusiva della Terra, ma ha riguardato, riguarda e riguarderà ancora a lungo

l'intero cosmo. Fra i distretti interessati da questo fenomeno annoveriamo innanzitutto le immense nubi interstellari dove la suddetta evoluzione prese avvio. Si ritiene inoltre di poter generalizzare l'esistenza di qualche forma di chimismo organico nei corpi che orbitano attorno alle stelle. Le forme più diffuse dovrebbero avere luogo nelle atmosfere dei pianeti giganti (purché non siano troppo caldi, come lo sono molti di quelli extrasolari scoperti a partire dal 1995) e sui corpi minori fatti in gran parte di "ghiacci" (comprese le lontane comete) che si trovano a notevole distanza dalla stella. Un chimismo organico molto più limitato si ritiene sia presente su pianeti e satelliti a superficie rocciosa, giù giù, fino agli asteroidi, ai meteoriti, ai granuli microscopici di varia natura, sempre che non siano troppo caldi.

Insomma, oltre alle nubi interstellari, quasi tutti i corpi che circondano una stella formatasi da una nube già ben contaminata da elementi leggeri sono in qualche misura interessati da chimismi organici. Ma è lecito ipotizzare che anche altri corpi siano altrettanto contaminati da composti organici: per esempio le nane brune, assimilabili per molti aspetti a pianeti giganti. In sintesi, l'evoluzione del chimismo organico ha a sua disposizione tutto lo spazio freddo (e tiepido), cioè quasi tutto lo spazio, ma pochissima massa, perché questa è concentrata nelle stelle; a meno di non considerare anche la cosiddetta materia oscura, nella quale c'è posto anche per una moltitudine di corpi freddi e tiepidi, ma della quale, per ora, non possiamo dire nulla di preciso se non che esiste.

LE RICHIESTE ENERGETICHE. Ritornando alla scala terrestre, un pianeta come il nostro poteva essere sede di un qualche chimismo organico solo in prossimità della superficie. Tale fenomenologia è delimitata anche temporalmente, oltre che spazialmente, in quanto si presume che le molecole organiche siano state stabili solo dopo il raffreddamento della crosta, intorno a 4,0 miliardi di anni fa. Inoltre, a un certo momento il loro afflusso si sarebbe quasi del tutto arrestato. Questo ritengono coloro che attribuiscono l'afflusso agli impatti cometari, la cui frequenza sarebbe caduta quasi a zero a partire da 3,9 miliardi di anni fa. Tuttavia, anche chi ritiene che la formazione di molecole organiche sia dipesa da sintesi atmosferiche ipotizza un decremento nel tempo, a causa della rapida scomparsa dell'idrogeno e di altri gas utili a questo esito come il metano e l'ammoniaca.

In ogni caso, la comparsa nell'atmosfera dell'ossigeno dovuto alla fotosintesi ossigenica (effettuata da alghe microscopiche) chiude definitivamente il capitolo delle sintesi atmosferiche, perché l'ossigeno reagisce con le molecole alla base di quelle sintesi prima che queste diano luogo a veri composti organici. Anche le eventuali sintesi organiche nelle profondità oceaniche sarebbero state frustrate dall'ossigeno disciolto nell'acqua.

Comunque, per far scaturire dagli elementi citati un'effettiva fenomenologia chimica occorre, oltre a una loro concentrazione sufficiente, una fonte di energia "quanticamente" adeguata. Questo significa che non è solo l'ammontare totale dell'energia che conta, ma anche il fatto che essa sia sufficientemente concentrata da determinare con una certa frequenza la rottura dei legami chimici. Per esempio, le maree dei nostri oceani mobilitano immense quantità di energia che possono anche essere sfruttate per la produzione di elettricità, ma non sono in grado di rompere uno solo dei legami chimici che abbiamo citato. Una fonte di energia quanticamente adeguata è costituita invece dall'alta temperatura, anche solo sotto forma di elevate velocità dei singoli atomi o di altre particelle dotate di massa nelle rarefatte nubi interstellari. Fonti adeguate sono anche i quanti elettromagnetici ad alta energia come le radiazioni ultraviolette emesse da molte stelle, nonché le particelle e le radiazioni ad alta energia prodotte nel corso dei decadimenti radioattivi. D'altra parte, l'energia non deve essere eccessiva, altrimenti spezza subito le molecole delle quali ha promosso la sintesi, e se i composti organici hanno una vita media troppo breve viene compromesso l'accumulo in grandi quantità, almeno localmente, di qualsiasi composto, cosa ritenuta invece importante per avviare la vita.

E POI L'ACQUA. Il chimismo organico, presupposto imprescindibile per la comparsa della vita, è diffusissimo nell'Universo, come si è visto. Estremamente più restrittiva è invece la condizione che viene ritenuta necessaria per consentire al chimismo organico di fare il salto verso la formazione di una cellula. Questa condizione è costituita dalla presenza di acqua liquida.

L'acqua (H_2O), di per sé, non è affatto una molecola rara. Anzi, essendo composta dai due elementi reattivi più abbondanti del cosmo, è forse la molecola neutra più diffusa dopo l'idrogeno molecolare (H_2), senonché è presente quasi esclusivamente allo stato solido e allo stato gassoso. Rara è proprio la sua presenza allo stato liquido.

La situazione astronomica che consente tale presenza delimita la cosiddetta *zona abitabile* attorno alle stelle, che però in genere viene individuata solo in base alla temperatura. In effetti sono cruciali anche altri fattori, come la presenza di un'atmosfera con pressione e composizione adeguate sulla superficie dei pianeti che si trovano in prossimità di tale zona. La zona abitabile, insomma, è compatibile a grandi linee con la presenza di acqua liquida, ma non la impone. Basti pensare che nel Sistema Solare è solo il nostro pianeta a presentare acqua liquida in superficie; su Marte c'era in un lontano passato, ma oggi non potrebbe esistere che nel sottosuolo; a una certa quota c'è nelle atmosfere di Giove e forse degli altri pianeti giganti, e in profondità forse su Europa o su altri satelliti di Giove. In ogni caso, la necessità di acqua liquida riduce enormemente lo spazio a disposizione di quel particolare sottoinsieme del chimismo organico che è costituito dagli organismi viventi.

Come il carbonio fra gli elementi non è speciale in tutto, così non lo è l'acqua fra le molecole: per esempio, ha una architettura banale. Tuttavia, proprio per ragioni legate alla sua architettura, ha la capacità di formare un numero elevato dei cosiddetti legami-idrogeno, per cui dà luogo a un effetto davvero speciale, cioè al cosiddetto *effetto idrofobo*, che consiste nel promuovere l'aggregazione in uno stato semiliquido di certi gruppi chimici organici.

Tipicamente, l'acqua liquida favorisce l'aggregazione in strutture globulari microscopiche (micelle) o estese (membrane) delle sostanze "grasse" e di molte grandi molecole. Anche un enzima, che è una grande molecola, si presenta sotto forma di una sorta di micella costituita da una singola molecola filamentosa avvolta su se stessa con le parti "grasse" all'interno.

L'effetto idrofobo non si verifica in altri liquidi. Per esempio l'ammoniaca, che forse si avvicina all'acqua più di ogni altra molecola, non dà luogo all'effetto idrofobo: in effetti, essa scioglie i grassi, invece di favorirne l'aggregazione in micelle o in membrane.

Anche se l'effetto idrofobo è la proprietà fondamentale che rende l'acqua liquida necessaria alla vita, non è l'unica da considerare. Dell'acqua liquida è importante anche la capacità di mantenere molte molecole in soluzione, e quindi libere di collidere e di reagire. La capacità di mantenerle in soluzione ad alta concentrazione fa ovviamente aumentare la probabilità che esse collidano.

Si tenga inoltre presente che, a pressioni intorno a qualche atmosfera, l'acqua si trova allo stato liquido in un intervallo di temperature che

consente svariate reazioni chimiche senza compromettere troppo la stabilità dei legami fra gli atomi delle molecole organiche. Alle stesse pressioni, l'ammoniaca è liquida in un intervallo di temperature più basso di qualche decina di gradi centigradi, il che riduce di molto la velocità delle reazioni.

Un'altra proprietà importante è forse costituita dalla trasparenza alla luce visibile alla radiazione e ultravioletta. La limitata trasparenza all'ultravioletto può avere favorito in origine un chimismo organico in prossimità della superficie dei corpi idrici, perché secondo alcuni la luce ultravioletta sarebbe la fonte di energia più importante per il primo chimismo organico. Per gli eventuali corpi idrici profondi, e quindi non investiti dalla radiazione della stella, come quelli possibili di Marte e di Europa, è più problematico sia un rifornimento di materiale organico, sia un rifornimento di energia quanticamente adeguata. Ci sarebbe la radioattività, che però è meno intensa e decresce con il tempo.

In ogni caso la trasparenza, come altre proprietà che sono state spesso richiamate, potrebbe essere essenziale. Addirittura, potrebbe essere essenziale che l'acqua liquida superficiale lascia emergere, almeno transitoriamente, superfici solide, cioè isole. Di fatto queste condizioni ulteriori variano a seconda dell'ipotesi che viene preferita per l'origine della prima cellula.

Comunque, senza un'analisi delle condizioni necessarie alla vita non è possibile stimarne la diffusione nell'Universo. Ora dovrebbe essere chiaro che ciò significa in prima approssimazione stimare la probabilità di coesistenza di un chimismo organico e di acqua liquida. Purtroppo la nostra persistente ignoranza sulla diffusione dell'acqua liquida impedisce una risposta fondata alla domanda posta nel titolo. Molti studiosi hanno cercato di fornire alcune stime, che però risultano quasi altrettanto disparate di quelle dei due premi Nobel citati all'inizio. La presenza di acqua liquida, soprattutto se questa deve essere presente sulla superficie del pianeta, magari lasciando emergere delle isole, è comunque la più restrittiva delle due condizioni ritenute necessarie per la comparsa e il mantenimento della vita. La ricerca futura sulla frequenza della vita sarà quindi eminentemente rivolta a determinare la frequenza dell'acqua liquida.

Se poi dalle condizioni necessarie passiamo alle condizioni sufficienti, l'accordo fra gli studiosi è ancora più lontano. Si può comunque far notare che l'inizio dell'evoluzione cellulare su un pianeta non ne as-

sicura il proseguimento indefinito nel tempo. Possiamo solo constatare *a posteriori* che la biosfera terrestre è persistita fino a oggi in alcune sue componenti (mentre altre si sono estinte) adattandosi a variazioni ambientali non troppo profonde e non troppo rapide, ma sappiamo anche che non esiste alcuna possibilità di adattamento a fattori che rompano i legami fra atomi di carbonio o che determinino la scomparsa dell'acqua liquida, ragione per cui la vita su un pianeta rimane sempre esposta al rischio di una estinzione completa.

La fine può essere decretata da fatti catastrofici di carattere astronomico o geologico, oppure da cambiamenti insorti all'interno della biosfera stessa. Fra gli eventi esogeni catastrofici si possono annoverare emissioni eccessive di radiazioni e di particelle da parte di una stella vicina, per esempio in seguito alla sua esplosione. Ma non si possono escludere catastrofi a cadenza regolare. Per esempio il rigonfiamento centrale della nostra Galassia è probabilmente interessato da un'attività periodica di emissioni ad alta energia incompatibili con la vita sugli eventuali pianeti orbitanti attorno alle sue stelle, che sono le più antiche, e lo stesso può valere per molte altre galassie. Questa fenomenologia galattica va probabilmente diminuendo con il tempo, per cui il Sistema Solare, formatosi tardivamente e in un braccio lontano dal rigonfiamento centrale, potrebbe avere maggiori opportunità di essere risparmiato da esperienze del genere.

Su scala molto minore si assume ormai che in un sistema planetario, dopo le convulse vicende della sua formazione, prosegue per un po' una grandinata di comete e una sassaiola di meteoriti verso la stella centrale, e inevitabilmente qualcuno di questi corpi colpisce di tanto in tanto i pianeti e i satelliti. Probabilmente i pianeti giganti intercettano gran parte delle comete provenienti dalle regioni più lontane del sistema, proteggendo in qualche misura i pianeti più vicini alla stella. Si è comunque stimato che i maggiori impatti subiti dalla Terra primitiva abbiano comportato la completa evaporazione degli oceani e addirittura la fusione della crosta, provocando così la cancellazione di qualsiasi traccia di eventuali viventi preesistenti.

Impatti di questo genere (chiamati "sterilizzanti") si sono ripetuti nell'intervallo fra la formazione della Terra, 4,6 miliardi di anni fa, e la solidificazione delle sue rocce più antiche, 3,9 miliardi di anni fa. Alcuni indizi fanno presumere che la vita fosse già presente 3,8 miliardi di anni fa. Ebbene, se uno di quegli impatti si fosse verificato dopo la

comparsa della vita, essa sarebbe sparita ben prima dell'avvento dell'uomo, con buona pace del principio antropico.

In definitiva, la Terra (con la sua variegata biosfera) potrebbe essere un caso unico o molto raro non solo per le difficoltà di comparsa della vita, ma anche per il fatto di essere stata fortunatamente risparmiata da impatti sterilizzanti per quasi quattro miliardi di anni.

Se con il trascorrere dei miliardi di anni gli impatti massicci vanno scemando, in compenso si avvicinano i sussulti finali propri di ogni sistema planetario. Nel nostro sistema, che è ritenuto di tipo comune, il Sole si trasformerà in una gigante rossa fra 6,5 miliardi di anni, ma già fra 3,5 miliardi di anni l'aumento dell'energia da esso sprigionata avrà determinato la completa evaporazione degli oceani terrestri. Anche ammesso che non succeda nulla di tragico prima, questo fatto decreterà comunque la fine della biosfera.

CATASTROFI ENDOGENE. Altre catastrofi possono avere origine endogena. Per esempio, si crede che Venere sia soggetto, sembra ogni qualche centinaio di milioni di anni, a episodi parossistici di attività tettoniche e vulcaniche che ne rimodellano radicalmente la superficie e che cancellerebbero qualsiasi traccia di vita o di altri tipi, meno nobili, di chimismo organico.

Con il raffreddamento di un pianeta vanno invece riducendosi sia l'attività tettonica sia il vulcanismo. Per esempio, Marte è ritenuto ormai troppo freddo per queste attività, che sono peraltro considerate essenziali per restituire continuamente all'atmosfera l'anidride carbonica. Non è chiaro se una biosfera potrebbe autosostenersi in un pianeta geologicamente bloccato. Infatti il raffreddamento potrebbe comportare la scomparsa o quasi dell'anidride carbonica atmosferica, che fornisce la materia prima per la moderna organizzazione del carbonio, a causa del suo seppellimento irreversibile.

Sulla Terra, prima degli inizi della vita, l'anidride carbonica si era rapidamente accumulata nell'atmosfera durante la fusione generalizzata delle rocce, e si stima che a livello del mare arrivasse una pressione di 10 atm (oggi è di 0,0003 atm). Processi inorganici e organici l'hanno gradualmente sottratta all'atmosfera depositandola nei sedimenti, dai quali essa viene in parte restituita all'atmosfera grazie al loro riciclaggio dovuto a vulcanismo e tettonica. Se questi fenomeni rallentassero, si ridurrebbe anche il riversamento dell'anidride carbonica nell'atmosfera.

Il comparto più delicato di un pianeta, dal nostro punto di vista, rimane comunque il velo superficiale di acqua e di gas. L'oceano, se distribuito uniformemente su una Terra sferica, avrebbe una profondità di 2,5 km, mentre la troposfera giunge a 10 km di quota; nel complesso proprio un velo, se paragonato ai 6370 km del raggio terrestre. L'atmosfera, poi, ha una massa globale relativamente piccola, per cui è esposta a marcate variazioni di composizione che, a loro volta, influiscono fortemente sulle condizioni superficiali. Basti pensare alle conseguenze termiche di variazioni del 10% in più o in meno della scarsissima anidride carbonica. Una variazione del 10% in più è dell'ordine di grandezza di quella provocata dall'uomo nell'ultimo secolo. Eppure, una variazione così limitata fa temere l'avvio di un effetto serra crescente, che in tempi geologici potrebbe portare all'evaporazione degli oceani; una variazione di segno opposto potrebbe portare al loro congelamento. Piccole variazioni di altri gas, per esempio l'ozono, modificano la trasparenza atmosferica alla luce ultravioletta. Un forte aumento di tale trasparenza potrebbe ripristinare la rottura delle molecole d'acqua da parte, appunto, della luce ultravioletta, determinando una perdita di idrogeno verso lo spazio periterrestre che provocherebbe l'arresto del processo di formazione di acqua, e tale perdita potrebbe procedere fino all'esaurimento di questa condizione necessaria alla vita, come è avvenuto su Venere e su Marte.

PRECARIETÀ DELLA VITA. Non appena si pronuncia il termine catastrofe qualcuno fa partire automaticamente l'accusa di catastrofismo. Ma è un'accusa che lascia il tempo che trova. Le superfici fittamente butterate della Luna e di Mercurio non lasciano dubbi sulle loro traversie, così come è indiscutibile la scomparsa quasi totale dell'acqua da Venere e da Marte.

Più discutibili sono semmai i possibili fattori di precarietà interni alla vita stessa. Un fattore molto generale è la natura sostanzialmente divergente dell'evoluzione. Questo fa sì che l'estinzione di una linea di discendenza comporti non solo una riduzione della diversità, ma anche una sorta di restringimento del ventaglio a disposizione dell'evoluzione successiva. In questo senso, le differenze fra tutte le specie attuali della biosfera terrestre sono inferiori a quelle che esistevano, per esempio, due miliardi di anni fa, e tale impoverimento delle risorse evolutive potrebbe a un certo punto diventare fatale.

Però l'unica minaccia indiscutibile proveniente dall'interno della biosfera terrestre è costituita dalla comparsa di una specie dotata di capacità tecnologiche. Dopo 3,8 miliardi di anni di evoluzione "normale" è entrata in scena la civiltà. Ciò è avvenuto notoriamente in una linea evolutiva di scimmioni (quella degli uomini, ovviamente) soltanto 6-7 milioni di anni dopo che si era separata dalla linea evolutiva degli scimpanzé. Da quel momento è iniziata una variazione della superficie del pianeta, comprese le acque e l'atmosfera, che ha assunto un andamento crescente in termini, per esempio, di riduzione del manto forestale e di aumento dei deserti. Le estinzioni sono andate crescendo con lo stesso andamento, e avvengono ora al ritmo di tre specie all'ora. È difficile dire quanto ci sia di inevitabile in tutto questo, ma non sono pochi quelli che ritengono tale esito insito nel concetto stesso di specie tecnologica. Certo, la prospettiva di condividere tale atteggiamento improvvido con improbabili alieni non è particolarmente consolante e non aiuta a prendere contromisure.

Resta il fatto ormai acquisito che l'uomo costituisce oggi un fattore di precarietà della vita, benché ciò riguardi più le specie simili alla nostra che la vita in generale: una volta scomparso l'uomo, la vita batterica potrebbe prosperare felicemente per altri miliardi di anni. E quando l'intera biosfera finirà, come finisce ogni cosa a questo mondo, il chimismo organico continuerà ad evolversi partendo proprio, almeno nel primo periodo, dai residui della biosfera stessa.

UNIVERSO AMICO? Qualcuno asserisce che l'Universo sia *life-friendly*, amico della vita. Ma se sulla Terra la vita si è protratta fino ad oggi per un caso fortuito, è scomparsa da Marte e scompare rapidamente dalla maggior parte dei pianeti sui quali compare, l'Universo appare semmai *life-unfriendly*, ostile alla vita. Per ora possiamo solo affermare che è *life compatible*, compatibile con la vita.

In ogni caso si tenga presente che, nella ricerca della sua diffusione, non ha senso passare subito a considerare la vita intelligente o sedicente tale. La maggior parte delle biosfere, anche molto antiche, potrebbe ospitare solo batteri. Dal momento che anche la Terra ha ospitato per miliardi di anni solo organismi microscopici, e che sono stati loro a liberare l'ossigeno nell'atmosfera, è ragionevole cercare proprio questo genere di effetti globali sulla superficie di lontani pianeti.

Lontani in senso relativo, naturalmente: in senso cosmico non pos-

IL PENSIERO RIMANE

sono essere che molto vicini, cioè collocati nel nostro braccio della nostra Galassia. Non è pensabile una ricerca rivolta a miliardi di altre galassie. Comunque, il nostro angolino di Universo potrebbe essere ugualmente interessante: se è andata bene a noi ...

Sulla definizione di complessità

in *Systema Naturae*, vol. II, 1999

Da qualche tempo¹ ha cominciato a circolare con insistenza tra campi disparati del sapere una serie di termini quali complessità, ordine e disordine, sistema, struttura, ma anche evoluzione, organizzazione, pattern, programma, stabilità, stress. Essi sono portatori di nuovi significati, nuovi suggerimenti, nuovi parallelismi, ma possono anche portare, cosa generalmente trascurata, ambiguità e approssimazione. È un fenomeno che sta interessando i filosofi e gli storici della scienza, ma sul quale sono stati indotti ad intervenire anche molti specialisti.

Nel caso della complessità i campi coinvolti vanno dalla fisica alla sociologia, dalla biologia all'economia, dall'ingegneria alla politica, dall'ecologia alla cibernetica: vedi, rispettivamente, i contributi di Prigogine e Gallino, Pattee e Simon, Hofstadter e Pasquino, May e Von Förster, tutti riportati su Bocchi e Ceruti (1985) tranne quelli di May (1973), Pattee (1973) e Simon (1969). Complessità è un termine molto usato, forse abusato, ma scarsamente definito. C'è anzi chi scoraggia

1. Questo articolo fu scritto all'Università di Mogadiscio nel 1989 per la rivista «Cilmi yo Farsamo» (Scienza e tecnica), che proprio in quell'anno cessò le pubblicazioni a causa dei ben noti disordini che investirono la Somalia. Nonostante il tempo trascorso ritengo che le considerazioni fatte qui mantengano sostanzialmente la loro validità; comunque aggiungo alla fine una breve nota di aggiornamento.

più o meno apertamente una sua definizione; quindi il primo punto che qui viene messo in discussione è proprio questo: se sia il caso di lasciare alcuni termini indefiniti (§ 1). Successivamente viene presentata una rassegna sintetica delle definizioni date finora (§ 2). Infine viene esplorata la possibilità di una definizione più soddisfacente (§ 3).

1. È opportuno usare dei termini senza definirli?

Da un punto di vista logico definire un termine non significa altro che stabilire una equivalenza fra il termine stesso e una proposizione atta a renderne il significato. Il termine definito viene ad essere un'abbreviazione della proposizione. In altre parole si esprime il concetto da definire ricorrendo ad altri concetti ritenuti primitivi rispetto ad esso, quindi già definiti a loro volta oppure considerati primitivi in assoluto perché il loro significato è ovvio o, per qualche altra ragione, non richiede una proposizione definitoria.

Definire i termini usati nel linguaggio ordinario costituirebbe una insopportabile pedanteria. Inoltre il guadagno in precisione sarebbe in gran parte inutile e avrebbe come contropartita una tale perdita di tempo da impedire di fatto la comunicazione. Invece i linguaggi tecnici usano una moltitudine di termini definiti in quanto la precisione che ne consegue rappresenta un vantaggio rilevante, in genere, e compensa largamente il tempo dedicato alla messa a punto della definizione stessa, specialmente se tali termini denotano concetti richiamati molto frequentemente. Ma i linguaggi tecnici sono anche specialistici, mentre il concetto di complessità non appartiene a nessuna specialità tecnica, a nessuna disciplina consolidata. Forse per questo motivo si tende a vedere in una sua definizione il pericolo di non poterne più disporre in modo così interdisciplinare, il rischio che la sua fecondità vada perduta nell'appropriazione specialistica che qualche settore del sapere potrebbe farne. Questo timore, tuttavia, non dovrebbe inibire *a priori* qualsiasi tentativo di rigorizzazione purché sia rispettata la valenza multiforme del concetto. Quindi del problema presentato conviene distinguere due aspetti: l'opportunità o meno di definire sempre i termini usati (al di fuori del linguaggio ordinario) nel modo più rigoroso (sub § 1.1) e la possibilità di definire dei termini senza sequestrarli all'interno di una specializzazione (sub § 1.2).

1.1. Conviene definire sempre i termini importanti

Ogni rigorizzazione di carattere linguistico circoscrive meglio il significato di un termine il quale, grazie a ciò, può essere messo in relazione più precisa con altri termini; il che equivale a dire che può essere usato con più efficacia nel confronto razionale delle idee. Se non si rende esplicito il significato dei termini che si usano si sottraggono le proprie idee alla verifica della coerenza logica interna e della compatibilità logica con altre idee. La rigorizzazione, insomma, è anche una norma deontologica per chiunque intenda impegnarsi nelle problematiche culturali in modo onesto e costruttivo, esponendosi alla critica e rifuggendo dal semplice rimestamento di parole.

Talvolta la tendenza alla definizione e alla sistemazione teorica in certi ambiti del sapere viene criticata in nome di una maggiore libertà di pensiero e di uno spazio più ampio da lasciare alla creatività: si insiste, per esempio, sull'affinità fra scienza ed arte. In realtà la creatività scientifica si esercita proprio su concetti rigorosi e definizioni precise, ed è scientifica solo nella misura in cui apporta al pensiero umano qualche elemento ulteriore di rigore logico; in fondo anche l'acquisizione di nuove conoscenze produce dei progressi in tale direzione. Quanto alla libertà, si ha l'impressione che la rivendichi strumentalmente qualche intellettuale che desidera sottrarsi al controllo della razionalità universale per continuare a scorrazzare verbosamente in qualche area dai contorni vaghi, dalle cui estetizzanti sottigliezze la massa degli uomini rimane completamente esclusa nonostante le affermazioni in contrario.

Certo la rigorizzazione non ha solo implicazioni "democratiche"; essa ha anche effetti discriminatori: la padronanza dei linguaggi formalizzati, altamente definiti e praticamente incomunicanti conferisce potere, mentre la massa degli uomini non dispone che di un linguaggio ordinario con pochissimi contenuti specialistici. Tuttavia è noto che il privilegio di chi padroneggia le tecniche e i relativi linguaggi è più o meno accentuato a seconda dei modelli sociali e delle contingenze politiche, quindi dipende essenzialmente da questi ultimi fattori e non dalla rigorizzazione in quanto tale. In conclusione definire nel modo più rigoroso possibile i concetti importanti è sempre opportuno ai fini di un progresso nel pensiero umano. L'atteggiamento contrario porta prevalentemente all'ambiguità e alla vanità verbale.

1.2. *Si può definirli senza renderli specialistici*

Un termine usato in vari campi del sapere non dev'essere per forza confinato ad un campo soltanto. È vero, però, che questa eventualità cresce con la rigorizzazione perché, nel mettere in relazione più precisa il termine da definire con quelli usati nel definirlo si incorre facilmente in esclusioni, eliminando certe sfumature esistenti nelle accezioni precedenti del termine stesso. Tuttavia, essendo consapevoli di tale rischio, si può procedere alla definizione rendendo esplicite sia le scelte che restringono certi significati, sia le scelte che ne privilegiano altri. L'esplicitazione e la giustificazione delle scelte operate offrono argomenti chiari alle eventuali critiche favorendo un effettivo progresso del sapere.

Comunque la possibilità che qualche sfumatura vada perduta non sembra motivo sufficiente per lasciare indefiniti e ambigui i termini usati da più campi culturali. Semmai la loro rigorizzazione è più importante perché permette un maggiore legame logico fra campi diversi facendo avanzare il sapere verso teorie più unitarie, più strettamente interdipendenti; sempreché non si aborrisca “la scienza come scienza del generale” (Ceruti, 1985, p. 29), come se procedere verso “teorie di grande unificazione” fosse un arretramento, come se tale tendenza avesse mai implicato il rifiuto di prendere in considerazione “ciò che è singolare, irripetibile, contingente” (*ibidem*). Conviene essere consapevoli del fatto che opporsi a questa prospettiva significa appoggiare la frammentazione del sapere e l'incomunicabilità fra campi specialistici, incoraggiando solo una comunicazione vaga e confusa magari parlando (naturalmente senza portare alcun argomento né, tantomeno, abbassandosi a fare esempi) di “molteplicità irriducibile” (*ibidem*).

Si può avere l'idea che un incernieramento lasso fra due discipline offra più opportunità allo sviluppo dei linguaggi di frontiera, che si sono spesso rivelati assai fecondi; ma è tutto da dimostrare che lo sviluppo delle scienze di frontiera sia stato scoraggiato dai tentativi di dare ad esse uno statuto più rigoroso. Se in un punto, in un termine, convergono più frontiere, più di due campi culturali (ed è questa la relativa novità della situazione), perché rinunciare a promuovere lo sviluppo di un confronto da molti lati sulla complessità? Non è più ragionevole prevedere una stimolazione più profonda ed estesa di quella che si è verificata quando due campi soltanto si sono incontrati? Anche se il risultato della definizione di un concetto di tale natura fosse la sollevazione generale contro quella definizione, la conse-

guenza più probabile di tale sollevazione sarebbe comunque una stimolazione dei campi coinvolti.

Fra l'altro i tentativi di rigorizzazione di qualsiasi concetto procedono comunque nei vari ambiti specialistici; quindi conviene dedicarsi tempestivamente alla sua definizione proprio per salvaguardare la polivalenza del termine.

2. Rassegna delle definizioni di complessità...

Alcuni autori hanno formulato delle vere e proprie definizioni esplicite, però senza confrontarsi, generalmente, con altre posizioni espresse al riguardo; altri hanno dato definizioni volutamente multiple, ritenendo che le diverse valenze di questa nozione non possano essere ricomprese sotto un'unica definizione; altri non hanno dato definizioni, ma le loro posizioni sono ricavabili dall'uso che fanno del termine in questione. Non mancano neppure definizioni rigorose formulate per rispondere a particolari esigenze tecniche.

Verranno esaminate le diverse posizioni cercando di non trascurarne alcuna, ma cercando anche di andare al sodo evitando le sottigliezze secondarie, o superate, o amplificate a titolo puramente polemico. La rassegna partirà dalle posizioni più generali; fra queste, alcune riguardano il piano metodologico (sub § 2.1), anche se di solito la complessità è considerata un attributo del sistema prescelto. In qualche caso si introduce come necessario l'elemento gerarchico ovvero l'organizzazione del sistema (sub § 2.2); in altri casi si distingue fra "complessità" e "complicazione" (sub § 2.3). Un altro criterio che viene sottolineato è quello probabilistico (sub § 2.4), fino a riservare un'attenzione particolare alle singularità. Infine le applicazioni specialistiche sono orientate esclusivamente verso i criteri che si prestano alla quantificazione (sub § 2.5).

2.1. ...che riguardano il piano metodologico

Si possono considerare aspetti metodologici intrinseci ed estrinseci; i primi riguardano l'irruzione della complessità nella problematica metodologica, i secondi riguardano elementi metodologici per affrontare correttamente la complessità dei sistemi studiati. Morin (1985) sottolinea, dei primi aspetti, una crescente consapevolezza della difficoltà cui si va incontro pretendendo di separare sempre osservatore ed osserva-

to. Nella fisica questo fatto è stato sancito nel ben noto principio di indeterminazione; ma l'osservatore viene ad essere visto come modificatore ineliminabile del fenomeno nel corso stesso dell'atto osservativo, come influenzato irrinunciabilmente dalla sua esperienza osservativa, in definitiva come costruttore del dato, anche in altri campi delle scienze in senso lato, dalla biologia, all'etnologia, all'economia. La stessa logica tradizionale sembra insufficiente alla descrizione rigorosa del mondo, poste queste difficoltà metodologiche.

Quali le soluzioni, allora, passando ai secondi aspetti? Non è possibile fornire direttive precise, se non quella di resistere alla tentazione di creare sistemi teorici chiusi, completi, autosufficienti. La Stengers (1985) concorda sull'invito di Ceruti (sub § 2.1) ad affrontare il particolare rinunciando a perseguire una scienza del generale, in quanto si rivelerebbe un'impresa poco produttiva. Essa insiste in particolare sulla "pertinenza" come fattore metodologico che va tenuto presente nella soluzione di problemi intrinsecamente complessi, ai quali la concezione riduzionista non potrebbe offrire nient'altro che l'accantonamento in attesa di tempo e denaro sufficienti.

Una posizione non propriamente normativa è quella di Atlan (1985), secondo il quale è comunque importante un giudizio soggettivo di "significato". Il problema non si pone per gli oggetti artificiali, il cui significato è conferito loro dall'uomo nel momento stesso in cui li concepisce, ma per gli oggetti naturali: essi possono essere qualificati come complessi nel momento in cui si riesce ad individuarne un significato, altrimenti rimangono puro disordine. Waddington (1977) aveva già detto qualche cosa di simile alla Stengers e ad Atlan, nel senso che anch'egli ritiene essenziale una selezione soggettiva della rilevanza delle strutture riconoscibili in natura, che sono poi quelle che portano alla formulazione dei concetti teorici fondamentali quali "atomo, gene, complesso di Edipo" (Waddington, 1977, p. 30). D'altra parte permangono aree di disordine e di casualità che sono sfuggite a qualsiasi tentativo di riordinamento, ma non si può mai escludere che prima o poi qualche tentativo di questo genere possa avere successo (Morin, 1985).

2.2. *...che introducono il fattore organizzazione*

Un sistema è dotato di organizzazione se non è del tutto indistinto, se in esso sono riconoscibili delle parti. In tal caso sono inscindibilmente presenti anche delle relazioni fra le parti: riconoscere delle parti equivale

a riconoscere delle relazioni fra di esse. Le parti possono essere uguali o diverse fra loro; se sono uguali possono essere indistinguibili o individualizzabili: questo significa attribuire ad esse delle qualità. La stessa organizzazione può essere molto labile o molto intricata a seconda delle caratteristiche delle parti e delle relazioni che fra di esse intercorrono.

Già al rapporto fra il tutto e le parti di un sistema Simon (1985), Pattee (1983) e Morin (1985) attribuiscono un primo grado di complessità in quanto l'organizzazione delle sue parti costitutive fa emergere nel tutto delle qualità "che sono constatabili empiricamente ma non sono deducibili logicamente" (Morin, 1985, p. 51). Si fa altresì notare come l'organizzazione ponga anche dei vincoli alle parti di un sistema; per esempio un sistema sociale pone dei limiti alle azioni delle persone che lo costituiscono, quindi il tutto è allo stesso tempo più e meno della somma delle parti. Quello che Morin (1985) chiama "principio ologrammatico" della complessità non è altro che un caso particolare dei possibili rapporti fra parti e tutto, e si realizza quando ogni parte, qualsiasi essa sia, è in grado di esprimere la totalità in maniera solo più indefinita e sfumata; ciò avviene, oltre che negli ologrammi, in molte funzioni superiori del cervello, come pure nella condivisione della cultura da parte delle persone che compongono una società.

Una volta individuate le parti di un sistema abbiamo a che fare con una gerarchia, cioè con la distinzione fra due concetti: quello dell'insieme degli elementi (o delle parti) e quello degli elementi stessi. Il termine gerarchia è del tutto neutro; non ha nulla a che vedere con autorità o con potere, anche se ad alcune relazioni gerarchiche possono essere assegnati questi significati particolari. La gerarchia può essere complicata senza limiti, ovviamente, dal fatto che ogni elemento di un insieme può essere costituito a sua volta da altri elementi, e così via. Volendo rappresentare la società umana, questa è fatta di persone e di molteplici organizzazioni e centri decisionali periferici, oltre che di istituzioni centrali. Tuttavia la strutturazione centrica e policentrica ad un tempo non introduce formalismi diversi da quelli che si possono ricomprendere sotto il concetto di gerarchia, tenendo presente che abbiamo a che fare con insiemi particolari, nei quali un elemento può appartenere contemporaneamente ad insiemi con caratteristiche differenti, e che le relazioni che li connettono possono modificare ciascun elemento e ciascun insieme in funzione del tempo secondo determinate modalità. E questo complica profondamente le strutture organizzate.

Ci sono pochi modelli sperimentali semplici del sorgere di strutture gerarchiche in funzione di certi parametri fisici e, inevitabilmente, del tempo: il modello paradigmatico è costituito dalle strutture dissipative, nelle quali emerge ordine dal disordine (Prigogine, 1985). Entro certi intervalli critici delle grandezze in gioco si osserva, in sistemi fluidi opportunamente allestiti, il sorgere di strutture macroscopiche periodiche relativamente stabili, come vortici e stratificazioni, dalla quiete apparente o dalla disordinata turbolenza che si osservano al di fuori dell'intervallo critico.

Pattee (1973) insiste invece nell'identificare i sistemi complessi come i prodotti di processi evolutivi, che sono sempre visti come molto più articolati della comparsa di semplici vortici o stratificazioni. Infatti egli si riallaccia all'origine della vita, o anche solo (si fa per dire) all'origine del codice genetico.

2.3. ...che distinguono fra "complessità" e "complicazione"

Atlan (1985, p. 159) propone di riservare al secondo termine la denotazione della "complessità artificiale (algoritmica)" della quale si ha una conoscenza totale, quantunque le operazioni e le variabili in gioco possano essere numerosissime. Invece la complessità "naturale" implica zone più o meno estese di ignoranza da parte nostra, per cui non saremmo in grado di descrivere i sistemi relativi in tutti i loro dettagli. Ciò non impedisce agli sviluppi recenti delle ricerche sull'intelligenza artificiale di prendere in considerazione elementi aleatori che creano significati "imprevisti e sorprendenti anche per coloro che fabbricano i modelli" (Atlan, 1985, p. 167). Questo avvertimento di Atlan non sembra tuttavia superare la sua distinzione iniziale in quanto rimane pur sempre la completa determinazione dei singoli passaggi per quanto numerosi questi siano e per quanto possa convenire ad un certo punto trascurare i risultati analitici a favore di configurazioni più massive che da questi si possono ricavare, "semplificando" in tal modo ciò che risulta dal sistema.

La posizione esposta è in antitesi con quella espressa a suo tempo da Simon (1969, p. 13), il quale scrive che "L'artificialità e la complessità sono indissolubilmente legate", per esempio nei calcolatori, mentre la complessità del comportamento dell'organismo vivente è apparente essendo "in gran parte un riflesso della complessità dell'ambiente in cui [...] si trova" (*ibidem*, p. 42). Non si nega che l'organismo vivente sia complesso a livello delle cellule, ma che questa complessità non si ripercuota che in minima misura sul comportamento.

D'altra parte si fa notare come, nella tradizione filosofica leibnitziana, la complicazione dipenda da limiti nostri (Stengers, 1985): i metodi utili per indagare i sistemi semplici sono adeguati per qualsiasi sistema: è solo una questione di tempo e di denaro. In realtà l'indagine scientifica contemporanea è cozzata contro problemi "intrinsecamente complessi" (*ibidem*, p. 63), quali sono molti di quelli che riguardano gli organismi viventi. La natura complessa di questi problemi, però, non è tanto una questione fisica, materiale, quanto una spia dei limiti metodologici di ascendenza leibnitziana. Tali problemi, infatti, possono essere affrontati con successo solo adottando criteri metodologici adeguati (sub § 2.1). Infine Waddington (1977), per rappresentare la complessità naturale, sembra voler recuperare ad un tempo complicazione e gerarchia.

2.4. ...che sottolineano il criterio probabilistico

Quanto minore è la probabilità che una struttura formale o materiale compaia per caso, tanto maggiore è la sua complessità. Questa può essere considerata una definizione rigorosa, ed è esprimibile anche con il linguaggio della teoria dell'informazione in quanto la struttura definita più complessa in termini probabilistici è anche quella che richiede un maggiore contenuto di informazione per essere descritta.

Quanto più una struttura è improbabile tanto più è rara, per cui si arriva al limite delle singolarità spazio-temporali, delle strutture materiali rappresentate da un unico esemplare. Questo esito è frequente per le strutture che è lecito considerare come dei prodotti evolutivi (Rizzotti, 1987).

2.5. ...per applicazioni particolari

L'informatica si rifà alla complicazione quantificata aritmeticamente come numero di operazioni logiche elementari previste nell'applicazione di un certo algoritmo oppure, pragmaticamente, come tempo di calcolo richiesto. Naturalmente è necessario fare riferimento ad un calcolatore standard il quale, quando la misura viene data in forma temporale, può essere anche un calcolatore reale.

A questo suggerimento si ispirano anche coloro che determinano la complessità genetica di un organismo definendola come il numero di nucleotidi (cioè di unità, di monomeri) del loro DNA "non ripetitivo" (Frontali e Dore, 1983), dove le parti ripetitive sono riconosciute un po' convenzionalmente in base alle risultanze sperimentali. Qui non si

considerano delle operazioni, come nella scienza dei calcolatori, ma solo la sequenza lineare di migliaia o anche miliardi di oggetti (i nucleotidi, appunto).

Il problema si è posto molto presto anche nell'ecologia (May, 1973), dove la complessità di un ecosistema viene correlata con il numero di connessioni fra le specie in esso presenti e con l'intensità di tali connessioni.

3. Per una ridefinizione del concetto

Il primo problema che si pone è l'eventuale selezione dei campi del sapere da privilegiare, in particolare quale spazio riservare al livello metodologico (sub § 3.1). In secondo luogo conviene analizzare la questione della "complicazione" (sub § 3.2) perché permette di affrontare i problemi nel modo più semplice. Come terzo punto si toccherà la questione dell'organizzazione gerarchica (sub § 3.3) e, infine, la base multidimensionale del concetto (sub § 3.4).

3.1. Considerazioni sulla metodologia

La complessità può riguardare qualsiasi cosa, quindi anche le posizioni filosofiche su una certa questione, quindi anche la posizione di Morin (1985) sulla complessità. Questa, tuttavia, è una posizione epistemologica fra le tante in circolazione e la sua autoqualificazione come "complessa" non la pone automaticamente su di un piano superiore nel quadro del dibattito epistemologico contemporaneo. Nulla impedisce che una posizione più semplice (sempre sulla nozione di complessità) sia più corretta e produttiva di quella di Morin. Quindi, senza neppure entrare nel merito, esula dalla nostra discussione ricomprendere tale posizione nella definizione del concetto; cioè il livello metodologico intrinseco non ci coinvolge in quanto discorso utile da analizzare per il nostro scopo.

Anche le norme da adottare nei confronti dei problemi complessi non riguardano il nostro discorso se non per il fatto che affrontare separatamente singoli problemi, tenere distinte singole forme della complessità, è proprio il contrario di quello che ci siamo prefissi (sub § 1.2). Nei limiti del possibile riteniamo più proficuo e stimolante, più utile al progresso del pensiero, tentare collegamenti e generalizzazioni che si muovano nella prospettiva di ricostruire incessantemente, tenendo

conto del nuovo, un sistema di pensiero unitario, che si ponga come riferimento continuo alle spinte centrifughe degli specialismi e che ne scoraggi le tendenze tecnicistiche disgregative nei confronti delle “teorie di grande unificazione”. Il progresso del sapere è stimolato nel modo massimo, sia verso la promozione di nuova ricerca, sia per la portata delle critiche che suscitano, proprio dalle “teorie di grande unificazione”. Con questo non si vogliono negare *a priori* successi interessanti alle soluzioni di problemi circoscritti, ma, riuscendo a formularle, saranno sempre più interessanti le soluzioni che coinvolgono più problemi, invece che uno soltanto!

Quanto all’idea, che traspare da vari passi della Stengers (1985), che sia l’approccio terminologico a definire complessi certi problemi rispetto ad altri, essa sembra difficilmente sostenibile. In quale modo un metodo, per esempio proprio quello proposto dalla Stengers, permetterebbe di discriminare fra semplice e complesso? Se invece si dice che è un metodo adatto ad affrontare i problemi complessi, significa che essi sono tali indipendentemente dal metodo, cioè lo sono per altri motivi, per esempio perché implicano la descrizione analitica di cellule viventi (ritenute universalmente complesse).

In effetti la maggior parte delle posizioni illustrate sono concepite per rappresentare il mondo, i sistemi e i modelli che del mondo isolano delle parti. Non si richiamano a nuove logiche o a nuove razionalità. Del resto, in attesa che queste novità acquistino maggiore concretezza, c’è moltissimo da fare anche accontentandosi della razionalità universalmente condivisa nella scienza sviluppata finora e non solo nella scienza.

3.2. *Complicazione e numerosità*

Semplificando al massimo si può dire che tutti concordano su di un punto: avendo a che fare con un insieme di elementi tutti uguali fra loro, tale insieme è più complicato se i suoi elementi sono numerosi. Perciò al livello più elementare la complicazione è legata alla numerosità degli elementi. Si potrà osservare che, riducendosi a questo punto, scompare ogni problema; ma è noto che in ogni impresa di formalizzazione conviene affrontare pedantemente un punto per volta a partire dal più semplice.

In fondo si sono ispirate a questo banale concetto le quantificazioni della complessità riguardanti i calcolatori e il DNA (sub § 2.5), anche se è lecito mantenere delle riserve sull’adeguatezza delle definizioni date. In-

fatti per il DNA vengono escluse *a priori* le parti ripetitive, che dovrebbero invece contribuire meno alla complessità globale come risultato del calcolo e non perché identificate *a priori*. Nei calcoli automatici, al contrario, le operazioni ripetitive contribuiscono alla complessità quanto quelle non ripetitive, mentre ciò non si adatta bene al concetto di complessità. Quindi la numerosità pura e semplice non basta. Questa, comunque, rispecchia la complicazione artificiale di Atlan (1985) e ogni idea sulla complessità con impostazione leibniziana, fra cui quella di Simon (1969).

In quest'ultimo autore è il caso di fare rilevare una contraddizione: se il comportamento complesso è tipico di oggetti artificiali, mentre nei viventi (naturali) dipende dalla complessità dell'ambiente, essendo quest'ultimo naturale (almeno in parte), ne consegue che anche degli oggetti naturali (l'ambiente, appunto) possono essere complessi. Naturalmente la maggior parte degli studiosi la pensa diversamente, nel senso che ritiene gli organismi complessi per loro natura (anche nel comportamento), non solo come riflesso dell'ambiente. E se vogliamo rimanere sul piano oggettivo non possiamo che fare nostra l'osservazione della Stengers (1985, p. 69) che non si può ritenere destituito di complessità un cadavere per il fatto che di solito non ci suscita interesse: gli organismi viventi, anche quando sono morti e perciò privi di comportamento, rimangono oggetti intrinsecamente complessi. Del resto lo sono anche quelli che, come le piante, non manifestano un comportamento nel senso comune del termine. Alla descrizione del genere di complessità tipico degli organismi viventi appare smisuratamente inadeguata la semplice conta degli elementi. Rimane il fatto che la numerosità risulta essere una componente della complessità di qualsiasi natura, e che tutti gli oggetti e i fenomeni naturali e artificiali traggono almeno una quota della loro complessità proprio dal numero degli elementi che li costituiscono.

3.3. *Il ruolo della gerarchia*

Quando in un oggetto si riconoscono delle parti si compie indubbiamente un'operazione soggettiva, che però può essere condotta sulla scorta di descrizioni accurate e giustificazioni razionali, quindi in base ai comuni criteri di oggettività della scienza. Riconoscere delle parti, degli elementi numerabili, significa già stabilire una gerarchia, cioè identificare un oggetto come insieme di altri oggetti: le parti, appunto. Questa sembra l'idea di Waddington (1977): nei modelli, anche nei più

semplici, ci si imbatte sempre in qualche aspetto gerarchico, in quanto già elementi di due tipi diversi appartengono per definizione a due insiemi diversi e un oggetto, anche solo teorico, che li comprenda entrambi si configura come un insieme costituito da due sottoinsiemi. Il tutto costituisce dunque una gerarchia a tre livelli: gli elementi, i due insiemi, e l'oggetto che li comprende.

Il riconoscimento dei livelli, come quello delle parti, non è né completamente soggettivo né completamente oggettivo, cioè i livelli non sono dati nella realtà in modo indiscutibile, ma vi sono riconosciuti in modo coerente con i principi scientifici correnti. Invero “le strutture della natura si collocano in livelli ‘quasi scomponibili’ che differiscono nell’entità delle loro forze, dimensioni, numeri o scale temporali, tanto che le classificazioni dei fisici per un dato problema appaiono spesso ovvie e ‘naturali’” (Pattee, 1973, p. 88).

Nel caso della gerarchia a tre livelli considerata poc’anzi poniamo che l’oggetto sia costituito non da due, ma da numerosi sottoinsiemi: ciò corrisponderebbe ad una maggiore complessità per la semplice ragione che aumenterebbe la numerosità dei sottoinsiemi, anche se rimanesse uguale il numero totale degli elementi di base. Infatti i sottoinsiemi si possono considerare gli elementi dell’insieme-oggetto, quindi il loro numero contribuisce, in base alle considerazioni precedenti, alla sua complessità. Insomma l’organizzazione gerarchica pone dei problemi a quella che pareva una soluzione banale, cioè la numerosità. La nuova soluzione potrebbe essere quella di considerare come numerosità globale quella media dei vari insiemi di ogni livello della gerarchia, mediata a sua volta fra i livelli (eccetto quello dell’oggetto). Si contano gli elementi di ogni sottoinsieme e se ne calcola la media; si contano i sottoinsiemi; quindi si fa la media fra il loro numero e la media già calcolata. I livelli possono essere anche molto numerosi: adottando questa soluzione non si privilegia alcuno di essi in quanto ciascun livello contribuisce alla numerosità globale con un unico numero. In definitiva per tenere conto in modo adeguato della numerosità non si può prescindere dall’analisi dell’organizzazione gerarchica del sistema considerato.

D’altra parte la gerarchizzazione contribuisce di per sé alla complessità, e questo può essere il secondo aspetto rilevante da registrare sotto forma del numero di livelli gerarchici ravvisabili nel sistema e considerati perciò nella determinazione della numerosità globale. Alla fine di questa analisi ci troviamo dunque in possesso di due numeri, uno

che esprime la numerosità globale media dei livelli gerarchici, l'altro che esprime il numero dei livelli gerarchici (che, se vogliamo, è un altro tipo di numerosità).

L'organizzazione può essere ulteriormente complicata dal fatto che ogni elemento di base, per esempio, è interessato da varie relazioni, diverse in qualche misura per i diversi elementi, per cui esistono diversi insiemi, variamente sovrapposti, che rispecchiano le diverse relazioni fra gli elementi di base. È come dire che al primo livello gerarchico si delineano diverse linee gerarchiche, e tale situazione è più o meno estesa a tutti i livelli gerarchici. In definitiva anche il numero che esprime i livelli gerarchici è opportuno sia una media fra le diverse linee gerarchiche ravvisabili. Questa analisi costringe a ricalcolare il numero medio dei livelli gerarchici lungo le diverse linee gerarchiche (e quindi anche a ricalcolare la numerosità globale media). In compenso emerge un terzo aspetto importante: quello del numero di linee gerarchiche, che esprime la diversificazione interna dell'insieme considerato, e che può essere considerato come un terzo tipo di numerosità.

3.4. La complessità è una quantità multidimensionale

Forse si potrebbe continuare lungo la medesima linea di ragionamento prendendo in considerazione ulteriori fattori di complessificazione di un sistema, aggiungendo perciò altre dimensioni alle tre già considerate. Anche fermandosi a queste tre si fa emergere il carattere multidimensionale della complessità, che sembra rispettarne le definizioni date e gli usi fatti sia per rappresentare sistemi astratti sia per descrivere oggetti concreti. In particolare le configurazioni massive che possono rappresentare in modo sintetico certe uscite dei calcolatori (sub § 2.3) sono rappresentabili come strutture organizzate secondo diverse tipologie, quindi una loro analisi nel senso gerarchico indicato può permettere di calcolarne la complessità. Anche il calcolo della complessità di un ecosistema (sub § 2.5), in fondo, non fa che privilegiare la diversità a scapito della semplice numerosità la quale, però, è considerata nell'intensità delle relazioni fra le specie; un'analisi secondo la proposta avanzata qui permetterebbe forse un'analisi più accurata dell'ecosistema.

Non essendoci limiti aprioristici né nella scomposizione degli elementi di base né nel procedere verso sistemi via via più comprensivi, l'analisi gerarchica proposta è estendibile a piacere sia verso il dettaglio più spinto sia verso la sintesi. Spingere verso il dettaglio l'analisi ecologica

significa proprio analizzare gli organismi viventi in quanto tali fino ai livelli cellulare e molecolare. L'analisi non ha nulla di scontato, comunque, neppure nel riconoscimento dei livelli e delle linee gerarchiche.

Naturalmente la puntuale espressione matematica della complessità secondo lo schema proposto va cimentata con esempi, cioè con veri e propri calcoli; ogni esempio significativo richiederà necessariamente una discussione approfondita e un accurato confronto con le espressioni matematiche già in uso. Si potrebbe decidere di lasciare indicati i contributi delle varie dimensioni (numerosità globale media, numero medio dei livelli, numero delle linee gerarchiche) mediante una terna ordinata di valori ovvero un vettore, dando eventualmente peso diverso alle tre grandezze o sottoponendole ad altri trattamenti matematici.

Un'altra possibilità è quella di esprimere sinteticamente il valore della complessità con la distanza di un punto dello spazio cartesiano dall'origine in base ai valori delle tre coordinate. Condensando il concetto in un numero unico si può metterlo in relazione con il contenuto di informazione dell'oggetto del quale si vuole rendere la complessità, o addirittura si possono uguagliare contenuto informativo e complessità. In questo modo ci si appoggerebbe ad una teoria già ben formalizzata, la teoria dell'informazione, anche se si perderebbe il diverso contributo dato all'informazione complessiva da parte delle diverse dimensioni della complessità. L'esito importante è che la formalizzazione vera e propria sia resa possibile mantenendo la polivalenza e le potenzialità del concetto.

Riferimenti bibliografici

ATLAN H. (1985), *Complessità, disordine e autocreazione del significato*, in Bocchi G., Ceruti M. (a cura di), *La sfida della complessità*, pp. 158-178.

BOCCHI G., CERUTI M. (a cura di, 1985), *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano.

BOCCHI G., CERUTI M. (1985), *Presentazione*, in *La sfida della complessità*, cit., pp. 7-22.

CERUTI M. (1985), *La hybris dell'onniscienza e la sfida della complessità*, in *La sfida della complessità*, cit., pp. 25-48.

FRONTALI C., DORE E. (1983), *DNA structure and characterization*, in *Molecular Biology of Parasites* (J. Gurdiola, L. Luzzatto, W. Trager, eds), Raven Press, New York, pp. 155-172.

GALLINO L. (1985), *Complessità esterna e complessità interna nella costruzione di un modello del comportamento*, in *La sfida della complessità*, cit., pp. 274-297.

HOFSTADTER D.R. (1985), *L'architettura del "Jumbo"*, in *La sfida della complessità*, cit., pp. 298-333.

MAY R. (1973), *Model Ecosystems*, Princeton Univ. Press, Princeton.

MORIN E. (1985), *Le vie della complessità*, in *La sfida della complessità*, cit., pp. 49-60.

PASQUINO G. (1985), *La scienza politica e la sfida della complessità*, in *La sfida della complessità*, cit., pp. 347-361.

PATTEE H.H. (ed., 1973), *Hierarchy Theory. The Challenge of Complex Systems*, Braziller, New York.

RIZZOTTI M. (1987), *Appunti sull'evoluzione a livello molecolare*, Progetto, Padova.

SIMON H.A. (1969), *Le scienze dell'artificiale*, ISEDI, Milano, 1973.

STENGERS I. (1985), *Perché non può esserci un paradigma della complessità*, in *La sfida della complessità*, cit., pp. 61-83.

WADDINGTON C.H. (1977), *Strumenti per pensare*, Mondadori, Milano.

Nota di aggiornamento

Nel corso dell'ultimo decennio si sono fatti decisivi passi avanti dal punto di vista formale nel senso che la complessità di una sequenza binaria o di un algoritmo sono oggi sostanzialmente denotabili con un numero con accordo pressoché generale degli studiosi. Questo ha significato però sottrarre la "complessità formale" ai filosofi (nel senso più ampio del termine) per consegnarla ai matematici (anch'essi da intendere nel senso più ampio). È rimasto invece quasi al punto di partenza il problema di assegnare un valore di complessità agli oggetti reali. Questi possono andare da un gas ad un cristallo: rimane il fatto che il collegamento con la complessità formale rimane un'aspirazione, e nessuno sembra ancora in grado di descrivere con un numero o un vettore il grado di complessità del cristallo di una precisa sostanza.

La sfida più importante rimane poi quella di caratterizzare la complessità dei viventi. Si tende ad ammettere che i viventi costituiscano un picco della *complessità materiale* nell'intero universo; si tende ad accettare una graduatoria di complessità fra gli stessi organismi viventi o fra li-

velli della loro organizzazione, ma scarseggiano i tentativi di andare più a fondo, cioè di indagare quale combinazione di caso e di ordine, di entropia e di informazione, di flessibilità e di rigidità organizzative consenta di fare qualche passo avanti. Questo peraltro non sorprende: se permane l'arretratezza nella capacità di caratterizzare sistemi materiali ritenuti più semplici, a maggior ragione tale arretratezza non può non permanere per gli organismi viventi.

Ciò che invece sorprende è che alcuni preferiscano avventurarsi ad indagare la complessità del cervello prima di saper caratterizzare quella di un singolo aspetto del cervello, per esempio di un neurone, cioè del multiforme tipo cellulare che ne costituisce l'unità fondamentale, oppure di un computer, naturalmente inteso come sistema materiale, cioè come *hardware*, in quanto questo genere di macchine viene spesso e volentieri paragonato al cervello. Sul versante dei processi, anziché delle strutture, alcuni si avventurano a disquisire sulla complessità della fisiologia umana, che poi non è più complessa di quella di qualsiasi altro mammifero, quando si è ancora lontanissimi dalla piena comprensione dei processi e delle interazioni funzionali che operano in una singola cellula batterica.

È difficile pensare che l'attacco alla complessità biologica possa riportare qualche successo partendo dalle sue espressioni più elevate. La caratterizzazione della vita nel senso più fondamentale non ha nulla a che vedere con il cervello: semmai deve misurarsi concretamente con le strutture basilari di una cellula, per esempio una singola molecola proteica o un pezzetto di membrana fosfolipidica. Naturalmente tali strutture basilari vanno studiate dapprima come pure figure geometriche statiche, allo zero assoluto, in assenza di qualsiasi complicazione dinamica. In quella situazione si intravede effettivamente una qualche loro continuità con un cristallo o con un liquido. Certo si perde in questo modo la vita, ma nulla ci impedisce di guardare alle cellule viventi in un secondo momento, come è avvenuto nello svolgersi del programma riduzionista di grande successo della biologia molecolare.

Riferimenti bibliografici

AA.VV. (1996), *Caos e complessità*, CUEN, Napoli.

BARSANTI G. (1999), *La scoperta della complessità biologica*, in Cerrai

P., Freguglia P. (a cura di), *La matematizzazione della biologia*, QuattroVenti, Urbino, pp. 33-48.

BELLAVITE P., ANDRIGHETTO G., ZATTI M. (1995), *Omeostasi, complessità e caos*, Franco Angeli, Milano.

BENCI V. (1998), *Alcune riflessioni su informazione, entropia e complessità*, in Freguglia P. (a cura di), *Modelli matematici nelle scienze biologiche*, QuattroVenti, Urbino, pp.163-189.

BONCINELLI E. (1998), *Gli organismi viventi fra fisica e biologia*, «Systema naturae», 1, pp. 117-126.

FORESTIERO S. (in corso di stampa), *La nozione di complessità in biologia*, «Theoretical Biology», 2 (a cura di Cerrai P., Freguglia P.).

GALLENI L. (in corso di stampa), *Da Lamarck a Teilhard De Chardin: dalla biologia come scienza dell'evoluzione della vita alla biologia come scienza della complessità della vita*, «Theoretical Biology», 2 (a cura di Cerrai P., Freguglia P.).

HO M.W. (1994), *Che cos'è la neghentropia di Schrödinger?*, «Biology Forum», 87, pp. 164-172.

MORCHIO R. (1994), *Caos deterministico, teoria dei sistemi e sistemi biologici*. Atti del simposio su Dinamiche complesse e strutture frattali in biologia umana e ambientale, pp. 52-70.

NOBILI R. (1999), *Le basi logiche della biologia teorica e gli automi di von Neumann*, in Cerrai P., Freguglia P. (a cura di), *La matematizzazione della biologia*, cit., pp. 179-185.

OMODEO P. (in corso di stampa), *Ordine e complessità biologica*.

SERRA P., ZANARINI G. (1995), *Sistemi complessi e processi cognitivi*, Calderini, Bologna.

La specie umana dovrebbe chiamarsi *Pongo sapiens*

in *Il futuro della biosfera: una sfida per la biologia evolutiva*, 2002

In realtà sarebbe più conforme ai comuni riferimenti morfologici chiamarla *Pongo nudus*, come suggeriva implicitamente il famoso libro di Desmond Morris “La scimmia nuda”, ma per non intervenire troppo pesantemente nella nomenclatura è accettabile anche *Pongo sapiens*. Quello che è ormai inaccettabile, sia dal punto di vista organico in senso più stretto, sia dal punto di vista culturale, è considerarla l’unica specie di un genere *Homo* a sé stante. Forse si può considerare decisivo, per la collocazione filogenetica della specie umana, il convegno tenuto a Detroit nel 1995 in onore di Morris Goodman nel corso del quale fu definitivamente sancito sotto ogni profilo che la nostra specie è più affine agli scimpanzé che ai gorilla, e che la prima dicotomia in seno agli scimmioni fu quella fra Ilobatini (siamango e gibboni) e Pongini (orango, gorilla, scimpanzé, uomo). Questi ultimi, secondo criteri correntemente applicati ad altri gruppi, dovrebbero appartenere tutti al genere *Pongo*.

Bibliografia selezionata

La bibliografia completa comprende 120 pubblicazioni, tra libri, dispense, articoli e riassunti.

Per questa selezione ho utilizzato quella fatta da R. Costa, professore di Genetica all'Università di Padova, nel n. 2/2002 de «L'Ateo», aggiungendo i riferimenti riguardanti i testi presenti in questa raccolta.

- Rizzotti M. (1974): *On the quaternary structure of Carcinus maenas (Arthropoda) hemocyanin*. *Experientia* 3: 1201-1202.
- Rizzotti M. (1979): *Tentativo di esporre in forma "assiomatizzata" le basi fondamentali della genetica umana*. Dispensa, Università di Padova.
- Rizzotti M., Zanardo A. (1981): *Assiomatizzazione e formalizzazione delle leggi elementari della genetica classica*. *Atti AGI* 28: 339-340.
- Rizzotti M. (1982): *I viventi si evolvono: li spinge il caso o la selezione naturale?* *Testi e contesti* 6: 108-114.
- Rizzotti M., Zanardo A. (1983): *Use of modal logic in the axiomatization of genetics*. (Abstracts) XV Int. Congress Genetics, New Delhi: 819.
- Rizzotti M. (1984): *Il concetto di artificiale*. *Memorie Ist. Veneto Sc. Lett. Arti* 34: 7-39.
- Rizzotti M., Zanardo A. (1986): *Axiomatization of genetics 1. Biological meaning*. *J. theor. Biol.* 118: 61-71.
- Rizzotti M., Zanardo A. (1987): *La genetica fra storia e logica*. *Didattica delle scienze XXII*: 130.
- Rizzotti M., Pagni S., Bentivegna F. (1990): *Conservation of peculiar*

- structural properties by the hemoglobins of anguilloid eels (Teleostei)*. Z. zool. Syst. Evol. 28: 12-19.
- Rizzotti M. (1991): *Materia e vita (Matter and Life)*, XVI + 313, UTET, Torino.
- Rizzotti M. (1993): *Che tipo di sistema è un vivente?* Riv. Biol.- B. Forum 86: 131-134.
- Rizzotti M., Zanardo A. (1993): *Assiomatizzazioni della genetica - Aspetti non estensionali in alcune leggi elementari della genetica classica*. Atti della Accademia nazionale dei Lincei, anno CCCXC, serie IX, vol. II, fascicolo 4.
- Rizzotti M. (1995): *Com'è nata la vita*, in *Biologia evolucionistica* (a cura di M. Luzzatto, P. Maggiora, F. Scalfari.): CUEN, Napoli.
- Rizzotti M. (1995): *Cilium: origin and 9-fold symmetry*. Acta biotheoretica 43: 227-240.
- Rizzotti M. (1996): *Defining life*. In Rizzotti M. (a cura di): *Defining life: the central problem in theoretical biology*: 1-7. University of Padova, Padova.
- Rizzotti M. (1996): *What is life not?* In Rizzotti M. (a cura di): *Defining life. The central problem in theoretical biology*: 199-208. University of Padova, Padova.
- Rizzotti M. (1997): *Fondamenti della biologia*, in Repola Boatto A. (a cura di): *Pensiero scientifico. Fondamenti ed epistemologia*: 49-66. IRRSAE-Marche, Ancona.
- Rizzotti M., Arias A.M., Fagioli G., Gioppato F., Bisazza A. (1998): *Fish hemoglobins: the suborder Cyprinodontoidei (Teleostei)*. Trends Comp. Biochem. Physiol. 5: 145-152.
- Rizzotti M., Crisma M., De Luca F., Jobstraibizer P., Mazzei P. (1998): *Did the first cell emerge from a microsphere?* (a cura di Chela-Flores J., Raulin F.): *Exobiology* 199-202. Kluwer, Dordrecht.
- Rizzotti M. (1998): *Prime tappe dell'evoluzione cellulare*, VIII + 197, De-cibel/Zanichelli, Bologna.
- Rizzotti M. (1998): *The possible origin of the bacterial flagellum*. Endopy-tosis & Cell Res. 13 (suppl.): 109.
- Rizzotti M., Gioppato F. (1999): *Fish haemoglobins: the order Clupeiformes*. Rev. Fish Biol. Fisheries 9: 1-17.
- Rizzotti M. (1999): *Origine del flagello batterico*. 7° Incontro it. di Biologia evol., Firenze: 49-51.
- Rizzotti M. (1999): *Fede e scienza oggi*. (a cura di Ciardella P.): Fede e ri-

PARTE SECONDA. SCRITTI SCIENTIFICI

- cerca di Dio, oggi. 73-80. Piemme, Casale Monferrato.
- Rizzotti M. (1999): *Sulla definizione di complessità*. Sistema Naturae, vol. II: 283-298.
- Rizzotti M. (1999): *La diffusione della vita nell'universo*. L'Astronomia 201: 24-35.
- Rizzotti M. (2000): *Early evolution. From the appearance of the first cell to the first modern organisms*. Birkhäuser, Basilea.
- Rizzotti M. (2001): *L'origine della vita*. In *Atlante della vita*, vol.1: 109-129. UTET, Torino.
- Rizzotti M. (2001): *Precellular organic aggregates: the bridge between the non living and the living*. In Giovannelli F. (a cura di): *The bridge between the big bang and biology*. CNR Special Publications, Roma.
- Rizzotti M. (2001): *Vita ed equilibrio chimico fisico*. Sistema Naturae, vol. III, Ancona.
- Rizzotti M. (2002): *La specie umana dovrebbe chiamarsi Pongo sapiens*. 10° incontro italiano di biologia evoluzionistica, Pisa.

*Finito di stampare
nel mese di novembre 2003*

