MARCELLO CINI
Dipartimento di Fisica
Università La Sapienza - Roma

CULTURA

Dall'universo delle legge naturali al mondo dei processi evolutivi*

ABSTRACT
Until the nineteenfifties the general aim of science was the search for universal natural laws. In the sixties a radical change took place: advanced scientific research in many traditional subjects started to investigate the evolution of complex systems and of unpredictable and unrepeatable processes. Three basic features characterize such systems: the existence of different organizational levels unreducible to simple elements of a single structure, the impossibility of referring their history to purely structural causes, the autoreferential character of their internal structure. An epistemological change in the idea of scientific knowledge took place. The consequences for the diffusion of a public awareness of science adequate to the role of science in our society are discussed.

1.1. È tuttora assai diffusa la convinzione che la scienza sia in grado di fornire l'unica rappresentazione oggettiva e razionale possibile, sempre più fedele e dettagliata, di un mondo esterno dotato di proprietà che sono conseguenza necessaria di leggi universali e immutabili della natura. Questa convinzione tuttavia non regge a un esame critico della sua dinamica di sviluppo.

La crescita della conoscenza scientifica appare infatti, non appena si osserva con attenzione la sua storia, non come il risultato, garantito dall'adozione di un metodo universale e dato una volta per tutte, dell'accumulazione graduale di nuovi fatti certi e di teorie sempre più adeguate e generali, ma come un processo nel corso del quale si confrontano modi contrastanti di guardare la realtà che implicano l'adozione di categorie concettuali differenti per descriverne e spiegarne aspetti e proprietà differenti, rimettendo spesso in discussione princìpi e fatti in precedenza dati per certi. Un processo che vede via via affermarsi uno dei punti di vista contrapposti e soccomberne altri, come risultato di scelte compiute dalle comunità scientifiche coinvolte, sulla base di una molteplicità di criteri che a loro volta possono mutare a seconda del contesto storico.

È accaduto ad esempio che assunzioni a priori sull'esistenza di leggi semplici e universali, sul loro carattere deterministico e di continuità, sulla riducibilità dei fenomeni complessi a proprietà di elementi semplici, sull'indipendenza delle proprietà di un sistema dal contesto, siano state sostituite da assunzioni radicalmente diverse, basate sulla discontinuità di alcuni processi o sull'aleatorietà di fattori essenziali di alcuni fenomeni o ancora sulla dipendenza ineliminabile dell'evoluzione di certi sistemi dalle circostanze esterne.

Lo scopo di questa mia relazione è di argomentare queste affermazioni, che a prima vista possono anche sembrare arbitrarie, alla luce di una schematica ricostruzione di alcuni momenti salienti della storia della scienza. In particolare farò riferimento a quella svolta, compendiata nel titolo, che ha segnato lo sviluppo di molte discipline di punta negli ultimi trent'anni, per trarne alcune implicazioni metodologiche ed epistemologiche che mi sembrano particolarmente importanti per lo sviluppo di una cultura scientifica adeguata alle esigenze e ai problemi del nostro tempo. Cominciamo dunque questa rapida ricostruzione partendo dalla nascita della scienza moderna.

1.2. La rivoluzione galileiana nasce da un modo di guardare il mondo radicalmente diverso da quello aristotelico. Quest'ultimo si fonda sul presupposto dell'unità del mondo terrestre in tutte le sue componenti viventi e inanimate, presupposto che giustifica l'adozione di spiegazioni teleologiche e di categorie qualitative e analogiche per comprendere la varietà, la mutevolezza e l'irregolarità delle sue infinite manifestazioni. Per Galileo invece, al disotto delle apparenze, l'universo è semplice, regolare, ripetibile così come si mostra in cielo, ed è perciò intelligibile a patto di imparare a "intender la lingua e conoscer i caratteri ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica e i suoi caratteri sono triangoli, cerchi e altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile intenderne umanamente parola". Questo atteggiamento nei confronti della natura porterà nei secoli successivi alla nascita delle scienze moderne come discipline settoriali, che non si pongono l'obiettivo di una conoscenza unitaria del mondo, ma si costituiscono attraverso

*Relazione su invito tenuta al XXXIII Congresso A.I.F.

la selezione di fenomeni caratterizzati da semplicità, regolarità, ripetibilità, reversibilità, ordine e necessità. Solo ciò che mostra queste caratteristiche viene selezionato ai fini della costruzione di una rappresentazione scientifica del mondo.

1.3. Per secoli l'ideale conoscitivo della scienza si è identificato con la possibilità di prevedere l'evoluzione futura di ogni fenomeno a partire dalla conoscenza della legge che lo regola. La traiettoria di un proiettile, la velocità di caduta di un corpo lasciato cadere da una certa altezza, il tempo necessario a percorrere una data orbita, sono state le prime grandezze calcolabili con precisione grande a piacere applicando le leggi della dinamica e della gravitazione universale formulate da Newton. Il successo empirico di questo metodo ha via via rafforzato la convinzione che l'infinita varietà dei fenomeni fisici, nonostante le loro apparenze così diverse, fosse riconducibile a una spiegazione in termini di leggi semplici e universali, tale da permettere di prevedere, mediante il calcolo, la successione degli eventi che si sarebbero susseguiti temporalmente all'interno di un sistema dato, a partire dalla conoscenza delle condizioni in cui esso si trovava nell'istante iniziale. Secondo questo ideale la rappresentazione dettagliata dei fenomeni complicati è inutile e fuorviante. Esso infatti si fonda sulla convinzione che qualunque fenomeno può essere sfrondato dalle accidentalità che non ne alterano sostanzialmente la natura e l'evoluzione, e sull'assunzione che gli effetti del caso, dell'imprevisto e delle circostanze esterne possano essere ridotti fino a diventare trascurabili.

1.4. Il successo della fisica di Newton e di Laplace rende questa disciplina un modello metodologico ed epistemologico per tutte le altre scienze più giovani, che alla fine del Settecento e all'inizio dell'Ottocento si sviluppano con l'obiettivo di trovare spiegazioni scientifiche per i processi che avevano dato origine alla conformazione della crosta terrestre e alle diverse forme della vita. Anche le ricerche sull'evoluzione furono perciò intese all'inizio come studio delle grandi leggi che determinerebbero l'intero corso della storia naturale. Il modello newtoniano domina dunque in tutte le discipline fino alla fine del secolo scorso e definisce implicitamente i mezzi e gli obiettivi della scienza. Anche le scienze sociali assumono più o meno esplicitamente questo modello (Marx).

2.1. I primi sintomi di una rottura con la tradizione newtoniana risalgono all'inizio dell'Ottocento con Sadi Carnot, che getta le basi di un modello di scienza diverso sia dal punto di vista metodologico che da quello epistemologico. Egli infatti affronta il problema della determinazione della massima potenza meccanica ottenibile idealmente in una macchina a vapore introducendo categorie tipicamente umane, come l'utilità o lo spreco. Questo modo diverso di guardare le cose ha due conseguenze. La prima è che il tipo di "legge" cercata è qualitativamente diverso da quello delle leggi di Newton, che sono prescrittive e deterministiche. In questo caso invece si tratta di scoprire i divieti che la natura pone all'utilizzazione delle sue forze e di determinare i vincoli che limitano le loro reciproche trasformazioni. La seconda è che il tipo di astrazione necessaria per l'identificazione di vincoli e divieti è sostanzialmente differente da quella che occorre fare per enunciare leggi universali. Per Carnot è importante ciò che per gli altri è concettualmente da scartare, perché egli vuole capire il mondo reale dove tutto è irreversibile e non quello ideale delle sfere celesti dove tutto si ripete identicamente.

Negli ultimi decenni dell'Ottocento la contrapposizione fra i sostenitori della priorità concettuale della termodinamica (la disciplina fondata da Carnot) e i fautori della necessità di ricondurre tutti i fenomeni fisici alla meccanica newtoniana divenne netta e radicale. Essa si risolse con la vittoria dei meccanicisti, che a loro volta, tuttavia, dovettero rinunciare, dopo la svolta introdotta da Planck nel 1900, a uno dei capisaldi della concezione newtoniana del mondo, quello della continuità dei fenomeni fisici. La sconfitta degli eredi di Carnot ebbe conseguenze di grande peso nello sviluppo della scienza di questo secolo. Basta pensare che uno sviluppo della termodinamica, ipoteticamente possibile in un contesto socio-economico e tecnico-produttivo in cui la conoscenza delle proprietà globali e degli aspetti sistemici della realtà naturale e sociale fosse stata di interesse prevalente, avrebbe permesso di affrontare oggi con strumenti concettuali assai più potenti, e soprattutto in presenza di una cultura diffusa più consapevole, i grandi problemi del controllo ambientale, della utilizzazione razionale delle risorse energetiche e naturali e della gestione degli ecosistemi.

2.2. Un secondo sintomo di crisi dell'edificio della meccanica newtoniana, che avrebbe dovuto far vacillare la cieca fiducia nella prevedibilità del moto di ogni corpo materiale che aveva caratterizzato fin dalla nascita la fisica moderna, è rappresentato dal risultato delle ricerche del grande matematico Henri Poincaré, che risalgono al 1889, sull'instabilità dinamica delle equazioni di Newton per sistemi non lineari. Nonostante il rigoroso determinismo di queste ultime, infatti, il comportamento delle loro soluzioni, anche nel semplice caso di tre corpi interagenti fra loro, diventa caotico, e quindi imprevedibile, per l'impossibilità, non soltanto pratica ma di principio, di definire le condizioni iniziali del sistema con infinita precisione. La struttura delle traiettorie mostra infatti una straordinaria complessità: l'ordine e il disordine, il regolare e l'irregolare, il prevedibile e l'imprevedibile si intrecciano indissolubilmente man mano

che si procede verso l'infinitamente piccolo. La scoperta dell'instabilità dinamica bandisce dunque per sempre dalla fisica la certezza nella capacità previsionale della legge matematica che regola il moto di ogni massa materiale.

A dire il vero nemmeno Poincaré, pur avendo analizzato a fondo il fenomeno nei suoi dettagli tecnici più sottili, giunse a queste conclusioni rivoluzionarie, tanto che essa fu ignorata dalla comunità dei fisici per più di settanta anni. Anche in questo caso, come vedremo, le cause del lungo oblìo vanno ricercate nel rapporto che connette il processo di crescita della conoscenza scientifica con le idee e le pratiche dominanti nel tessuto sociale, economico-produttivo e culturale circostante. Solo nel 1963 il meteorologo Edward Lorenz ritrovò il comportamento caotico dei sistemi non lineari analizzando l'evoluzione di un modello semplificato di atmosfera rivelatosi estremamente sensibile alla precisione con la quale venivano assegnate le condizioni iniziali. Questa volta nel giro di pochi anni questa riscoperta ha prodotto, a valanga, una trasformazione profonda in tutto il panorama delle scienze contemporanee. Lo studio della dinamica caotica sta vivendo oggi una crescita esplosiva, che investe un ampio spettro di discipline, dalla fisica alla chimica, dall'ingegneria alla medicina, dall'economia all'ecologia.

2.3. Si è visto che le ricerche sull'evoluzione della vita sulla Terra furono intese all'inizio, per analogia con il modello newtoniano, come studio delle leggi universali che reggerebbero l'intero corso della storia naturale. Per Lamarck la trasformazione delle specie vissute in passato in quelle attualmente esistenti è conseguenza dell'adattamento graduale delle caratteristiche somatiche delle specie al mutamento dell'ambiente, indirizzato da una generica tendenza spontanea allo sviluppo di esseri sempre più perfezionati nella struttura e nelle funzioni. Darwin invece trova una spiegazione del processo evolutivo facendo ricorso all'azione concomitante di due fattori: un meccanismo (sulla cui natura Darwin non si pronuncia) che dà origine alla variabilità dei caratteri somatici dei differenti individui di una medesima specie, e il processo di *selezione naturale* che individua la causa della formazione successiva di specie dotate di capacità crescenti di adattamento all'ambiente nella capacità degli individui portatori di caratteri vantaggiosi per la sopravvivenza, che si riproducono a un tasso più elevato di quelli più svantaggiati che muoiono precocemente, di trasmettere preferenzialmente questi caratteri ai loro discendenti. In questo modo si accumulano variazioni graduali nella popolazione di una medesima specie, che man mano caratterizzeranno varietà e sottospecie differenti fino a trasformarle in vere e proprie specie distinte.

Soltanto agli inizi del '900, con la riscoperta da parte di Hugo de Vries delle leggi di Mendel (1866), che dimostrano la discontinuità degli elementi (geni) portatori dei caratteri trasmessi alla progenie, l'origine della variabilità dei caratteri somatici individuali viene individuata nelle mutazioni casuali del materiale genetico. L'interesse della disciplina si sposta perciò su quest'ultimo livello, ritenuto capace di fornire spiegazioni più rigorose di quelle della teoria darwiniana del meccanismo di trasmissione ereditaria. Questo spostamento rivela forti analogie con quanto accade nello stesso periodo nella fisica, dove la perdita d'interesse per la termodinamica è il frutto di una scelta che privilegia la riduzione del livello macroscopico a quello microscopico, e che accomuna la termodinamica alla teoria darwiniana nelle accuse di scarso rigore e di insufficiente predittività. L'integrazione dei due livelli si compie a partire degli anni '40 con il neodarwinismo, caratterizzato, da un lato, dalla discontinuità e l'aleatorietà delle mutazioni a livello del materiale genetico dei singoli individui, e dall'altro dal determinismo gradualistico del processo evolutivo delle specie attraverso la selezione degli individui più adattati e della loro progenie. Negli ultimi due decenni si assiste, come vedremo, a un ulteriore cambiamento di prospettiva (Eldredge e Gould) che rifiuta il determinismo gradualistico del processo evolutivo per sostituirlo con un processo a salti formato da lunghi periodi di stasi nel panorama delle specie separati da rapidi mutamenti dovuti all'estinzione di specie vecchie e alla nascita di specie nuove.

3.1. Fino alla metà del secolo il panorama delle scienze è dominato dalla generale tendenza ad assumere come obiettivo della conoscenza scientifica quello della scoperta delle leggi universali della natura. Ma negli anni '60 questo panorama comincia a mutare radicalmente. La formulazione delle leggi non caratterizza più in modo esclusivo la ricerca nei settori di punta, che si concentra invece sullo studio degli aspetti che caratterizzano l'evoluzione di processi irregolari e irripetibili. Invece di cercare di unificare diversi fenomeni complessi e irregolari attraverso l'identificazione di alcuni elementi semplici e regolari comuni unificanti, il nuovo approccio sottolinea al contrario che sistemi strutturalmente identici possono manifestare comportamenti "selvaggiamente" diversi. Esso rinuncia, al fine di arrivare a una conoscenza più adeguata della realtà, alla priorità epistemologica delle categorie di ordine, semplicità, regolarità nei confronti delle categorie opposte di disordine, complessità, irregolarità quando risulta impossibile ricondurre queste ultime alle prime. In particolare esso rinuncia alla concezione *riduzionista*, fondata sull'assunzione che sia sempre possibile ricondurre la spiegazione delle proprietà di un sistema costituito da un gran numero di unità ele-

mentari alla conoscenza delle proprietà semplici di queste unità, per adottare un punto di vista globalista, che considera le proprietà di un sistema complesso come aspetti reciprocamente connessi di una unica totalità autoconsistente da comprendere nella sua globalità.

La riscoperta del caos deterministico, e la nascita di una intera comunità transdisciplinare dedita allo studio delle sue molteplici manifestazioni è uno dei segni di questo mutamento. Un'altra trasformazione di vasta portata, fondata sull'interesse per i sistemi complessi, investe in quegli anni molte discipline tradizionali.

Questo interesse nasce dall'esigenza di superare la contrapposizione fra due approcci diversi, che coesistevano ignorandosi fin dai primi decenni del secolo, allo studio degli organismi viventi: quello che attribuisce al processo evolutivo la causa delle loro proprietà privilegiando il livello macroscopico, e quello che ne attribuisce l'origine alla struttura microscopica del materiale genetico. La contrapposizione si supera individuando tre caratteristiche fondamentali che caratterizzano i sistemi biologici e li accomunano ad altri "sistemi complessi": l'esistenza di diversi livelli di organizzazione non riducibili a una struttura unica fatta di componenti elementari, l'irriducibilità della loro storia a fattori strutturali e il carattere autoreferenziale della loro struttura interna.

3.2. Le proprietà di ogni livello di organizzazione di un sistema complesso sono descritte mediante relazioni fra un piccolo numero di concetti semplici (grandezze variabili) che congiuntamente formano il linguaggio di ognuno di essi. Ciò che è pertinente a ogni livello è la sua organizzazione descritta nel linguaggio che gli è proprio. La irriducibilità dei livelli nasce dalla intraducibilità dei rispettivi linguaggi. La traduzione del linguaggio del livello superiore in quello del livello inferiore comporta infatti il raggruppamento di una molteplicità di configurazioni differenti di elementi di quest'ultimo in una unica categoria descrittiva dello stato del primo. Nei sistemi semplici questa traduzione è ancora possibile. Per esempio lo stato macroscopico di un gas è descritto da variabili come la pressione, la temperatura e il volume, ma ad ogni valore di queste variabili corrisponde un numero enorme di valori possibili delle variabili che descrivono lo stato microscopico di ogni singola molecola (posizione e velocità). Nonostante ciò le relazioni tra pressione, temperatura e volume che descrivono le proprietà macroscopiche di un gas possono essere ottenute da relazioni corrispondenti che legano i valori medi delle variabili di una molecola generica.

Quando è impossibile una spiegazione riduzionista del rapporto fra due livelli si supera la soglia della complessità. Questo accade per esempio se si considera il rapporto fra il livello dei concetti della biologia molecolare e quello sottostante della fisica e della chimica degli atomi. Il processo di assemblaggio delle proteine nei ribosomi cellulari, ad esempio, non può essere descritto in termini di una evoluzione dinamica dettagliata degli elettroni e degli atomi che ad esso partecipano. Non perché le leggi che la regolano non siano più valide al livello più elevato ma perché questa descrizione sarebbe diversa per ognuno dei venti aminoacidi che formano la catena proteica, e dunque non metterebbe in evidenza il meccanismo comune che regola l'assemblaggio, consistente nel riconoscimento da parte di ogni aminoacido del messaggio codificato all'estremità del corrispondente RNA messaggero (un meccanismo simile a quello di una chiave che apre una serratura). Questo meccanismo comune è invece descritto in modo appropriato soltanto con il linguaggio della biologia molecolare.

3.3. La seconda caratteristica fondamentale dei sistemi complessi, cioè la irriducibilità della storia a fattori strutturali, deriva dal ruolo fondamentale che gioca il caso, cioè l'intervento aleatorio di fattori esterni, nell'evoluzione dei processi che li coinvolgono. Abbiamo già visto che una componente essenziale del processo di evoluzione delle specie è costituita dalle mutazioni casuali che producono la variabilità del patrimonio genetico tra individuo e individuo della medesima specie. Il caso ha anche un ruolo in questo processo a livello di ecosistema terrestre. Basta pensare alle estinzioni di massa, dovute a eventi catastrofici di natura imprecisata, seguite da periodi di crescita esplosiva, che hanno marcato la fine di ere geologiche come quella del Cambriano (510 milioni di anni fa), del Permiano (240 milioni) e del Cretaceo (dinosauri, 65 milioni).

Ma il caso ha anche un ruolo fondamentale nel processo di creazione di complessità. I sistemi complessi sono anche sistemi altamente *ridondanti*. Questo vuol dire che al loro interno esistono molti elementi in grado di svolgere le medesime funzioni (p. es. DNA ripetitivo, degenerazione del codice genetico). Può accadere allora che l'intervento aleatorio dell'ambiente distrugga in parte la ridondanza iniziale senza compromettere le funzioni vitali dando origine a una differenziazione funzionale corrispondente a un aumento di complessità. Questo sembra accadere in particolare nel corso dello sviluppo del sistema nervoso successivo alla nascita, dove l'intervento esterno produce connessioni sempre più complesse, non codificate inizialmente nel DNA embrionale, fra i dieci miliardi di neuroni che lo compongono. Un discorso analogo sembra essere valido anche per lo sviluppo del sistema immunitario, e forse per le strutture cerebrali connesse con le funzioni mentali superiori.

3.4. Il concetto di autoreferenzialità svolge un ruolo centrale nell'affrontare il problema della complessità dei sistemi biologici. Esso è una generaliz-

zazione del meccanismo di *feedback* (retroazione) che permette a una macchina finalizzata al raggiungimento di un determinato obiettivo di autoregolarsi nel corso del proprio funzionamento correggendo gli scarti dal programma previsto in sede di progetto. Questo meccanismo consiste in un anello di causalità circolare che si instaura fra entrata e uscita facendo comandare il meccanismo di regolazione delle prestazioni della macchina dalla differenza fra segnale di entrata e segnale di uscita in modo da tendere ad annullarla. Questo anello è soltanto il più semplice degli anelli che connettono circolarmente elementi differenti di un sistema perché il nesso che connette l'entrata con l'uscita e quello inverso sono entrambi univoci e deterministici.

Un salto di qualità nella natura dell'anello ricorsivo si ha quando le componenti del sistema sono "non banali", cioè quando il segnale di entrata in uno di essi produce un segnale di uscita praticamente imprevedibile perché, ad esempio, dipende dal suo stato interno. In questo caso ogni componente fornisce alle altre un segnale dotato di significato, nel senso che contiene nuova informazione rispetto ai segnali che essa ha ricevuto dalle altre. Questo implica che soltanto quando si instaura una coerenza interna fra i segnali in entrata e in uscita di ogni componente, che permette di riprodurre a ogni iterazione successiva del segnale circolante la situazione precedente, il sistema viene a trovarsi in uno stato stabile. In questo caso il sistema è autoreferenziale. (Es. LA FRASE SEGUENTE HA X LETTERE; LA FRASE PRECEDENTE HA Y LETTERE; Soluzioni: X = 35, Y = 36; X = 39, Y = 34).

Strettamente connesso con il concetto di autoreferenzialità è anche quello di autorganizzazione. Anzi la prima è una condizione necessaria perché un sistema possa essere in grado di produrre la sua stessa organizzazione. È questa una caratteristica dei sistemi viventi che li differenzia (e li definisce) rispetto alle macchine, progettate per raggiungere uno scopo determinato a priori dall'esterno, che sono quindi organizzate dal progettista in funzione di quello scopo. L'organizzazione interna dei sistemi viventi è invece la premessa e simultaneamente il risultato dell'organizzazione stessa. Secondo questo punto di vista dunque la metafora corrente secondo la quale il DNA sarebbe come un "programma" di calcolatore fornito alle cellule che, seguendo le istruzioni in esso contenute, assemblano le proteine necessarie alla vita dell'organismo, non sarebbe corretta. Basta pensare che a differenza dei programmi di una macchina, il "programma" del DNA ha bisogno dei prodotti della propria lettura e della propria esecuzione per essere letto ed eseguito a sua volta, secondo un anello ricorsivo che è tipico di tutti i sistemi autorganizzatori. Del resto gli sviluppi delle conoscenze sulla struttura e il funzionamento del DNA hanno dimostrato l'infondatezza della convinzione che una catena lineare di causalità collegasse un gene a una singola proteina (enzima) e quest'ultima a un particolare carattere fenotipico. Diventa perciò necessario ammettere che nelle sequenze di DNA una parte considerevole è rappresentata da dati sui quali opera il meccanismo cellulare. In altre parole la parte dotata di significato delle istruzioni contenute nel DNA sarebbe piccola rispetto al totale. Questo fatto, se fosse vero, renderebbe inutile il colossale e dispendioso programma di sequenziare il genoma umano, del quale avremo occasione di parlare più avanti.

3.5. La concezione degli organismi viventi che discende dallo studio delle proprietà dei sistemi autorganizzatori, della quale Francisco Varela è un autorevole esponente, sottolinea uno stretto legame tra il processo di apprendimento di un organismo che gli permette di adattarsi alle mutevoli circostanze dell'ambiente nel quale deve sopravvivere e il processo di evoluzione delle specie che si adattano ai mutamenti ambientali nel corso delle ere geologiche. In entrambi i casi infatti il sistema autorganizzatore risponde agli stimoli del mondo esterno attraverso una trasformazione parziale della sua struttura interna al fine di salvaguardare l'integrità dell'organizzazione complessiva. Questa concezione, che chiameremo *connessionista,* secondo la quale l'organizzazione interna dell'organismo è indipendente dalla natura degli stimoli esterni ma è frutto soltanto del vincolo della coerenza complessiva fra le sue diverse parti, si contrappone tanto alla concezione dell'apprendimento che possiamo chiamare *rappresentazionista*, quanto a una concezione puramente *adattazionista* dell'evoluzione, in quanto in entrambi i casi queste ultime postulano una corrispondenza diretta fra la struttura del mondo esterno e una struttura interna che la rappresenta fedelmente.

Per quanto riguarda l'apprendimento la plasticità dei tessuti nervosi non corrisponde, secondo l'approccio connessionista, allo stoccaggio di una informazione che descrive dettagliatamente come è fatto il mondo, ma alla modificazione non localizzata, per effetto di perturbazioni esterne ripetute, dei parametri della rete di connessioni fra i neuroni che dà origine a nuovi comportamenti. Allo stesso modo, mentre la teoria adattazionista assume una corrispondenza fra mondo esterno e caratteri che dà origine a una linea di discendenza di organismi via via più adattati attraverso il meccanismo di ottimizzazione provveduto dalla selezione naturale, la teoria connessionista prevede invece che la successione di perturbazioni esterne seguite da riorganizzazioni intese a mantenere la coerenza interna della popolazione abbia per conseguenza la generazione della diversità. S.J. Gould ha fornito nei suoi libri molti esempi che mostrano come sia fuorviante il tentativo dei neodarwinisti più "ortodossi" di spiegare tutte le particolarità morfo-

logiche di un organismo postulando un particolare vantaggio adattativo per ognuna di esse, facendo invece vedere come spesso nuovi organi che si rivelano in grado di svolgere una nuova funzione derivino da una modificazione di organi preesistenti che avevano una diversa funzione (p. es. le ali degli uccelli e degli insetti).

Questo punto di vista sposta dunque il significato della "cognizione" da quello della formazione di una immagine del mondo a quello della costruzione di un mondo nel quale un organismo e il suo ambiente coemergono simultaneamente attraverso un processo di reciproca specificazione di entrambi.

3.6. Un sistema complesso dotato di eccezionali proprietà è il cervello, in particolare quello umano. La domanda fondamentale che si pongono gli scienziati che lo studiano è: cos'è l'intelligenza? La scuola di pensiero più largamente diffusa, nota con il nome di *cognitivismo*, risponde a questa domanda con una metafora: il cervello è un calcolatore. Secondo il cognitivismo ad ogni aspetto del mondo reale di interesse per l'individuo corrisponde un simbolo mentale, precisamente localizzato nel cervello. La "cognizione" può dunque essere definita come un calcolo operante su queste rappresentazioni simboliche, cioè come manipolazione di simboli sulla base di regole composte da operazioni elementari combinate tra loro in operazioni sempre più complicate. I ragionamenti della mente sarebbero dunque nient'altro che processi di trattamento dell'informazione contenuta nei simboli, attraverso programmi che "girano" nel cervello come il *software* in un calcolatore procedendo dall'alto verso il basso: un'operazione a livello elevato richiama un sottoprogramma di livello più basso, che a sua volta ne richiama altri fino ad arrivare al linguaggio macchina che prescrive le connessioni logiche fra i simboli elementari immagazzinati in memoria. Secondo questa concezione dunque il processo del pensiero è indipendente dalla struttura e dalle modalità di sviluppo del sistema nervoso, proprio come un *software* può girare su macchine diverse. In questo senso, sostiene H. Simon, si può dire che "gli argomenti a favore dell'esistenza di questo carattere comune (ai processi informazionali che utilizzano sistemi così lontani fra loro come il computer da un lato e il sistema nervoso umano dall'altro) sono già oggi decisivi."

Questo punto di vista viene combattuto da una minoranza di ricercatori che, pur lavorando in discipline diverse, esprimono un modo comune di guardare le cose ispirato alle proprietà dei sistemi autorganizzatori. Abbiamo già discusso il punto di vista connessionista di Varela e abbiamo visto come esso si contrapponga nettamente alle tesi rappresentazioniste ed adattazioniste, strettamente affini a quelle del cognitivismo. Presenteremo adesso brevemente le critiche che a queste ultime vengono rivolte rispettivamente da uno studioso di Intelligenza Artificiale, D. Hofstaedter, e da un neuroscienziato, G. Edelman.

Per Hofstaedter "il cervello non manipola i simboli: è soltanto il terreno dove i simboli evolvono e si rimandano la palla. Non c'è alcun manipolatore centrale né un programma centrale. C'è soltanto una gran folla di configurazioni di scariche neuronali, che fanno scattare l'attività di altri neuroni. I simboli non sono là "in basso" a livello delle scariche individuali; sono là "in alto" dove facciamo le nostre costruzioni verbali." Gli eventi elementari di scarica dei singoli neuroni non sono accessibili a livello dei processi cognitivi, e non possono dunque essere simboli di alcunché. Il significato di ogni simbolo non è dunque definito in partenza da un elemento del mondo esterno, ma emerge dai livelli sottostanti come categoria semantica che si riferisce a una molteplicità di oggetti. È lo stesso rapporto che abbiamo discusso fra i linguaggi dei livelli gerarchici di un sistema complesso.

L'obiettivo di G. Edelman è ambizioso: dimostrare che è possibile comprendere scientificamente i processi mentali sulla base della conoscenza della struttura e delle funzioni cerebrali. Egli critica il cognitivismo perché "la mente non può essere descritta nella sua 'purezza', cioè in assenza di una descrizione biologica dettagliata del cervello". L'analisi dell'evoluzione, dello sviluppo e della struttura del cervello rende infatti estremamente improbabile che esso funzioni come un calcolatore per diverse ragioni. In primo luogo perché l'*input* di un calcolatore contiene simboli non ambigui scelti all'interno di un insieme finito, mentre i segnali sensoriali che sono a disposizione del sistema nervoso sono di tipo analogico, e sono dunque ambigui e non riducibili a un insieme discreto e finito.

In secondo luogo perché un calcolatore possiede un numero finito di stati interni, mentre il numero di stati possibili del sistema nervoso umano sembra illimitato. Inoltre le transizioni fra gli stati di un calcolatore sono completamente deterministiche, mentre quelle degli esseri umani sembrano ampiamente indeterminate. Infine, la variabilità ambientale e quella delle procedure di categorizzazione degli uomini e degli animali sembrano incompatibili con la possibilità di riuscire a codificare il mondo sul nastro che immette i dati in un calcolatore.

L'ipotesi fondamentale della teoria dei processi mentali di Edelman è che il cervello sia un *sistema selettivo di riconoscimento.* Questo significa che esso funziona sulla base di un meccanismo evolutivo analogo a quello che porta all'evoluzione delle specie e alla evoluzione del sistema immunitario. In tutti i casi si ha l'evoluzione di una popolazione di organismi (che possono essere individui, linfociti o gruppi neuronali) attraverso due fasi distinte: la produzione casuale e indifferenziata di variazioni tra gli organismi e la successiva ripro-

duzione a un tasso più elevato di quelli che la selezione rivela essere i più adatti alle mutate condizioni ambientali.

Le ragioni che militano a favore di questa concezione del funzionamento cerebrale sono ricollegabili a osservazioni già in parte discusse. La prima è infatti che, se le critiche al cognitivismo sono corrette, il processo di apprendimento (adattamento all'ambiente) non può procedere attraverso un trasferimento di istruzioni *a priori* dall'ambiente al cervello, ma deve essere il risultato di un processo selettivo *a posteriori* La seconda consiste nel rilevare che la straordinaria diversità anatomica delle più minute ramificazioni della rete neuronale da un individuo all'altro è una conseguenza inevitabile del processo di sviluppo perché non può essere codificata a priori nel DNA. Questa diversità è proprio ciò di cui ha bisogno un sistema selettivo ma non può essere tollerata da una macchina. Un'ultima ragione è che in questo modo si supera una difficoltà concettuale che riguarda il funzionamento di qualunque sistema che debba seguire istruzioni esterne, e cioè la necessità di postulare l'esistenza al suo interno di un "interprete" dei segnali e dei simboli che le codificano. Al contrario i sistemi selettivi, nei quali l'adattamento avviene a posteriori su un repertorio diversificato già esistente di possibili risposte, non hanno bisogno di affrontare il problema dell'attribuzione di un significato ai messaggi provenienti dal mondo.

4.1. Il passaggio da una scienza dedita alla scoperta delle leggi semplici, universali e immutabili che costituirebbero la struttura nascosta di una realtà circostante solo apparentemente mutevole e imprevedibile, a una scienza che nella pratica sempre più sposta l'obiettivo delle proprie indagini verso lo studio dei molteplici processi evolutivi irripetibili che fanno di questa realtà una struttura irriducibilmente complessa, implica anche, come avevo anticipato all'inizio, un mutamento radicale nella nostra concezione della natura della scienza stessa. Il passaggio da una concezione parmenidea ad una eraclitea del mondo implica infatti anche il passaggio da una concezione della *conoscenza* del mondo fondata su un metodo universale e immutabile a una che fa dipendere i risultati della conoscenza dalle circostanze storiche.

Anche la crescita della conoscenza scientifica diventa dunque un processo evolutivo analogo a quello della evoluzione delle specie o a quello dell'apprendimento individuale, nel quale entrano come fattori essenziali il caso e l'ambiente esterno. Questo cambiamento di punto di vista introduce dunque una asimmetria essenziale fra passato e futuro: c'è sempre un solo passato, ma molti futuri possibili. E così come il passato non ha determinato necessariamente il presente, così il presente non determinerà necessariamente il futuro. In altri termini, così come è ormai accettato che l'evoluzione delle specie avrebbe potuto avere sbocchi completamente differenti da quello nel quale viviamo, dobbiamo accettare che avremmo potuto anche avere una scienza molto diversa da quella che abbiamo oggi.

È dunque profondamente errato pretendere di attribuire alle nuove conoscenze che la scienza produce il carattere di oggettività assoluta che le "leggi della natura" sembrano aver acquisito per il fatto di far parte ormai da decenni o da secoli, al pari di ogni altra eredità materiale e culturale del passato, del patrimonio complessivo dell'umanità. È infatti sbagliato dimenticare che anche il loro statuto attuale di verità universali è il frutto, tutto sommato contingente, di un giudizio complessivo formulato a suo tempo nel quale ha pesato, oltre che il riconoscimento della loro adeguatezza empirica, anche il consenso della comunità che le ha riconosciute come valide sul punto di vista da adottare nei confronti del rapporto fra uomo e natura.

Occorre dunque riconoscere che il mutamento in atto di questo punto di vista, consistente nello spostamento dell'obiettivo dell'indagine scientifica dalle leggi ai processi, implica anche la necessità di abbandonare la ingenua certezza nella garanzia automatica di verità delle conoscenze acquisite fornita da un metodo ritenuto universale e valido una volta per tutte, per affrontare il problema dell'identificazione dei fattori culturali, ambientali e sociali che contribuiscono a determinare il processo di crescita della conoscenza scientifica. È dunque a una rapida discussione della natura di questi fattori che voglio dedicare le osservazioni conclusive di questa relazione.

4.2. Se non esiste un metodo universale per raggiungere la verità, dobbiamo riconoscere che il massimo di "oggettività" e di "razionalità" raggiungibile è assicurato soltanto dall'intersoggettività del giudizio espresso dai depositari del patrimonio di conoscenze accettate di una data disciplina, relativamente alla validità di un nuovo contributo, che in genere è una proposta di mutamento delle regole sintattiche e semantiche del linguaggio disciplinare formalizzato usato per esprimere affermazioni scientifiche sul mondo fenomenico che è oggetto di studio. Diventa allora necessario distinguere il momento, tipicamente collettivo, della valutazione di questa proposta al fine di accettarla o di respingerla, dal momento tipicamente individuale della sua formulazione da parte di un singolo scienziato.

È fondamentale a questo punto riconoscere che a questa distinzione di momenti e di soggetti corrisponde anche una distinzione di linguaggi. La valutazione del nuovo contributo infatti non può far uso delle regole interne del linguaggio disciplinare accettato, ma deve far ricorso a un insieme di criteri esterni (metateorici) per esprimere giudizi sui vantaggi e gli svantaggi che il mutamento pro-

posto può produrre al fine di rendere il linguaggio stesso più adeguato alle aspettative della comunità. Questi criteri si riferiscono non soltanto alla sua completezza, validità, coerenza interna, veridicità, ma anche alla sua utilità pratica, alla sua coerenza rispetto alle tradizioni culturali, alla sua coerenza rispetto alle aspettative sociali, e così via. L'insieme di questi criteri costituisce dunque un altro linguaggio, informale, (programmatico o metateorico) diverso da quello disciplinare, mediante il quale la comunità decide in che modo si sviluppa il patrimonio conoscitivo della disciplina. Non occorre che io sottolinei a questo punto la stretta analogia fra questa analisi dei linguaggi dei diversi livelli del processo di crescita della conoscenza scientifica e quella, precedentemente discussa, delle modalità del corrispondente processo di apprendimento da parte di un organismo vivente.

4.3. Non è dunque soltanto, come comunemente si dice, il criterio della maggiore concordanza delle previsioni di una nuova teoria con un quadro empirico dato che viene usato per decidere della sua accettazione. Spesso essa viene valutata alla luce di molteplici altri aspetti. Fra questi si può citare il dovere di preservare per la propria disciplina un'immagine, fondata su obiettivi programmatici consolidati dalla tradizione, che verrebbe snaturata o compromessa da proposte così radicali da alterarne lo statuto epistemologico. Tipica a questo proposito, come abbiamo visto, è la distinzione tra "scienze delle leggi" e "scienze dei processi" (evolutive o storiche). Altri aspetti rilevanti possono riguardare la scelta fra un approccio riduzionista e uno globalista nell'investigazione delle proprietà di un oggetto; la decisione se un dato meccanismo esplicativo deve essere giudicato soddisfacente o meno; la decisione relativa all'esistenza o meno di un problema da risolvere, o al suo carattere di urgenza; il giudizio sulle caratteristiche formali di una teoria come la bellezza, la semplicità, l'eleganza e la coerenza interna. Inoltre non bisogna sottovalutare il peso delle aspettative sul piano delle potenziali applicazioni pratiche di determinate linee di ricerca che il tessuto sociale riversa sulle comunità scientifiche e delle occasioni di coinvolgimento in attività remunerative e gratificanti che esso offre loro. Infine va ricordato che il linguaggio informale programmatico traduce le idee, i valori e le aspettative diffuse in una data società, in requisiti che il processo di sviluppo di una data disciplina deve soddisfare per risultare in sintonia con lo "spirito del tempo". Le ideologie che permeano il tessuto sociale ne sono dunque componenti importanti.

4.4. Il mutamento nel modo di concepire la natura della conoscenza scientifica che abbiamo delineato può avere conseguenze importanti per la diffusione di una cultura scientifica adeguata al ruolo che la scienza ha assunto nella società contemporanea. Gli scienziati tendono infatti, nonostante il nuovo ruolo sociale che oggettivamente hanno assunto, a rivendicare, sulla base della tradizionale concezione della scienza come conoscenza puramente oggettiva e razionale depurata da ogni giudizio di valore, il diritto a godere, come per il passato, dell'autonomia assoluta derivante dall'assenza di ogni responsabilità sociale, e contemporaneamente ad essere investiti, in quanto unici esperti, dell'autorità di scegliere indirizzi, priorità e finalità della ricerca.

Accettare questa posizione porta dunque inevitabilmente a negare la possibilità per la gente comune di intervenire in alcun modo sulle scelte in materia di ricerca scientifica e tecnologica, anche se oggettivamente coinvolti nelle loro possibili conseguenze. Porta dunque anche il pubblico a dover scegliere tra due alternative ugualmente ingannevoli e dannose: o assumere un atteggiamento di cieca fiducia nella capacità della scienza di risolvere i problemi sociali man mano che essi si presentano, o considerarla corresponsabile di tutti i mali che affliggono l'umanità, cercando nelle pratiche che attingono alla sfera del sovrannaturale, del miracoloso o del magico un rimedio e un conforto.

Le cose cambiano tuttavia se si riconosce che con la crisi della concezione tradizionale della scienza entra in crisi anche la tradizionale deontologia professionale degli scienziati, che pretende da loro di nascondere sotto un atteggiamento neutrale e avalutativo scelte che possono implicare giudizi di valore sulla natura e i fini dell'uomo come individuo e come specie. Riconoscere che anche nella scienza, come nella vita, non esiste una sola verità, ma ne possono esistere tante quanti sono i sistemi di criteri contrapposti che stanno alla base delle diverse posizioni che si confrontano all'interno delle comunità disciplinari coinvolte, significa perciò gettare il seme di una cultura diffusa nella società che, rinunciando a delegare alla scienza la formulazione di risposte univoche e certe ai problemi che l'umanità si trova a dover affrontare per sopravvivere, richieda agli scienziati di formulare chiaramente le premesse di qualsiasi natura che stanno alla base delle diverse risposte possibili e i relativi scenari che ne possono derivare. È infatti su queste premesse, comprensibili a tutti perché formulate nel linguaggio informale che esprime i criteri di scelta adottati per decidere dove andrà la scienza del futuro, che può e deve accendersi un dibattito democratico esteso al di fuori della cerchia degli iniziati sugli indirizzi e sulle priorità di uno sviluppo scientifico e tecnologico adeguato alle aspettative, ai bisogni e, perché no?, anche ai timori delle popolazioni del pianeta. Non è una strada facile da percorrere, ma non c'è altra via per accollarci tutti quanti la parte di responsabilità che ci spetta nei confronti delle generazioni future.