

L'apertura del biologico

La costruzione di un umano, 2

Stefania Consigliere

Università degli Studi di Genova
DISFOR, Sezione di Antropologia
via Balbi 4 – 16126 Genova

L'eredità mai aperta

La parabola conoscitiva delle scienze, in particolare di quelle fisiche e matematiche, nell'arco del Novecento è forse una delle più magistrali lezioni di inventività, umiltà, astuzia e potenza della ragione che si siano date nella storia dell'Occidente.

La vera lezione del principio di complementarità, quella che può essere tradotta in altri campi della conoscenza, come Bohr ha cercato di fare lungo tutta la sua vita, è senza dubbio questa ricchezza del reale che supera qualsiasi linguaggio, qualsiasi struttura logica, qualsiasi ricognizione concettuale; ciascuno di essi può soltanto esprimerne – *ma riesce a esprimerne* – una parte; così, la musica non è esaurita da nessuna delle sue stilizzazioni, il mondo dei suoni è più ricco di quanto qualsiasi linguaggio musicale – che sia quello della musica esquimese, di Bach o di Schönberg – possa esprimere; ma ciascuno costituisce una scelta, un'esplorazione elettiva e, in quanto tale, la possibilità di una pienezza. [PRIGOGINE E STENGERS 1979, p. 313-314]

Tuttavia, come dicevamo nella puntata scorsa, è una lezione che ancora aspetta di essere accolta. L'incompletezza di qualsiasi conoscenza; l'ineliminabilità della contraddizione; la necessità di approcci complementari a un medesimo oggetto; la ricchezza del reale; l'indeterminatezza dei processi; l'impossibilità di una conoscenza svincolata dal punto di osservazione: tutto questo l'abbiamo orecchiato a scuola, o ne abbiamo letto sui manuali di storia della scienza, ma faticiamo a tradurlo nella pratica conoscitiva (ed etica) quotidiana; non riusciamo a farlo diventare *forma mentis*. Un po' come se nel 1959, a cent'anni dalla pubblicazione dell'*Origine della specie*, tutti ne avessero sentito parlare, ma nessuno riuscisse a ragionare in termini diversi da quelli del racconto biblico della creazione.

Questa situazione è particolarmente chiara nell'ambito della biologia, dove un generale *paradigma deterministico* continua a regnare diffusamente. Solidificatosi dopo la metà del Novecento, esso si basa su un insieme di assunti generali, presupposti che in larga misura "vanno da sé" tanto nella comunità scientifica quanto presso il pubblico più ampio, e che comprendono (1) il riduzionismo, ovvero l'idea che i fenomeni complessi possano essere completamente spiegati come esito di un insieme di processi sottostanti più semplici; (2) l'equiparazione del genoma a un programma; (3) il rapporto uno-a-uno fra geni e caratteri fenotipici – o, al minimo, fra geni e proteine; (4) l'adattazionismo, ovvero l'idea che ogni tratto dei viventi sia spiegabile tramite un processo meccanico di selezione ambientale, e che quindi l'adattamento ambientale sia il principale motore evolutivo; (5) la scala di valore in base alla quale vengono ordinati i viventi, da quelli meno complessi a quelli più complessi; (6) il taglio sociobiologico delle ricerche sul comportamento.

Nelle pagine che seguono userò la parola *determinismo* per indicare, nel suo insieme, questo paradigma; e i termini riduzionismo e meccanicismo nel loro senso più tecnico.

Vale la pena di notare, qui, l'ampia discrasia fra la biologia che s'impara sui libri di scuola e sulle dispense universitarie, e quella che effettivamente viene praticata nei laboratori e poi pubblicata sulla stampa specializzata. Nei manuali, e negli insegnamenti di alcuni appassionati, essa è, per eccellenza, la scienza del molteplice e del complesso; nelle ricerche routinarie, tuttavia, gli schemi esplicativi tendono a essere molto meno sofisticati, e spesso decisamente deterministici. Una collega biologa mi disse una volta che per sopravvivere alla *pratica* ai laboratori è necessario dimenticare gran parte della *teoria* che si è appresa sui libri.

Né, peraltro, questa situazione è tipica della sola biologia. Il paradigma deterministico è all'opera non solamente entro le scienze, ma più in generale nel nostro modo "occidentale" di stare al mondo: lungi dall'essere una mera impostazione scientifica, esso pervade le nostre scelte e orienta le nostre politiche. Il punto è delicato e cruciale: quando si tratta di riduzionismo in biologia (e, a maggior ragione, in antropologia) non si parla di un'opzione teorica disincarnata, che riguardi solo gli specialisti di discipline esoteriche; ma di un'impostazione cognitiva, e quindi esistenziale, di portata incalcolabile.

Vediamo un paio di esempi e supponiamo, per cominciare, che da qualche settimana io mi senta di umor cupo, priva di entusiasmo, con poca voglia di stare con altri e di fare alcunché. Per uscire da questa impasse mi si prospettano piste differenti. Una di queste – quella attualmente maggioritaria – sostiene che i sintomi descritti fanno parte del quadro clinico di una specifica malattia mentale, detta *depressione*, le cui origini sono probabilmente genetiche e che causa una disfunzione nel meccanismo encefalico di reuptake della serotonina. Non c'è cura eziologica disponibile, ma i sintomi sono controllabili tramite assunzione a lungo termine di particolari molecole psicoattive. Una seconda pista – oggi minoritaria – sostiene invece che i periodi di tristezza hanno cause esistenziali; che i sintomi dovrebbero essere tacitati solo nei casi gravissimi, dacché sono utili segnali d'allarme di una sofferenza che sta a monte e che è alleviabile tramite specifiche tecniche del corpo (attività sportiva, respirazione, yoga o quant'altro), lavorabile tramite psicoanalisi e risolubile sul piano esistenziale.

Altro esempio, questa volta a livello collettivo. Da qualche anno sulla stampa specializzata (e – si badi – con *impact factor* alto) si è ricominciato a pubblicare studi che "dimostrano" come le differenze nei rendimenti scolastici, o nei test del QI, fra popolazioni di diversa origine etnica dipendano sostanzialmente dal corredo genetico degli individui [RUSHTON & JENSEN 2005]. In termini brutali (del tutto analoghi a quelli impiegati in queste pubblicazioni): i bianchi sono più intelligenti dei neri, dei gialli e, in breve, di tutti. Inutile pertanto, argomentano questi autori, continuare a finanziare politiche assistenziali per la popolazione economicamente svantaggiata, dato che è la *natura stessa* a impedire loro i risultati intellettuali che, invece, i bianchi possono ottenere.

Sono esempi banalissimi, e proprio per questo particolarmente chiari. Quando in biologia si discute di riduzionismo, la posta in gioco non è solo il prestigio accademico o la verità dei fatti, ma l'impostazione politica della vita collettiva.

Ghost in the machine

Ad alcuni lettori quest'asserzione sembrerà eccessiva, e mi obietteranno che la *verità* nulla ha a che fare con la politica, dacché l'impresa scientifica rivendica da sempre il proprio assoluto disinteresse per le questioni legate ai valori e al complicato mondo delle faccende umane. Se, dunque, il determinismo biologico risulta scientificamente più verosimile della complessità, sarebbe del tutto assurdo rifiutarlo in nome di un partito preso per l'indeterminazione.

Plausibile a un certo livello del ragionamento scientifico, quest'asserzione è però insoddisfacente ad altri livelli ed erronea dal punto di vista antropologico. Partiamo da questo secondo punto. Ammesso

che il mondo sia separabile in una natura universale soggiacente e molte culture con valori relativi, allora è vero che la scienza si occupa della natura prescindendo dalle culture e che, quindi, il suo procedere non dipende da scelte valoriali. Il fatto è però che, come abbiamo visto nella puntata precedente, la stessa separazione di natura e cultura è un artefatto culturale: fondamentale e per noi imprescindibile, ma pur sempre esito di una storia specifica e di una specifica cosmovisione, e mantenuta grazie a pratiche e implementazioni assai precise [LATOURE 1991, STENGERS 1994, SINGLETON 2004]. Dal punto di vista antropologico la scienza, come ogni altro modo della conoscenza, apprende il reale secondo schemi culturalmente specifici e quindi, in senso ampio, politici e valoriali.

Si tratta di un tema spinoso, come testimonia la letteratura sulla sociologia della scienza e sull'epistemologia [LEWONTIN 1991, STENGERS 2006]. Ai nostri fini, comunque, non è necessario accogliere quest'obiezione antropologica al determinismo scientifico: si può infatti fare riferimento anche a un'obiezione d'altro genere, questa volta pienamente ed esclusivamente scientifica – e che pertanto, in questa sede, risulterà più rilevante.

Quando in biologia entra in azione il paradigma deterministico, e per quanto esso venga impiegato con cautela, il sogno nel cassetto resta in fondo quello, riduzionista, di *spiegare la biologia con la fisica*: il vivente con il non vivente, il livello superiore con quello inferiore, la complessità con la semplicità. Sogno comprensibile, ma che denota un lutto non fatto – e quindi, in termini psicologici, la presenza di un *fantasma* [ABRAHAM & TOROK 1987].

Il fantasma, lo spettro che non si riesce a cacciar via, è quello della *semplicità*. La scienza classica, che prende la sua forma piena fra Galileo e Newton, nasce dal problema della caduta dei corpi; elegantemente risolto dal razionalismo classico, esso torna a farsi acuto con l'ipotesi copernicana: se a muoversi è la terra e non il sole, perché le mele cadono in verticale ai piedi dell'albero, anziché atterrare un po' più in là? Dal piano inclinato di Galileo al calcolo infinitesimale, la dinamica fisica rende possibile la descrizione del movimento in termini di *traiettorie*. È rilevante, per tutta la storia successiva, che il "pezzo di mondo" scelto dalla fisica nascente come suo oggetto di studio presenti caratteristiche particolari, che contribuiscono a fare della sua descrizione una sorta di mito fondativo, apice conoscitivo verso cui far tendere ogni altro approccio che voglia fondatamente dirsi scientifico.

Le traiettorie della dinamica classica sono *legali* (descritte da una legge generale espressa in termini matematici); *deterministiche* (quando alla legge che descrive il movimento in generale è aggiunta la conoscenza della posizione iniziale, tutto il movimento passato e futuro è determinato); e *reversibili* (rovesciando istantaneamente la velocità del movimento, il sistema "risale nel tempo"). In ogni momento, quindi, tutto è già dato, già espresso dall'incrocio fra la posizione iniziale e la traiettoria descritta dalla legge generale: il movimento coincide col dispiegarsi di una funzione matematica atemporale. Queste caratteristiche compongono la trama di un assunto ancor più fondamentale, quello secondo cui *il livello fondamentale di spiegazione della realtà è semplice e descrivibile in termini matematici*.

L'idea non era nuova: si tratta della declinazione fisica del cosiddetto «rasoio di Occam», o principio di massima parsimonia, uno fra i più resistenti postulati metodologici dell'intero impianto razionalistico occidentale. *Entia non sunt multiplicanda sine necessitate*: il numero degli elementi che intervengono in una questione non dev'essere aumentato se non ce n'è necessità. Esso impone che le spiegazioni economiche, che nel descrivere i fenomeni chiamano in causa pochi elementi, siano sempre da preferirsi a quelle complicate, che nella descrizione dello stesso fenomeno chiamano in causa un numero maggiore di elementi. È un esempio eccellente di *ragione estetica*: non esiste infatti alcun motivo logicamente vincolante per ipotizzare che una spiegazione più semplice sia necessariamente migliore di una più complessa, che la natura non faccia salti e che il numero delle cause ipotizzate debba essere quanto più basso possibile (spesso anzi, come recita una battuta celebre, esistono per problemi difficili delle brillanti soluzioni semplici – che però sono sbagliate).

La parabola della fisica del Novecento ha tuttavia rivelato che, contrariamente a quello che pensavamo, *il livello fondamentale del reale è tutt'altro che semplice*. E anzi, è talmente complicato che non disponiamo neanche delle categorie adatte alla sua descrizione. Al cuore stesso della scienza deterministica si è presentato l'indeterminato. Ma se è così, quali ragioni restano per credere che l'oggetto di studio della biologia – così più sottile, delicato, complesso e intricato di quello della fisica – possa essere spiegato facendo riferimento a un livello fondamentale avente carattere di semplicità? In condizioni lontane dall'equilibrio la materia manifesta comportamenti che non sono prevedibili a partire dalle condizioni di equilibrio: è la lezione della termodinamica. Quali ragioni ci sono, allora, per supporre che l'organico (ovvero, ciò che *per definizione* è lontano dall'equilibrio dei sistemi fisici) possa manifestare comportamenti prevedibili o riducibili alle interazioni fra elementi inorganici?

Qui sorge un'obiezione perfettamente circolare: e se fosse il nostro cervello, ovvero proprio la base bio-fisiologica della nostra comprensione, ad aver bisogno di semplificare? È un bell'esempio di *petizione di principio*, ovvero di ragionamento nel quale la proposizione che dev'essere dimostrata è già supposta nelle premesse. Se è il nostro cervello (ovvero il livello più fondamentale che dovrebbe spiegare interamente i livelli superiori) a essere riduzionista, allora l'opzione teorica riduzionista è vera perché... così dice il riduzionismo. Sillogistica a parte, ottimi esempi di pensiero della complessità si trovano proprio nelle scienze (è quanto ho cercato di mostrare nella prima puntata di questa serie), e altri ancora sono stati sviluppati in ambito non scientifico sia all'interno che all'esterno dell'Occidente.

A leggere fra le righe dei testi di biologia, peraltro, è ben chiaro che l'impianto deterministico non regge più: come vedremo oltre, tutte le più interessanti ricerche degli ultimi vent'anni puntano altrove. Nondimeno, riduzionismo e determinismo non escono di scena e, anzi, si fanno tanto più altisonanti quanto più il loro paradigma scricchiola. Perché, dunque, la biologia si presenta ancora come deterministica, quando neppure la fisica crede più al determinismo?

Rudimenti di sociologia della scienza

Ci sono diverse ragioni che spiegano questa situazione e che vale la pena analizzare: la complessità dell'impresa scientifica non merita scorciatoie e verrebbe tradita da ogni spiegazione troppo semplice o unilaterale.

Una prima ragione è di tipo, per così dire, socio-cognitivo. In un contesto generale in cui pochi sono in grado di ragionare secondo un'ottica non deterministica e tenendo conto della complessità (e in cui, per inciso, il ragionamento semplificato è socialmente premiato), non si vede perché i biologi, come categoria, dovrebbero fare eccezione.

E vi sono poi ragioni di più lungo corso, per le quali la ricerca biologica ha spesso trovato conveniente presentarsi come deterministica. Per cominciare, c'è l'antica questione del complesso di inferiorità delle scienze "altre" rispetto al paradigma forte, e fortemente deterministico, della fisica classica. Per lungo tempo è parso che ciò che aveva permesso la nascita della scienza fosse, appunto, l'impianto deterministico, e che pertanto esso dovesse anche essere il criterio stesso della scientificità. In base a ciò, si reputava che le diverse discipline sarebbero infine divenute scienze, in senso forte, solo quando avessero cominciato a muoversi all'interno di un quadro altrettanto determinista quanto quello della dinamica newtoniana. Se si pensa alla forza ideologica che la fisica acquisì lungo il XVII e XVIII secolo come paradigma stesso della *conoscenza vera*, il complesso d'inferiorità delle altre discipline non è difficile da comprendere, né il suo perdurare lungo i secoli seguenti. Ma, appunto, di ideologia si tratta: *il carattere definitorio della scienza, infatti, non è mai stato il determinismo*.

Cos'è, dunque, che caratterizza la scienza rispetto alle altre forme di conoscenza? Essa è davvero un modo particolare di entrare in relazione con gli enti del mondo, ma la sua particolarità non risiede, come troppo sbrigativamente si afferma, nell'impianto critico del suo sapere, dacché questo caratterizza

anche tutto il pensiero filosofico, e non è ignoto neppure in altre piste conoscitive. E neppure sta nel determinismo, che caratterizza solo alcuni modelli fisici dotati di specifiche proprietà. La singolarità della scienza deriva semmai *l'approccio sperimentale allo studio della natura*, ovvero dall'incontro fecondo fra tecnica e teoria, fra il modo di manipolare il mondo e il modo di conoscerlo.

Nella scienza si realizza, per la prima volta nella storia dell'Occidente, la convergenza della conoscenza teorica – propria, fino a quel momento, alla filosofia e in particolare al razionalismo aristotelico – e della sapienza pratica. Quest'incrocio avviene sotto il segno di un'obbligazione specifica, che da quel momento in poi starà alla base dell'impresa scientifica nella sua generalità: è la *riuscita sperimentale*, e solo la riuscita sperimentale, ciò che permette di discriminare fra le diverse ipotesi avanzate per la spiegazione di un fenomeno.

Rispetto al razionalismo aristotelico, che nella spiegazione dei fenomeni poteva ammettere diverse ipotesi, purché tutte altrettanto razionali, la scienza introduce un criterio *sui generis* di selezione delle ipotesi: quello che chiama in causa la natura come *responder* ultimo. Nella scienza non si tratta tanto di *rispettare* i fatti (di «salvare i fenomeni», dunque), quanto soprattutto di saperli costruire. L'impianto sperimentale è precisamente questo: l'arte di far dare delle risposte alla natura attraverso la costruzione di situazioni ideali. Nell'arte della sperimentazione, la scienza deve dunque fare ricorso alla *metis*, all'astuzia disdegnata dai greci [GINZBURG 1979]: bisogna infatti, a ogni passo, *macchinare* dei trucchi, apprestare dei congegni. Si sente, in ciò, l'eco della perizia che caratterizza le botteghe artigiane la passione del Seicento per le macchine, per i congegni meravigliosi dai movimenti complessi.

Scansiamo un equivoco: la sperimentazione che caratterizzerà nei secoli la scienza tutta non è la ricostruzione, quasi sempre impossibile, delle condizioni *iniziali* (un sistema orbitale, il big bang, Pangea o il primo individuo vivente), ma l'astuzia che *fa parlare* la natura attraverso condizioni *ideali*. La costruzione di un cannocchiale per l'osservazione dei pianeti, e poi di un telescopio che permetta una miglior osservazione delle supernovae, fanno quindi parte della sperimentale della scienza, così come ne fanno parte la valutazione accurata della biodiversità in un carotaggio di terriccio amazzonico o l'osservazione anatomo-morfologica nell'*assessment* filogenetico. Il criterio ultimo della conoscenza scientifica è che, fra ipotesi concorrenti, il discrimine è dato dai fatti naturali – e questi fatti devono essere strappati, con l'astuzia e la macchinazione, al silenzio della natura.

Questo, dunque, è il carattere proprio della scienza nascente. Anche il determinismo, beninteso, la segna nel profondo, ma *per caso*: esso è infatti scaturito dal tipo particolare di oggetti studiabili dai primi fisici coi loro dispositivi sperimentali – oggetti che, coi mezzi tecnici dell'epoca, potevano appunto essere analizzati secondo un modello deterministico. Col tempo, tuttavia, l'iniziale parallelismo fra i due elementi – approccio sperimentale e determinismo – si è trasformato in una saldatura surrettizia: l'approccio sperimentale è così parso coincidere col determinismo. Questa identificazione fallace è poi andata sedimentando nei secoli seguenti, causando una durevole confusione che ancora getta ombre lunghe perfino all'interno dell'epistemologia.

Da ultimo, il perdurare del paradigma deterministico in biologia ha una ragione che fa capo alla sociologia della scienza e della conoscenza: si tratta della possibilità, per i ricercatori, di stabilire alleanze con quella parte della società che decide sui finanziamenti alla ricerca. In un contesto di competizione in cui è vitale convincere i finanziatori della bontà della propria ricerca, i ragionamenti semplificati (analoghi a quelli che governano i messaggi pubblicitari) hanno più probabilità di avere successo rispetto a quelli complessi.

Qui incontriamo una segreta schizofrenia, di gravità comparabile a quella che, meno segretamente, affligge l'antropologia. *Al loro interno*, tutte le scienze e tutte le ricerche scientifiche sono imprese fragili e delicate, che hanno a che fare con l'ignoto, e in cui l'esito sperimentale ha il potere non solo di risolvere le questioni in un senso o in un altro, ma anche di far esitare gli scienziati, di farne vacillare le ipotesi e, spesso, anche le certezze [STENGERS 2006]. Il vincolo dell'impianto sperimentale impone che sia

la natura – e nient'altro che la natura – a decidere delle ricerche future e quindi anche del destino dei ricercatori (frustrandone, ad esempio, le ambizioni di gloria, oppure assegnandoli all'olimpico della loro disciplina). Non ci sono mediazioni possibili, né compromessi: falsificare i risultati sperimentali è, fra tutti, il crimine peggiore e gli artefatti sono vissuti, ovunque, come veri e propri spettri.

Al loro esterno, invece, le scienze sono spesso costrette a presentarsi in modo arrogante, come depositarie uniche di un sapere certo che, per forza di cose, riguarda tutti e che è sempre *sul punto di* risolvere importanti problemi. Non c'è quasi progetto di ricerca che non sia costretto a presentarsi sul mercato dei finanziamenti come avente ricadute potenzialmente utilissime, o finanche indispensabili, al futuro dell'umanità tutta: miglioramenti tecnici, cura per malattie, sviluppo di brevetti ecc. (Per inciso: in questa piega si gioca la questione della ricerca di base, ovvero della ricerca scientifica fine a se stessa – ed è una partita che, nell'ultima decina d'anni, è andata sistematicamente perduta.)

Mentre dunque all'interno dell'impresa conoscitiva scientifica abbiamo *le scienze* – pratiche fragili, delicate e rischiose, che rimettono il proprio successo al responso del mondo naturale – all'esterno abbiamo invece diverse ipostasi di un'unica *Scienza*, con la maiuscola, che nelle sue vesti pubbliche semplifica drasticamente le complessità e prende tutte le scorciatoie possibili al fine di mobilitare opinione pubblica e gruppi d'interesse [STENGERS 1994, LATOUR 1994]: una ricerca sul gene per la depressione avrà quindi ben più possibilità di essere finanziato rispetto a una ricerca sulle interazioni collaborative fra specie all'interno di un panorama ecologico complesso. È l'ambiente scientifico, intellettuale e politico, dunque, che rende oggi il paradigma determinista e il riduzionismo che lo permea vincenti rispetto a qualsiasi modello alternativo, che aspiri a tener conto non si dice dell'indeterminatezza, ma perfino di una banale multifattorialità.

Eppure, la biologia non è questo. Chi l'ha studiata o praticata con un minimo di passione sa quanto queste semplificazioni tradiscano ciò di più appassionante essa ha da offrire: il dispiegarsi, davanti agli occhi dello studente e del ricercatore, di una variabilità e di una complessità che eccedono ogni schematismo e rifiutano ogni riduzione. Darwin che, in giro per il Pacifico, raccoglieva insetti e disegnava becchi d'uccello era mosso dalla stessa meraviglia che muove qualsiasi naturalista in erba impegnato nell'osservazione del mondo vivente nell'aiuola sotto casa. In questi studi, la ricerca di *regolarità* serve come stella polare per non perdersi nell'abbacinante diversità del vivente, e ha ben poco a che fare con la grettezza dei "geni per" o con l'idea della vita come dispiegamento meccanico di un programma già scritto, che si replica senza posa nello spazio metaforico della specie.

Alla ricerca del non-determinato

L'ipotesi su cui queste pagine si basano è che, oltre alla biologia deterministica di cui abbiamo detto sopra, esista anche una *biologia non deterministica*: essa non è una disciplina differente, ma un altro modo di praticare le stesse ricerche, di indagare gli stessi oggetti e di leggere i medesimi dati. Non abbiamo dunque a che fare con due branche separate di un'unica disciplina in procinto di sdoppiarsi, né con sottoinsiemi diversi di problemi, ma con due modi diversi di poggiare gli occhi sopra uno stesso oggetto di studio. È durante la permanenza nell'avventura conoscitiva scientifica, nel corso della lavorazione dei problemi che vi si incontrano, nell'incontro con quel che vi emerge, che ciascuno sceglie la propria posizione, l'inflessione del proprio sguardo sulle cose.

A ciò si potrebbe obiettare che questa biologia non deterministica è un'opzione ideologica: niente, nei dati, lascia supporre che essa sia "più vera" della biologia deterministica. Ed è proprio vero! Ma bisogna andare fino in fondo: perché se i dati non sanciscono la "verità" dell'una, non sanciscono neppure la verità dell'altra. La biologia deterministica, al pari di quella non deterministica, è uno schema interpretativo generale, paradigmatico; e come tale non verificabile. Scegliere di guardare ai dati biologici secondo un paradigma non deterministico è dunque un'opzione ideologica esattamente quanto

lo è quella di guardarli secondo un'ottica deterministica. Nella scienza si operano continuamente, e sono continuamente attive, scelte di questo tipo. È tempo di cominciare a riconoscerle e a praticarle consapevolmente.

Poiché essa è oggi largamente minoritaria, e anzi residuale, mi permetterò qui di sostenere, con tutti gli argomenti a disposizione, le ragioni della biologia non deterministica.

La prima ragione – nonché quella che più dovrebbe dare da pensare – l'abbiamo già enunciata sopra: a valle della fisica novecentesca, non c'è più ragione di credere che i livelli fondamentali della realtà siano più semplici (più meccanici, più deterministici) di quelli superiori. E anzi, la loro complessità è tale che ancora oggi, dopo un secolo di meccanica quantistica, ancora non disponiamo dei mezzi intellettuali per comprenderne la reale portata [VEDRAL 2011].

In effetti è strano che, proprio quando la fisica si allontana dal meccanicismo, la biologia e la psicologia vi si avvicinano. Se questa tendenza continuerà, gli scienziati presto guarderanno agli esseri viventi e intelligenti come a macchine, e al contempo reputeranno che la materia inanimata è troppo complessa e sottile per essere interpretata con le categorie del meccanicismo. [BOHM 1969]

I lettori di mezz'età ricorderanno con quanti finanziamenti e con quale *battage* pubblicitario il Progetto Genoma Umano fu lanciato all'inizio degli anni Novanta. Si stimava, all'epoca, che al termine dell'impresa sarebbero stati decodificati fra i 300.000 e i 500.000 geni: un numero adeguato, così si pensava, a spiegare la complessità dell'organismo umano rispetto ad altre forme viventi. Dieci anni più tardi, alla sua conclusione, il progetto aveva sequenziato circa 24.000 geni – un numero analogo a quello che si trova nel genoma dei topi e dei vermi, e insufficiente a determinare tutte le caratteristiche dell'organismo umano secondo lo schema classico «un gene, un carattere». La cosa più straordinaria, tuttavia, è che questo numero di geni così più basso rispetto alle aspettative è stato vissuto, dalla comunità scientifica, come una sorta di *fiasco*, l'infrangersi di tutte le *great expectations* risposte nella conoscenza completa della sequenza di basi nucleotidiche. Di fatto, esso apre scenari assai più interessanti di quello, ormai vetusto, che lega geni e caratteri secondo un rapporto uno-a-uno.

È l'idea stessa di gene, probabilmente, che dovrà essere modificata, e con essa la metafora che fa del genoma un programma [HUBBARD & WALD 1997, NOBLE 2006]. Fisici e matematici, che hanno alle spalle un secolo e mezzo di riflessioni in merito, l'hanno già detto a chiare lettere: *descrivere il genoma come un programma è un equivoco*.

Un programma informatico, ci dicono, è una macchina di Laplace, in cui la predizione di ciò che accadrà dipende dallo svolgersi di regole fisse che stanno a monte; in cui la variazione dev'essere ridotta al minimo, e idealmente annullata; e in cui, almeno a livello teorico, è sempre possibile predire ciò che sta per accadere perché, appunto, esso dipende esclusivamente dal dispiegamento di una serie di norme. Perché un programma funzioni, l'errore e la variabilità devono minimi: ci si aspetta infatti che lo stesso programma, lanciato migliaia di volte sulla stessa macchina o su macchine differenti, si comporti sempre nella stessa maniera – e guai se non è così. Ne deriva che un programma informatico è tanto migliore quanto più l'iterazione si riproduce identica. (Lo stesso valeva, come abbiamo visto sopra, per i modelli della fisica classica, dove la causalità doveva essere deducibile da una legge universale che si riproduceva identica dappertutto.)

L'idea di *programmazione genetica* equipara il vivente alla macchina informatica, composta di un hardware fisico e di un software che "gira" sulla macchina e ne determina le risposte. Ma questo non è affatto il caso. Per cominciare, la correlazione fra osservazione empirica (mutazioni del fenotipo, teratogenesi ecc.) e "equazione" (il gene che ne sarebbe alla base) non dispone di nessun quadro in cui sia possibile dedurre, a partire dalla modificazione del gene, la modificazione del fenotipo. In secondo luogo, paragonare il genoma a un programma informatico significa smarrire la specificità del fenomeno biologico che, rispetto ai modelli della fisica classica, presenta una complessità irriducibile.

Il contesto di espressione dei genomi non è in effetti certamente un luogo passivo di iterazione all'identico, piuttosto si lascia descrivere come uno spazio attivo della co-costituzione ontogenetica, in cui *la variabilità è importante come la stabilità*, cosa che, per essere precisi, non ha il suo equivalente in informatica. Secondariamente, il metodo differenziale così com'è applicato in fisica, suppone, come abbiamo visto, deboli – anzi una assenza di – correlazioni (semmai finemente analizzate dai fisici) fra i parametri contestuali e le variabili di cui si studia il comportamento, in funzione di certi parametri giudicati a priori più pertinenti, ipotesi questa che non sembra lecito proporre nell'analisi dei contesti extragenomici o epigenetici dell'ontogenesi. L'aspetto dei sistemi biologici che costituisce infatti, secondo noi, la più grande sfida per le teorie fisiche correnti, consiste nell'esistenza di questo "campo" particolare, proprio della cellula vivente, in cui (quasi) tutto è correlato a (quasi) tutto e in cui gli effetti di "risonanza" appaiono infinitamente (e si utilizza questa parola in senso matematico) più complessi di qualunque altra dinamica fisica, anche non-lineare. [LONGO & TENDERO 2005]

Un paio di cose che sappiamo in più sui geni...

Mentre il modello riduzionista classico continua a essere insegnato (e vissuto) come qualcosa che va da sé, la ricerca biologica degli ultimi vent'anni ne ha mostrato il limite con una straordinaria infilata di scoperte. Sono tutte relativamente note, e senz'altro notissime ai lettori di questa rivista; ma ripercorse rapidamente nel loro insieme sembrano indicare una direzione.

Cominciamo col meccanismo dello *splicing*, o intreccio alternato. I geni iniziano con una sequenza particolare, detta *promoter*, e terminano con un'altra sequenza specifica, detta *terminator*; nel modello standard, "gene" è tutto quanto sta fra una sequenza promoter e una sequenza terminator. Tuttavia, negli eucarioti, le sequenze così racchiuse non si comportano affatto come un'unica e univoca catena di informazioni. Durante la trascrizione del DNA in RNA messaggero la sequenza non viene trascritta per intero ma, per così dire, "editata": l'RNA primario viene dapprima spezzettato; alcune sequenze vengono eliminate; e le sequenze che restano sono riassemblate per essere infine trascritte in RNA messaggero e quindi in proteine. Le sequenze eliminate sono dette *introni*, quelle replicate sono dette *esoni*: esse si alternano lungo il DNA originale secondo intervalli variabili e irregolari. Ma – punto fondamentale – *non sono sempre le stesse sequenze a essere eliminate o duplicate*: di volta in volta, il processo dello splicing produce sequenze differenti di RNA messaggero. Ciò che, in questa trascrizione, è un esone potrebbe essere nella prossima un introne – e viceversa. La vecchia equazione della genetica molecolare, «un gene, una proteina», andrà dunque rivista: la stessa porzione di DNA non codifica sempre per la stessa proteina.

Vi è poi stata la "rivalutazione" del *junk DNA*, ovvero di quel 90% del genoma che, sempre nelle specie eucariote, non codifica proteine (il nome stesso che gli fu affibbiato, *DNA spazzatura*, tradisce una *forma mentis* assai precisa: quella secondo cui se di qualcosa non si capisce lo scopo, allora quella cosa non ha scopo). Un articolo del 2007, frutto della collaborazione di 80 laboratori, riferisce dell'analisi condotta sull'1% del DNA umano non codificante: ne è emerso che, lungi dall'essere spazzatura, esso ha un fondamentale ruolo di supervisione e controllo [ENCODE 2007]. Nell'ambito della stessa ricerca si è anche scoperto che, oltre a trasmettere le "informazioni di costruzione" contenute nel DNA, l'RNA stesso ha importanti funzioni di supervisione, specie per quanto riguarda l'attivazione e la disattivazione dei geni a seconda del momento dello sviluppo dell'organismo o del tessuto in cui la cellula viene a trovarsi; fra queste funzioni, ci sarebbe anche quella che permette di "accendere" e "spegnere" singoli geni, sequenze di geni e addirittura interi cromosomi.

Infine c'è tutto il campo, ormai in larghissima espansione, della cosiddetta *epigenetica*, ovvero lo studio delle interazioni fra ambiente ed espressione genica – vedi, ad esempio, il caso della *metilazione*, il processo attraverso cui un gruppo metile viene agganciato alle citosine del DNA, con l'effetto di rendere silenti intere porzioni genomiche. Essa è uno dei normali processi di regolazione della cellula ma

determina anche, durante lo sviluppo ontogenetico, un insieme di cambiamenti nell'espressione genica che rispondono a variabili ambientali.

Ancora. Secondo una comune metafora i geni "governano" le cellule. Ci si può chiedere, allora, cosa ne regoli l'attività; quali elementi, a un dato momento, "chiedano" ai geni di iniziare la trascrizione. Ebbene, a regolare l'attività dei geni è la cellula stessa, che può fare aumentare o diminuire il tasso di trascrizione a seconda dei messaggi che riceve dalla matrice extracellulare, nella quale sono contenuti i messaggi delle cellule circostanti. Perché un gene si esprima (ovvero, codifichi fisicamente una proteina) è necessario che particolari porzioni di DNA, dette *geni regolatori*, si attivino attraverso l'interazione con particolari proteine, dette *fattori di trascrizione*. I geni regolatori non codificano alcuna proteina, ma innescano e controllano l'attività di codifica di altri geni, situati a volte in regioni assai lontane del genoma. L'attività dei geni regolatori, a sua volta, viene modificata dalla presenza di proteine che, legandosi e slegandosi ad esso, ne modificano non solo l'innescamento ma la stessa funzionalità. Gli enzimi regolatori dell'attività genetica sono attivi solo in alcune cellule, e iniziano la loro attività a seguito di particolari stimolazioni esterne (dovute, ad esempio, a sbalzi di temperatura, alla diversa concentrazione di metaboliti quali gli ormoni, allo stress organico ecc.). In definitiva, quindi, a decidere dell'attivazione dei geni è l'attività complessiva della cellula in relazione all'insieme delle altre cellule nel quale è ricompresa.

Per finire, una delle maggiori sorprese della genetica di fine Novecento è venuta, ancora una volta, dallo studio della *Drosophila*, che nel 1983 ha permesso di scoprire gli Homeobox e le famiglie di geni a essi correlati. Col termine Homeobox si indicano sequenze altamente conservate di DNA, lunghe solitamente 129 basi, che si trovano all'interno di geni coinvolti nella morfogenesi, detti appunto geni Homeobox. L'homeobox forma una proteina in grado di legare il DNA e, in tal modo, di "dire" alle cellule dei diversi segmenti embrionali quali strutture sviluppare. I geni Homeobox controllano una parte rilevante del differenziamento cellulare e una loro sottoclasse, quella dei geni Hox, regola lo sviluppo assiale degli organismi multicellulari (sono gli Hox a determinare, ad esempio, l'orientamento antero-posteriore e la segmentazione).

Ma il dato veramente sorprendente è un altro. Prima della loro scoperta, ci si aspettava che gli schemi e le sequenze di sviluppo di organismi tanto diversi fra loro come funghi, insetti, rettili, uccelli e mammiferi fossero radicalmente differenti; è emerso invece che, in tutte queste linee, si ritrovano i medesimi geni Homeobox e i medesimi geni Hox a controllare fasi analoghe del differenziamento cellulare e dello sviluppo architettonico: esiste quindi una sorta di "cassetta degli attrezzi" dello sviluppo ontogenetico, comune alla gran parte degli organismi e indipendente dalla distanza filogenetica fra specie. Inoltre, è emerso anche che le differenze morfologiche fra le diverse classi di animali non dipendono tanto dall'evoluzione e dalla modificazione dei geni codificanti, quanto da diversi pattern di attivazione dei geni regolatori, fra cui, appunto, quelli Homeobox.

Queste scoperte stanno alla base del recente sviluppo di un settore di studi biologici, chiamato Evo-Devo (dall'inglese Evolutionary Developmental Biology), che confronta i diversi processi di sviluppo nelle piante e negli animali sulla base dei pattern di attivazione del processo di sviluppo. Se era già noto che l'evoluzione procede creando nuovi geni a partire da geni già presenti, i modelli sviluppati nell'evo-devo mostrano come nuove strutture possano essere create a partire da un insieme già presente di geni alterandone la sequenza di attivazione [CARROLL 2000, CARROLL 2005].

... e un paio di cose che sappiamo in più sull'evoluzione.

Tutto ciò ci porta all'evoluzione del vivente. Così come la genetica, anche la biologia evolutiva continua apparentemente a muoversi entro lo schema riduzionista; e, ancora come la genetica,

anch'essa ha attraversato un lungo periodo di fermento, con linee di fuga potentemente non riduzioniste.

Non si può che cominciare dalla tensione mai sopita fra i sostenitori di una evoluzione lenta e graduale, che procederebbe accumulando piccole mutazioni adattive su tempi lunghi, e la possibilità di pattern evolutivi differenti. A partire dal classico articolo pubblicato nel 1972 da Niles Eldredge e Stephen J. Gould, la discussione sui concetti di micro- e macro-evoluzione non è mai cessata e ha prodotto risultati teorici pregevoli. Il punto di partenza di Eldredge e Gould consisteva nel dismettere le razionalizzazioni dei paleontologi e nel prendere sul serio l'alternanza, ben visibile nelle stratigrafie, di lunghi periodi di stasi, in cui le specie subiscono tutt'al più piccole mutazioni che perfezionano caratteristiche già presenti, e di rapidi periodi di evoluzione macroscopica, in cui avviene buona parte delle trasformazioni, delle speciazioni e della differenziazioni fra gruppi.

In gioco non è solo il *ritmo* del processo evolutivo, ma anche i suoi *modi*. Nel modello classico un solo meccanismo, quello dell'adattamento ambientale, è in grado di spiegare, da solo, l'intera variabilità presente sul pianeta. Nel modello puntuazionista, invece, c'è spazio per modi evolutivi differenti: mentre nei periodi di stasi la micro-evoluzione è ciò che permette a una specie già formata nelle sue linee generali di adattarsi ai mutamenti che sopravvengono, nei periodi di macro-evoluzione, quando le specie si differenziano rapidamente, la chiave del processo potrebbe non essere l'adattamento a un ambiente esterno, ma la coerenza interna degli organismi e delle specie, e lo sfruttamento innovativo di strutture emerse in base ai vincoli di coerenza [GOULD & LEWONTIN 1979]. Per questa ragione parte della biologia evolutiva ha ripreso il concetto di *Bauplan*, ovvero l'insieme delle proprietà che le specie facenti parti di un gruppo sistematico hanno in comune e che ne condizionano l'assetto generale e le linee di sviluppo. Il Bauplan non è la somma di tutti i caratteri che si trovano entro quell'insieme, ma la descrizione del piano generale lungo il quale quel gruppo si sviluppa. Esso non risponde ai criteri adattivi della selezione naturale, ma è un modo coerente (una "buona forma") in cui la vita può organizzarsi.

L'idea che l'evoluzione non sia riducibile a un unico meccanismo evolutivo ma sia, piuttosto, il divenire generale degli esseri organici, ciascuno avente una traiettoria unica e modalità specifiche, ha trovato conferma negli studi sulle primissime fasi della vita organica sul pianeta. Le ricerche del paleontologo Jan Schopf hanno permesso non solo di retrodatare fino a 3,5 miliardi di anni la comparsa della vita sulla terra, ma anche di provare che le modalità evolutive non sono state sempre le stesse [SCHOPF 1999]. Per cominciare, l'estrema variabilità che oggi caratterizza le diverse forme organiche non è sempre stata presente: la differenziazione è cominciata in modo brusco in tempi relativamente recenti, con la cosiddetta "esplosione cambriana" di circa 530 milioni di anni fa. Prima di quel momento, per un tempo di oltre tre miliardi di anni, la vita sul pianeta è stata composta dapprima da organismi monocellulari e, dopo circa un miliardo di anni, da forme multicellulari estremamente semplici. In questa prima, lunghissima fase evolutiva le "regole del gioco" sembrano essere state molto diverse da quelle che hanno governato la fase seguente. Fra i primi monocellulari la trasmissione genetica avveniva anche per via orizzontale, da una cellula all'altra, senza che fra le due vi fosse relazione di ascendenza-discendenza [WOESE 2004]. La sopravvivenza differenziale del più adatto era quindi un problema minore: per le cellule arcaiche, dotate di relativamente pochi geni, la prima evoluzione è stata sostanzialmente collaborativa.

In altre parole, le prime cellule, ciascuna delle quali aveva relativamente pochi geni, differivano le une dalle altre in molti modi. Attraverso lo scambio di geni, misero in comune diverse delle loro capacità con le altre. Infine, questa collezione di cellule eclettiche e mutevoli formò i tre domini della vita oggi noti. Questi diventarono riconoscibili in quanto tali perché molto (ma assolutamente non tutto) il trasferimento genico che oggi avviene, avviene *all'interno* dei domini stessi. [Doolittle 2000]

È possibile, peraltro, che per questa prima fase sia semplicemente erroneo parlare di specie e di individui: le regole evolutive erano differenti perché la topologia stessa della vita era differente rispetto a quella che siamo abituati a vedere e percepire attorno a noi. Pare inoltre che l'esplosione cambriana stessa sia stata resa possibile dall'emergere della riproduzione sessuata e quindi dall'incremento nella variabilità individuale che questa permette. L'evoluzione precambriana sembra dunque procedere per tentativi ed errori rispetto alla struttura cellulare genetica, piuttosto che per competizione fra individui per l'accesso alle risorse. Alcuni hanno pertanto suggerito che l'evoluzione per selezione naturale sia cominciata solo fra organismi già decisamente avanzati, in cui vi è chiara distinzione fra genotipo e fenotipo, e che non sia quindi l'unico principio evolutivo.

Un mondo molteplice

Per finire, accenniamo al recente rifiorire delle ricerche ecologiche ed etologiche che, anch'esse, stanno rivelando un panorama infinitamente più complesso rispetto a quello della sistematica e dell'ecologia classiche. L'estrema varietà degli ambienti possibili alla vita [ROSSI ET AL. 2003]; l'interrelazione di specie animali e vegetali in comunità e paesaggi ecologici coerenti [MORIN 1999, WU & HOBBS 2007]; l'aumento continuo del numero di specie note, che non solo non accenna a rallentare, ma fa aumentare la stima di quelle ancora ignote [CBD 2012]; l'esistenza, ormai ampiamente osservata, di comportamenti "non adattivi" [BAGEMIHLE 1999]; la presenza di forme culturali fra altre specie animali [SAVAGE-RUMBAUGH ET AL. 2001, BAKALAR 2005]: tutto questo spalanca davanti agli occhi del ricercatore un mondo multiplo e fiorente. In questo quadro, l'idea stessa di specie viene trasformata: le specie sono modi coerenti di esplorazione di uno spazio evolutivo che non è già dato, ma che si forma mano a mano che tali esplorazioni procedono.

Così come lo spazio newtoniano è stato superato da quello relativistico, si può cominciare a immaginare lo spazio evolutivo non già come un fondale indifferente, ma come qualcosa di variabile, che emerge insieme alle specie che vi prendono forma. "Organismo" e "ambiente" non si danno l'uno senza l'altro: essi sono, per così dire, il *recto* e il *verso* di uno stesso foglio. Von Uexküll ha dato di ciò una splendida descrizione, che ha fatto storia ben oltre i confini della zoologia a lui coeva, da cui risulta chiaro che l'ambiente non è, come nella vulgata evolutiva, uno spazio astratto uguale per tutti, un contenitore universale che agisce su tutti il medesimo insieme di costrizioni, ma l'emergere di un campo particolare di vincoli e possibilità accoppiato alla presa di forma di un vivente particolare [VON UEXKÜLL & KRISZAT 1934]. Le ricerche di punta nell'ecologia e nella zoologia confermano questi presupposti. I nuovi modelli cercano di pensare insieme organismo e ambiente come entità co-appartenenti: non è l'ambiente a selezionare il percorso evolutivo della specie, ma la capacità della coppia organismo-ambiente di continuare il processo di individuazione evolutiva. Diversi settori dell'ecologia indagano dunque la relazione di coappartenenza fra individui e le specie e gli ambienti a esse accoppiati, e fra l'insieme degli individui così ridefiniti e il paesaggio che emerge dalle loro relazioni e dall'insieme imprevedibile delle loro interazioni.

Gli elementi (biotici e abiotici) che co-esistono e co-evolvono all'interno di un sistema di flussi connessi formano un *paesaggio*, all'interno del quale individui e gruppi sono interrelati in modi molteplici (ibridazione, predazione, competizione, scambio, simbiosi ecc.). I paesaggi ecologici sganciano i singoli individui viventi, e i gruppi, dal monolitismo archetipico e genealogico della specie e del genoma: individui appartenenti a una medesima specie possono entrare in relazioni assai diverse, e quindi evolvere ontogeneticamente in modo differente, per via delle relazioni che intessono all'interno del paesaggio in cui si trovano. Non c'è dunque un unico destino genetico già scritto: l'ontogenesi dipende dal contesto, e la plasticità è ovunque altissima.

La *scala naturae* viene così, infine, a cadere. Ogni specie vivente ha fatto un percorso *sui generis*, lungo quanto quello di qualsiasi altra (dacché tutte risalgono al primo vivente comparso sul pianeta), e ciascuna dispone di un suo modo particolare di individuazione. Non ci sono gerarchie: ciascuna specie dev'essere studiata *iuxta propria principia* perché ciascuna rappresenta, insieme all'ambiente a essa accoppiato, una *buona forma sui generis*, una configurazione abbastanza stabile e abbastanza plastica da resistere nel tempo. Di converso, nessuna specie può essere presa come pietra di paragone del divenire evolutivo delle altre: nessuna infatti – e neppure la nostra – rappresenta un "vertice" evolutivo, per la semplice e buona ragione in natura non esistono vertici, ma solo piste di esplorazione.

Tutto ciò è in qualche modo confermato da uno dei dati più curiosi emersi dalla genetica comparata: la quantità di genoma è piuttosto costante presso tutte le specie viventi presenti sul pianeta, indipendentemente dalla maggiore o minore "complessità" che essi, ai nostri occhi, sembrerebbero avere. Se le balene o gli scimpanzé ci appaiono più complessi (e quindi più *nobili*) dei procarioti o dei rampicanti è perché da un lato condividiamo con loro un'analoga evoluzione vertebrata e mammifera, e dall'altro non siamo forse in grado di afferrare pienamente quali spazi e modi evolutivi, distanti dai nostri, la vita sulla terra abbia battuto e continui a percorrere, in un'intensità straordinaria di esplorazione. Ciascuna specie reca in sé la traccia e il riassunto della storia evolutiva che l'ha portata fino al presente; le fasi che ha attraversato; i paesaggi che ha abitato: tra esplorazione e stabilizzazione, novità e ripetizione. Il genoma può allora essere pensato come una sorta di memoria della specie, in cui «un carattere ereditario non è un elemento predeterminato, ma un problema da risolvere, una coppia di due elementi distinti e riuniti in relazione di disparazione. L'essere individuato conterrebbe così un certo numero di coppie di disparazione generatrici di problematiche» [SIMONDON 1964, p. 207].

L'impianto bio-genetico, insomma, resta aperto all'indeterminato: la *forma* (la configurazione attuale della specie, con le sue peculiarità, i suoi adattamenti, i suoi schematismi ecc.) è tanto rilevante quanto la *potenza* (la capacità di cambiare forma, di stabilire relazioni, di esplorare zone nuove, di adeguare l'ontogenesi al paesaggio, di inventare e trasmettere comportamenti e frammenti di cultura, di inventare nuove funzioni per vecchi organi, e via dicendo).

* * *

Pur nella rapidità con cui li abbiamo passati in rassegna, questi dati sembrano confermare quel che i fisici dicono da anni: la biologia è, per eccellenza, la scienza della complessità, della variabilità, dei processi aperti, del non determinismo, del divenire storico del processo vitale.

In questo quadro svilupperemo, nelle prossime puntate, un lungo ragionamento sulla specie umana, sull'*anthropos*: tentando di non cadere nella consueta schizofrenia antropologica fra natura e cultura, fra biologia e storia, fra riduzionismo determinista e racconto impressionistico.

(Ringrazio di cuore la redazione di «Naturalmente» per i commenti e le critiche a una prima versione di questo articolo; fermo restando che la responsabilità di quanto scritto è interamente mia, esse mi hanno costretto ad articolare meglio alcuni punti teorici cruciali.)

Bibliografia

- ABRAHAMS Nicholas & TOROK Maria, 1987. *L'écorce et le noyau*. Flammarion, Paris 1987.
- BAGEMIHLE Bruce, 1999. *Biological Exuberance: Animal Homosexuality and Natural Diversity* St. Martin's Press, 1999
- BAKALAR Nicholas, 2005. *Chimps Show Hallmark of Human Culture, Study Finds*. «National Geographic News», August 26, 2005
- BOHM David, 1969. *Some remarks on the notion of order*. In: Waddington C. H. (ed.), *Towards a theoretical biology*.

- Vol. 2. *Sketches*. Edinburgh Press, Edinburgh, p. 18-40.
- CBD - Convention on Biological Diversity, 2012. *What is the problem? The taxonomic impediment*. <http://www.cbd.int/gti/problem.shtml>, consultato il 24.02.2012.
- CARROLL Sean B., 2000. *Endless forms: the evolution of gene regulation and morphological diversity*. «Cell» 101: 577-80.
- CARROLL Sean B., 2005. *Infinite forme bellissime. La nuova scienza dell'Evo-Devo*. Codice Edizioni, Torino 2006
- DOOLITTLE Ford W., 2000. *Uprooting the Tree of Life*. «Scientific American» 282 (2), pp. 90-95.
- ELDREDGE Niles & GOULD Stephen J., 1972. *Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism*. In Schopf T.J.M. (ed), *Models in paleobiology*, San Francisco: Freeman, Cooper and Co., pp. 82-115.
- ENCODE Project Consortium, The, 2007. *Identification and analysis of functional elements in 1% of the human genome by the ENCODE pilot project*. «Nature» 447, pp. 799-816.
- GINZBURG Carlo, 1979. *Spie. Radici di un paradigma indiziario*. In: GARGANI Aldo (a cura di), 1979. *Crisi della ragione*. Einaudi, Torino 1979, pp. 57-106.
- GOULD Stephen J. & LEWONTIN Richard, 1979. *I pennacchi di San Marco e il paradigma di Pangloss. Critica del programma adattazionista*. Torino: Einaudi, 2001 (Piccola Biblioteca on line).
- HUBBARD R. & WALD E., 1997. *Exploding the gene myth*. Beacon Press, Boston 1997.
- LEWONTIN Richard, 1991. *Biologia come ideologia. La dottrina del DNA*. Torino: Bollati Boringhieri, 1993.
- LATOUR Bruno, 1991. *Non siamo mai stati moderni. Saggio di antropologia simmetrica*. Eleuthera, Milano 2009.
- LATOUR Bruno, 1994. *Nota su taluni oggetti capelluti*. «I Fogli di ORISS», n. 29-30 (2008), pp. 62-78.
- LONGO Giuseppe, TENDERO Pierre-Emmanuel, 2005. *L'alfabeto, la Macchina e il DNA L'incompletezza causale della teoria della programmazione in biologia molecolare*. «Naturalmente» anno 22 (2009), numero speciale *Oltre il DNA?*, pp. 9-75.
- MORIN Peter J., 1999. *Community Ecology*. Wiley-Blackwell Press
- NOBLE Denis, 2006. *La musica della vita. La biologia oltre la genetica*. Bollati Boringhieri, Torino 2009.
- PRIGOGINE Ilya & STENGERS Isabelle, 1979 e 1986. *La nouvelle alliance*. Gallimard, Paris 1979 e 1986.
- ROSSI Mosè, CIARAMELLA Maria, CANNIO Raffaele, PISANI Francesca M., MORACCI Marco & BARTOLUCCI Simonetta, 2003. *Extremophiles 2002*. «J. Bacteriol.» 185 (13), pp. 3683-3689.
- RUSHTON J. Philippe, JENSEN Arthur R., 2005. *Wanted: More race realism, less moralistic fallacy*. «Psychology, Public Policy, and Law» 11(2), pp. 328-336.
- SAVAGE-RUMBAUGH E.S., SHANKER S.G. & TAYLOR T.J., 2001. *Apes, Language, and the Human Mind*. Oxford.
- SCHOPF Jan W., 1999. *La culla della vita*. Milano: Adelphi, 2003.
- SIMONDON Gilbert, 1964 e 1989. *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*. Millon, Grenoble 2005.
- SINGLETON Michael, 2004. *Critique de l'ethnocentrisme. Du missionnaire anthropophage à l'anthropologue post-développementiste*. Paragon, Paris 2004.
- STENGERS Isabelle, 1994. *La Grande partizione*. «I Fogli di ORISS», n. 29-30 (2008), pp. 47-61.
- STENGERS Isabelle, 2006. *La vierge et le neutrino. Les scientifiques dans la tourmente*. Les Empêcheurs de penser en rond, Paris 2006.
- VEDRAL Vlatko, 2011. *Vivere in un mondo quantistico*. «Le Scienze» n. 516, pp. 36-41.
- VON UEXKÜLL Jacob & KRISZAT Georg, 1934. *Ambiente e comportamento*. Il Saggiatore, Milano, 1967.
- WOESE Carl R., 2004. *A New Biology for a New Century*. «Microbiology and Molecular Biology Reviews», 68 (2), pp. 173-186.
- WU J. & HOBBS R. (eds), 2007. *Key Topics in Landscape Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge 2007.

Parole chiave – fisica; biologia; determinismo; sociologia della scienza; programma; evo-devo; splicing; homeobox; evoluzione; ambiente.

Abstract – Nonostante le peripezie della fisica novecentesca, l'idea che il livello fondamentale della realtà sia semplice continua a permeare l'impresa scientifica e la mentalità generale, contribuendo al mantenersi del paradigma determinista tanto in biologia (con l'equiparazione del genoma a un programma e l'impianto adattazionista delle ricerche evolutive) quanto nel senso comune.

Funzionale alle logiche di mercato che regolano l'accesso ai finanziamenti, nonché a più generali scelte societarie, il paradigma determinista sembra tuttavia scricchiolare a fronte delle ricerche biologiche dell'ultimo quarto di secolo. Dal ridotto numero di geni nel genoma umano al meccanismo dello splicing, dai dispositivi epigenetici di regolazione genica ai geni homeobox, dall'«evoluzione dell'evoluzione» ai dati sulla variabilità dei viventi e degli ambienti, i dati emersi puntano in una direzione affatto diversa: quella, per così dire, di una *biologia non deterministica*.

Questo documento è pubblicato sotto licenza **Creative Commons Attribuzione-Non commerciale 2.5**; può pertanto essere liberamente riprodotto, distribuito, comunicato al pubblico e modificato; la paternità dell'opera dev'essere attribuita nei modi indicati; non può essere usata per fini commerciali. I dettagli legali della licenza sono consultabili alla pagina <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/it/deed.it>

