

["Una guida preziosa a un tipo nuovo di lettura della divulgazione scientifica ... scienziati tutti di altissimo Livello". (Liberio Sosio, "Le Scienze")

"Un meraviglioso teatrino della scienza contemporanea". (Stefano Velotti, "l'Unità")

"Singolare miniera di idee". (Piero Bianucci, "La Stampa")

Nei secoli la vita intellettuale è stata caratterizzata dal fatto che solo una cerchia ristretta di persone ha avuto il privilegio di pensare per tutti gli altri. Quello a cui stiamo assistendo oggi è un passaggio epocale di consegne a un nuovo gruppo di pensatori: gli artefici della terza cultura, scienziati e storici della scienza che stanno plasmando la nostra visione del mondo e che hanno la capacità di trasmetterla a un vasto pubblico. Chi sono questi nuovi intellettuali? La lista comprende molti dei personaggi che John Brockman incontra in questo libro: i fisici Paul Davies, J. Dooyne Farmer, Murray Gell-Mann, Alan Guth, Roger Penrose, Martin Rees e Lee Smolin; i biologi evuzionisti Richard Dawkins, Niles Eldredge, Stephen Jay Gould, Steve Jones e George Williams; il filosofo Daniel C. Dennett; i biologi Brian Goodwin, Stuart Kaufman, Lynn Margulis e Francisco J. Vaiera; gli informatici W. Daniel Hillis, Christopher C. Langton, Marvin Minsky e Roger Schank; gli psicologi Nicholas Humphrey e Steven Pinker.

John Brockman è uno dei più noti agenti Letterali. Negli anni Sessanta ha collaborato con Robert Rauschenberg, Claes Oldenburg e Andy Warhol; nel 1981 ha fondato il Reality Club, che organizza periodicamente incontri tra artisti, scienziati, politici e uomini d'affari; è presidente della Edge Foundation (www.edge.com). È autore di diciannove libri, tra cui *By the Late John Brockman* (1969), *Einstein, Gertrude Stein, Wittgenstein & Frankenstein* (Garzanti 1988) e *Digerati* (Garzanti 1997). Vive tra New York e La Eastover Farm di Betlehem, nel Connecticut.]

Brockman John

LA TERZA CULTURA

LE NUOVE RIVOLUZIONI SCIENTIFICHE

GARZANTI 1999 - pp. 380

=====

Indice

Introduzione - La nascita della terza cultura

Parte prima - L'idea evuzionistica

1. George C. Williams - Un pacchetto di informazioni
2. Stephen Jay Gould - Il modello della storia della vita
3. Richard Dawkins - Una macchina per la sopravvivenza
4. Brian Goodwin - La biologia non è altro che una danza

5. Steve Jones - Perché esiste tanta diversità genetica?
6. Niles Eldredge - Una battaglia di parole
7. Lynn Margulis - Gaia è un osso duro

Parte seconda - La mente è un bricolage

8. Marvin Minsky - Macchine intelligenti
9. Roger Schank - Informazione uguale sorpresa
10. Daniel C. Dennett - Le pompe dell'intuizione
11. Nicholas Humphrey - Il momento denso
12. Francisco Varela - Il Sé emergente
13. Steven Pinker - Il linguaggio è un istinto umano
14. Roger Penrose - La coscienza è fatta di ingredienti non computabili

Parte terza - Il problema delle origini

15. Martin Rees - Un insieme di universi
16. Alan Guth - Un universo nel cortile
17. Lee Smolin - Una teoria generale dell'universo
18. Paul Davies - La via sintetica

Parte quarta - L'algoritmo di Darwin

19. Murray Gell-Mann - Plectics
20. Stuart Kauffman - L'ordine gratuito
21. Christopher G. Langton - Un modello dinamico
22. J. Doyne Farmer - La seconda legge dell'organizzazione

Parte quinta - Qualcosa che va al di là di noi stessi

23. W. Daniel Hillis - Vicini alla singolarità

Bibliografia
Ringraziamenti
Indice analitico

=====

Introduzione

La nascita della terza cultura

Per terza cultura intendo l'attività di quegli scienziati che sanno dire cose nuove e interessanti sul mondo e su noi stessi; che le sanno raccontare a un pubblico vasto, diffondendo la conoscenza oltre i confini angusti dell'accademia.

Negli ultimi anni la vita culturale americana è molto cambiata e l'intellettuale tradizionale - quello che per comodità potremmo chiamare il letterato - ha perduto molto del suo smalto. Una formazione basata su Freud e Marx non è più sufficiente negli anni Novanta. In un certo senso, gli intellettuali americani sono sempre più reazionari, spesso si vantano d'ignorare anche le più importanti conquiste culturali del nostro tempo. Non amano la scienza e in genere tutto ciò che è empirico e verificabile; usano un loro gergo e s'inventano dispute che solo loro sono in grado di apprezzare. Scrivono libri che hanno per oggetto altri libri e così via in una spirale di commenti senza fine, fino a che della realtà in carne e ossa non resta che una vaga traccia.

Nel 1959 Charles Percy Snow scrisse un libro intitolato *Le due culture e la rivoluzione scientifica*. Snow intendeva per prima cultura quella dei letterati e per seconda cultura quella degli scienziati. Secondo la sua ricostruzione, fu negli anni Trenta che i letterati, sfruttando un generale momento di distrazione, cominciarono a fregiarsi dell'etichetta di intellettuali, con ciò intendendo che non potevano essercene altri in circolazione. Questa nuova definizione escludeva dal novero degli intellettuali personaggi come l'astronomo Edwin Hubble, il matematico John von Neumann, il cibernetico Norbert Wiener e i fisici Albert Einstein, Niels Bohr e Werner Heisenberg.

Come ha potuto verificarsi una mistificazione di questo genere? La cosa può essere spiegata con un concorso di cause: innanzitutto gli uomini di scienza non hanno mai prestato molta attenzione alle implicazioni culturali del loro lavoro. Inoltre, mentre scienziati famosi come Arthur Eddington e James Jeans scrivevano libri divulgativi, filosofi e romanzieri continuavano bellamente a ignorarli, negando così implicitamente a queste teorie la patente di cultura. Gli stessi giornali trattavano assai raramente temi scientifici.

Nella seconda edizione di *Le due culture*, pubblicata nel 1963, Snow aggiunse un nuovo saggio, in cui auspicava la nascita di una terza cultura che avrebbe ricomposto la frattura fra letterati e scienziati. Nella terza cultura di Snow, gli umanisti avrebbero dovuto interloquire con gli sperimentatori. La profezia di Snow si è avverata solo in parte: in realtà i letterati non si sono mai messi a comunicare seriamente con gli scienziati e questi ultimi hanno preferito dialogare direttamente con il pubblico. Un tempo, gli inserti culturali dei giornali adottavano la tecnica dell'ascensore: i professori universitari distillavano l'essenza del loro sapere ai giornalisti, che a loro volta lo spiegavano ai lettori. Oggi invece i rappresentanti della terza cultura evitano di ricorrere ai divulgatori ed esprimono direttamente le loro idee in un modo accessibile al pubblico colto.

Il successo dei libri di divulgazione scientifica stupisce ormai solo il letterato. Secondo lui la passione per questi libri è un deplorabile fenomeno di costume; vendono bene ma in realtà nessuno li legge. Non sono d'accordo: la terza cultura si afferma perché il pubblico ha fame di idee nuove e importanti, che facciano luce sul mondo che lo circonda.

Il vivo interesse che accoglie le idee degli scienziati non si spiega solo con la loro capacità di comunicare; quella che tradizionalmente veniva chiamata "scienza", oggi è diventata "cultura pubblica". Dice bene Stewart Brand: "Oggi solo la scienza fa notizia. Sfogliando un giornale o una rivista, vi accorgete che la cronaca è la solita tiritera di "lui ha detto e allora lei ha replicato"; la politica e l'economia si sono ridotte a un'indigesta poltiglia di nefandezze; la moda è una fiera delle vanità e dei luoghi

comuni e la stessa tecnologia è diventata stucchevole e ripetitiva. La natura umana non muta un granché, la scienza sì: i suoi sconvolgimenti si susseguono con ritmo incalzante, cambiando il mondo in maniera irreversibile". Viviamo in tempi di rivoluzione permanente e alla scienza tocca in sorte di raccontare questo grande romanzo.

Gli argomenti scientifici che conquistano le prime pagine dei giornali riguardano la biologia molecolare, l'intelligenza artificiale, l'informatica, la teoria del caos, l'elaborazione parallela, le reti neurali, la teoria inflazionaria dell'universo, i frattali, i sistemi complessi adattativi, le superstringhe (o supercorde), la biodiversità, la nanotecnologia, il progetto genoma, i sistemi esperti, l'equilibrio punteggiato, gli automi cellulari, la logica sfumata (o *fuzzy*), la scienza della biosfera, l'ipotesi Gaia, la realtà virtuale, il cyberspazio e le macchine teraflop. E non li abbiamo citati tutti. Nella scienza non esiste una gerarchia consolidata di idee immutabili e tutto sommato la forza della terza cultura sta proprio nella sua capacità di tollerare il dissenso e la pluralità di punti di vista. A differenza di quanto accade nella cultura tradizionale, i risultati della scienza non riguardano le invidie di una casta di mandarini astiosi; le sue conquiste cambiano la vita di ciascuno di noi e del pianeta sul quale viviamo.

Fra le funzioni dell'intellettuale c'è quella di comunicare agli altri il suo pensiero, così da modellare il modo di ragionare della propria generazione. L'intellettuale dovrebbe avere il dono della sintesi e della divulgazione. Nel libro *The Last Intellectuals*, pubblicato nel 1987, lo storico della cultura Russell Jacoby lamentava il tramonto di una genia di "pensatori pubblici" e il contemporaneo affermarsi di una leva di accademici esangui. Aveva ragione fino a un certo punto: accanto ai nuovi mandarini si sono affermati infatti anche i nuovi "pensatori pubblici" della terza cultura.

Oggi l'America è il vivaio intellettuale da cui attingono europei e asiatici. Questa tendenza ha preso il via con l'emigrazione di Albert Einstein e altri scienziati europei, per raggiungere il suo acme con il diffondersi dell'educazione scientifica nell'era del dopo-Sputnik. Il prevalere della terza cultura ha inaugurato nuovi stili di razionalità e ha consolidato il primato intellettuale degli usa. Nei secoli, la vita intellettuale è stata caratterizzata dal fatto che solo una cerchia ristretta di persone ha avuto il privilegio di pensare per tutti gli altri. Quello a cui stiamo assistendo oggi è un passaggio epocale di consegne da un gruppo di pensatori, i cosiddetti letterati, a un nuovo gruppo: gli artefici della terza cultura.

Chi sono questi nuovi intellettuali? La lista comprende fra gli altri molti degli scienziati presenti in questo libro: i fisici Paul Davies, J. Doyne Farmer, Murray Gell-Mann, Alan Guth, Roger Penrose, Martin Rees e Lee Smolin; i biologi evuzionisti Richard Dawkins, Niles Eldredge, Stephen Jay Gould, Steve Jones e George Williams; il filosofo Daniel C. Dennett; i biologi Brian Goodwin, Stuart Kauffman, Lynn Margulis e Francisco J. Varela; gli informatici W. Daniel Hillis, Christopher G. Langton, Marvin Minsky e Roger Schank; gli psicologi Nicholas Humphrey e Steven Pinker.

Negli ultimi tre anni, ho avuto il piacere di conversare con ciascuno di loro, approfondendo la conoscenza di ciò che di importante ed essenziale avevano da dire. Il risultato di questi incontri non è né un'antologia, né una panoramica della scienza degli ultimi anni; è piuttosto una cronaca dell'emergere di nuovi sistemi di pensiero, o se si vuole una sorta di celebrazione delle idee più brillanti della terza cultura, quelle che credo lasceranno un'impronta nel futuro. L'opera è congegnata in modo da lasciare la parola ai protagonisti, cercando, nei limiti del possibile, di farli dialogare fra loro. In questo modo ho voluto restituire l'atmosfera, la vita stessa, di questa nuova comunità intellettuale.

Gli scienziati inclusi in questo libro sono ben lungi da esaurire la lista. Mancano

molti nomi importanti, fra cui sociologi, antropologi e scienziati del comportamento. Fra le personalità di spicco della terza cultura andrebbero annoverati anche i fisici John Barrow, Freeman Dyson, Erich Harth, Stephen Hawking, Michio Kaku, Lawrence Krauss, Leon Lederman, Kip Thorne, Frank Tipler, George Smoot e Steven Weinberg; gli astronomi Carl Sagan e Clifford Stoll; i biologi Francis Crick, Jared Diamond, Anne Fausto-Sterling, Steven Rose, Robert Shapiro, James Watson, Edward O. Wilson e Lewis Wolpert; gli etologi Marian Stamp Dawkins, Jane Goodall e Sue Savage-Rumbaugh; i chimici Peter Atkins e Peter Coveney; gli scienziati dell'atmosfera James Lovelock e Stephen H. Schneider; i neuroscienziati Colin Blakemore, William Calvin, Gerald Edelman, Michael Gazzaniga e Richard Restak; gli psicologi Howard Gardner e Richard L. Gregory; l'antropologa Mary Catherine Bateson; i paleoantropologi Donald Johanson, Richard Leakey ed Eric Trinkaus; i paleontologi Steven Stanley e Peter Ward; gli informatici Edward Feigenbaum, David Gelernter, Douglas Hofstadter, Hans Moravec e Seymour Papert; i biologi evuzionisti John Maynard Smith e Matt Riddley; la filosofa Helena Cronin; i matematici John Casti, Philip Davis, Reuben Hirsch, Jerry P. King, Benoit Mandelbrot, John Allen Paulos e Jan Stewart; lo zoologo Colin Tudge.

Alcuni degli scienziati presenti in questo libro sono clienti della mia agenzia letteraria, che in realtà ne annovera molti altri. Scegliere chi interpellare è stato un compito imbarazzante, che ho assolto facendomi guidare da interessi scientifici personali, così come dalla disponibilità dei miei clienti. Le idee che presento in questo libro sono di un genere che si potrebbe definire speculativo; esse rappresentano le conoscenze di frontiera nei campi della biologia evuzionistica, della genetica, dell'informatica, della neurofisiologia, della psicologia e della fisica. Queste discipline cercano di rispondere a domande basilari del tipo: Da dove viene l'Universo? Qual è l'origine della vita? Come nasce la mente? La terza cultura si configura pertanto come l'abbozzo di una nuova filosofia naturale, incardinata sui concetti di complessità ed evoluzione. Sistemi altamente complessi - come gli organismi, il cervello, la biosfera o l'universo stesso - non rispondono al piano di una mente superiore; sono piuttosto il frutto di una lunga evoluzione. Se abbiamo a disposizione un armamentario di nuove metafore per descrivere noi stessi, la mente, l'universo e tutte le cose che vivono in esso, lo dobbiamo a loro: a questa generazione di uomini che ha saputo forgiare nuovi concetti e immagini.

Mi sono preso la libertà di distillare ore e ore di registrazioni in una narrazione concisa e non sempre fedele alla lettera degli intervistati. Così, sebbene buona parte di loro abbia riveduto e corretto il testo, esso non pretende di essere un Bignami dei loro scritti. Per conoscere intimamente le loro teorie è sicuramente meglio leggere i libri dei singoli autori. Ho pensato inoltre che i lettori fossero più interessati a sapere cosa pensano, ad esempio, Richard Dawkins e Martin Rees della selezione naturale e della cosmologia, rispetto a ciò che ne penso io. Pertanto le mie domande e le mie opinioni non fanno parte del testo. Infine, le osservazioni e gli appunti che gli scienziati muovono ai loro colleghi sono di indole generale e non nascono dalla lettura del mio testo.

stephen jay gould La terza cultura è un'idea molto potente. C'è una sorta di cospirazione fra i letterati, che credono di occupare l'intera scena culturale, quando in realtà vi sono ormai parecchi saggisti, soprattutto di materie scientifiche, le cui idee attirano un pubblico sempre più vasto e competente. Molti di loro sono anche discreti scrittori.

Secondo il premio Nobel britannico Peter Medawar, scienziato con una notevole cultura umanistica, non è giusto che i letterati disprezzino gli scienziati che non hanno una conoscenza approfondita dell'arte e della musica, mentre loro stessi non ritengono importante conoscere la scienza per essere considerati colti. Chissà perché per avere la

patente di persona educata bisogna conoscere la musica e la letteratura, ma non la scienza.

Questa concezione, oltre a essere sbagliata, non riflette nemmeno la realtà. È probabile che, fra i 280 milioni di americani, quelli che capiscono di scienza siano una ristretta minoranza; ma fra coloro che leggono libri - pochi se rapportati alla popolazione totale ma molti come numero assoluto - l'interesse per i temi scientifici è molto forte.

murray gell-mann Un tempo gli scienziati scrivevano libri per un pubblico molto interessato e competente, composto da chi amava la scienza e la capiva, almeno nei suoi lineamenti generali. Vi fu però un periodo in cui questa attività divulgativa si esaurì, almeno negli Stati Uniti. La nicchia fu occupata dai cosiddetti divulgatori scientifici, quasi sempre giornalisti. Talvolta facevano un buon lavoro, ma più spesso erano sciatti e imprecisi; per ignoranza della materia, per la necessità di rendere a tutti i costi l'argomento una novità giornalistica, oppure perché, sottovalutando i loro lettori, scrivevano banalità. Ora invece assistiamo a una tendenza molto positiva, in cui scienziati seri hanno ripreso a raccontare quello che fanno, rivolgendosi direttamente al pubblico o facendosi aiutare da un giornalista. Alcuni scienziati si sono particolarmente distinti nello scrivere di temi generali, altri hanno dimostrato di avere una cultura più ampia dei loro colleghi. Ma in generale, fra gli scienziati che hanno condotto ricerche interessanti, ce n'è un buon numero che riesce a comunicare direttamente con il pubblico, senza bisogno di intermediari.

Purtroppo molti artisti e studiosi di scienze umane - spesso anche di scienze sociali - si fanno un vanto di ignorare la scienza e la tecnologia, soprattutto la matematica. È molto raro invece che accada il contrario. Potete trovare molti scienziati che non sanno niente di Shakespeare, ma è impossibile trovarne uno che ne vada fiero.

daniel c. dennett La ragione del recente successo dei libri di scienza è dovuto al carattere interdisciplinare di questa nuova cultura. Sono professori che scrivono a colleghi di altre discipline. In questo modo sono costretti a usare un linguaggio piano evitando i gerghi specialistici. Se dovessi scrivere un libro solo per filosofi - è il mio campo - lo scriverei così, e per le stesse ragioni. Il problema del gergo c'è in ogni disciplina, ma in filosofia è particolarmente grave. Molte difficoltà concettuali o pseudoproblemi che nascono in filosofia sono originati dal fatto che un esperto sta parlando a un altro esperto. Il peccato peggiore che un esperto può commettere quando parla a un collega è di dilungarsi nelle spiegazioni; non ce n'è bisogno, anzi è insultante. Allora si commette spesso l'errore opposto, quello di spiegare troppo poco, con il risultato che non si chiarisce sufficientemente il punto di partenza della discussione. Non condividendo le stesse premesse, ognuno va per la sua strada e il conflitto fra le due posizioni continua ad approfondirsi e a complicarsi. A un certo punto non ci si rende più conto che tutto è nato da alcuni piccoli fraintendimenti iniziali.

C'è una grande differenza fra la tradizione universitaria anglofona e quella europea. In Europa i professori professoreggiano: se ne stanno in cattedra ad ammannire il verbo agli allievi, che prendono appunti e si guardano bene dal fare domande. I cattedratici sanno bene quanto fascino possa esercitare l'oscurità su menti ancora immature e se ne servono per costruirsi una solida reputazione. Ciò non può succedere nelle università inglesi e statunitensi. Non so quanto questo diverso atteggiamento abbia a che fare con la scienza; sta di fatto che quando si avventurano nella filosofia e in altri argomenti non di loro stretta pertinenza, gli scienziati continentali cadono spesso nello stesso vizio dei loro colleghi umanisti. I due biologi

francesi Jacques Monod e Francois Jacob sono un esempio di questa tendenza: come succede spesso anche ai loro colleghi inglesi e americani, aspiravano a essere filosofi, ma finivano per esserlo all'europea, cioè sprofondando in acque scure e profonde in cui non erano poi in grado di nuotare.

Richard dawkins Qualche tempo fa ho letto un articolo, scritto da un critico letterario, che si intitolava *Che cos'è la teoria?* Ci credereste? La parola "teoria" non aveva altro significato che "teoria nella critica letteraria". Si badi che l'articolo non è apparso su una rivista letteraria, ma in uno dei tanti inserti domenicali dei quotidiani. L'articolista parlava in lungo e in largo della "teoria" assumendo implicitamente che il suo significato si esaurisse nell'ambito della sua disciplina; come se la cosa non avesse niente a che fare con Einstein o Darwin.

Sono contento che scienziati ed eruditi in genere scrivano libri per comunicare fra loro e per far conoscere le loro idee ai non addetti ai lavori. Anche i miei libri sono stati in parte volgarizzazioni di teorie già note ai miei colleghi e in parte contributi originali rivolti a specialisti. In entrambi i casi, comunque, mi sono ben guardato da usare un gergo incomprensibile: il mio intento è che qualsiasi persona intelligente possa capire ciò che scrivo e vorrei che tutti adottassero questa abitudine.

Peter Medawar ha detto che ci sono settori della scienza oggettivamente complicati, dove se si vuole comunicare bisogna lottare col linguaggio per renderlo comprensibile; ci sono poi discipline molto semplici, per le quali siamo tentati di usare un linguaggio difficile per impressionare i lettori. Sempre secondo Medawar, alcuni soffrono di "invidia della fisica". Effettivamente la fisica è molto difficile e volgere i suoi concetti in qualcosa di comprensibile richiede un gran lavoro; ma c'è anche chi si è specializzato nel trasformare argomenti inconsistenti in concetti profondi adottando un linguaggio gratuitamente complicato, spesso francamente incomprensibile.

steve jones Il modo migliore per mettere alla prova l'idea della "terza cultura" sta nel porsi la domanda: "È mai esistita più di una cultura?". Questo è il problema. Il sapere è divisibile o è un tutt'uno? Dal 1550 al 1950 si poteva rispondere che la cultura era una cosa sola, sebbene dopo Milton nessuno potesse vantarsi di conoscere tutto. Lanciando lo slogan delle due culture, non credo che Snow abbia sovvertito quattro secoli di storia della civiltà, anche se sicuramente ha punzecchiato l'ego di alcuni mediocri letterati suoi contemporanei.

La vera questione da porsi - ora come ai tempi di Snow - è se c'è un insieme di conoscenze che ogni persona colta dovrebbe possedere. Io credo di sì. E oggi chi non è in grado di parlare almeno in termini generali di argomenti scientifici e umanistici non può dirsi uomo di cultura.

paul davies La vita dell'intelligenza inglese è dominata da due università: Oxford e Cambridge. Buona parte dei politici e dei membri dell'establishment - alti funzionari, giornalisti ed editori - si sono laureati a Oxford. Per questo motivo il pubblico tende a vedere l'intellettuale come un signore ingrigo con gli occhiali, che studia la mitologia greca, beve sherry e discende con la sua barchetta il fiume che si snoda nei possedimenti di un antico college. Da questo stereotipo discende l'opinione che solo coloro che sono dediti all'arte e alla letteratura hanno il monopolio sui grandi temi dell'esistenza.

Solo negli ultimi anni gli scienziati hanno cominciato a far valere il loro punto di vista sulle cosiddette grandi questioni, e questa influenza ha provocato reazioni sgradevoli. Il fatto che gli scienziati abbiano cominciato a essere ascoltati dal pubblico,

conquistandone l'interesse, come dimostra lo straordinario successo di tanti libri di scienza, ha dato luogo a una reazione corporativa da parte dei letterati. La controffensiva ha preso la forma di una predicazione isterica su quotidiani e periodici, e a un profluvio di libri che denunciano le frodi e l'arroganza degli scienziati.

Sono molto pochi gli intellettuali inglesi che cercano di capire la scienza; quando poi gli argomenti sono del tenore di quelli presenti nel libro di Stephen Hawking, *Dal big bang ai buchi neri*, si sentono fuori dalle loro acque territoriali. L'acredine che mostrano in questi casi può essere spiegata solo con il senso di sconforto che provano per la loro ignoranza. "Pur essendo colto, non riesco a capire niente di queste cose", argomentano. "Quindi non possono essere altro che assurdità". Alcuni anni fa, quando fu annunciata la scoperta di increspature nella radiazione fossile, l'influente giornalista Bernard Levin definì "non meritevoli di commento" gli studi cosmologici. Secondo lui, la teoria del big bang non aveva lo straccio di una prova. Brian Appleyard è un altro giornalista che si diverte a parlar male degli scienziati. Nella prefazione del suo bestseller *Understanding the Present* (Capire il presente), disse che aveva deciso di scriverlo dopo aver intervistato Hawking. Era addirittura sconvolto dall'arroganza di quegli scienziati che si permettevano di trattare argomenti quali Dio, l'esistenza e l'umanità. Ho l'impressione che davanti a queste importanti scoperte scientifiche, che cambiano il nostro modo di vedere il mondo, scatti un meccanismo di difesa territoriale. Per molto tempo gli scienziati hanno lavorato nell'ombra; ora che sono usciti allo scoperto, vengono presi di mira da questa mafia intellettuale.

nicholas humphrey Gli intellettuali inglesi vivono nel terrore di perdere il monopolio della cultura. Hanno frequentato le scuole giuste, hanno studiato i classici e la letteratura inglese, e si sono abituati a pensare agli scienziati come a gente di second'ordine. Cosa poteva interessare di ciò che avveniva nei laboratori di chimica o di biologia a chi frequentava Platone, Aristotele e Giulio Cesare? Adesso costoro hanno paura: non capendo niente di scienza, la loro unica difesa è sostenere che non ha importanza. Ma la loro è una battaglia persa in partenza. Il pubblico ha fatto la propria scelta, basta vedere che programmi ascolta, cosa guarda in televisione e quali libri legge.

w. daniel hillis I rappresentanti della cosiddetta terza cultura hanno interessi più vasti rispetto agli scienziati tradizionali; spesso le loro teorie non possono essere costrette entro i confini di una singola disciplina. Molti scienziati scrivono libri divulgativi perché sanno che le loro idee non hanno possibilità d'essere pubblicate sulle riviste scientifiche. Non è un fenomeno nuovo; secoli fa accadeva lo stesso agli scienziati dell'epoca, i filosofi naturali.

Di nuovo c'è invece che il pubblico guarda alla scienza come a qualcosa di fondamentale, che sta cambiando la sua vita più in fretta di quanto vorrebbe. Gli scienziati sono stati lasciati a lungo a loro stessi; la società assegnava loro il compito di fare scienza e di sbrogliare quel genere di cose che agli altri parevano astruse e prive d'interesse. Ora ci si accorge che la vita è cambiata completamente negli ultimi anni proprio grazie a quelle cose incomprensibili.

Stiamo entrando in una nuova epoca. Nessuno riesce più a immaginare come cambierà il mondo durante la propria vita, e ancora meno come sarà il mondo dei suoi figli; le cose mutano troppo in fretta, come mai era successo in precedenza. Ed è evidente che il ritmo di questi cambiamenti è dettato dallo sviluppo scientifico. Dunque, chi non ha la mente in letargo e vuole capire cosa sta succedendo può leggere i libri scritti dagli scienziati.

Ma c'è un altro aspetto tipico della terza cultura: quando i ricercatori espongono

le loro idee al pubblico, si devono anche guardare dai loro colleghi. Gould e Dawkins, per esempio, provocano la gelosia degli altri scienziati perché riescono a spiegare al pubblico le stesse cose di cui si discute fra specialisti. Questo è particolarmente vero in biologia. In questo campo talvolta si ha l'impressione che i ricercatori non vogliano lavare i propri panni in pubblico, perché si teme che i fanatici religiosi approfittino dei litigi fra evoluzionisti per ridare credito al creazionismo. Fra i biologi vige così il comandamento che vieta di parlare male di Darwin in pubblico. Chi vuole divulgare ha comunque vita grama anche in altre discipline scientifiche. Un divulgatore è colui che spiega le teorie in termini comprensibili; è ridicolo che gli scienziati non rispettino questo mestiere. In qualsiasi altro campo, spiegare a una commissione parlamentare quanto è bello e interessante ciò che si sta facendo viene considerato un servizio prezioso. Nella scienza, invece, vieni trattato come uno che ha tradito la loggia massonica.

roger schank Facendo parte del comitato di redazione dell'*Enciclopedia Britannica*, mi capitò di assistere un paio d'anni fa a una curiosa riunione in cui si discusse su chi avrebbe dovuto occuparsi dell'opera in futuro, e di cosa sarebbe diventata. Il comitato, composto in prevalenza da letterati, decise che andavano coinvolti gli informatici, perché il mondo si stava computerizzando. Clifton Fadiman disse allora che avremmo dovuto rassegnarci a lasciare l'*Enciclopedia Britannica* in mano a persone meno colte di noi. Mi venne spontaneo ribattergli: "Mi scusi, chi le fa credere che io sia meno colto di lei?. Al che rispose: "Ovviamente non mi riferivo a lei ! So benissimo che lei è un informatico geniale e del tutto *sui generis*".

Non credo di essere un informatico diverso dagli altri. Il fatto è che questi letterati pensano che chi non conosce i classici sia un ignorante, mentre non sapere un tubo di scienza va bene. Chissà poi perché.

Viviamo in un mondo in cui non si può conoscere tutto; sono troppe le cose da sapere. Bisogna quindi rassegnarsi all'idea di avere dei limiti e dichiararli onestamente. Tuttavia ce n'è uno che la nostra società non può tollerare: quello di non conoscere i classici. Anche Mortimer Adler, capo del comitato di redazione dell'*Enciclopedia Britannica*, pensa in questi termini. E quante volte abbiamo discusso dei "libri immortali", di cui ha una lista completa! Per carità, sono opere interessantissime, ma che ovviamente trascurano quasi tutto ciò che è stato scoperto negli ultimi cento anni.

Ho letto molto sul tema della coscienza e riesco a tenermi aggiornato anche grazie a un indice analitico creato da Adler, il *Synopticon*. Così ho potuto trovare, sull'argomento, molte citazioni di Tommaso d'Aquino, Montaigne e Aristotele. Autori che del fenomeno "coscienza" avevano inevitabilmente nozioni inutilizzabili e con forti connotazioni religiose, che nulla hanno a che spartire con le teorie attuali. Eppure ci viene detto e ripetuto che se non abbiamo letto questi testi siamo ignoranti. Io li ho letti, ma devo confessare che non mi è servito un granché. Ciò che ho capito è che su questi argomenti ci si accapiglia da circa due millenni senza un gran costrutto. Ora invece, applicando la metafora del computer allo studio della coscienza, si stanno scoprendo cose inedite e interessanti che i vari Clifton Fadiman in circolazione non vogliono nemmeno prendere in considerazione. Sono quasi certo che non abbia letto *Coscienza. Che cosa è* di Daniel Dennett. Ma cosa importa? Lui è colto lo stesso! Siamo stati buttati fuori dal club degli intellettuali per ragioni che non è il caso qui di approfondire. Ma forse è proprio per questo che gli scienziati scrivono libri così popolari: perché sono persone che hanno qualcosa di serio da dire e non vengono considerati grandi intellettuali. Non mi sembra, infatti, che oggi nel nostro paese gli "uomini di cultura" godano di un grande prestigio.

j. doyne farmer Uno dei problemi principali del nostro tempo è la sintesi delle conoscenze. La società moderna è un organismo molto complesso, in cui ciascuno

tende a chiudersi nella sua specializzazione senza riuscire più a comunicare il proprio sapere. Newton pubblicava sui *Philosophical Transactions* della Royal Society e fino alla fine del XIX secolo gli scienziati continuarono a essere definiti "filosofi naturali", poiché la filosofia comprendeva tutte le discipline. Nel xx secolo, invece, la scienza si trasformò via via in un corpo separato.

I grandi fisici che si affermarono negli anni Cinquanta - come Richard Feynman - disdegnavano la filosofia e la ritenevano cosa di cui un fisico non doveva occuparsi. Per un certo verso, questo rigetto aveva una giustificazione, se solo si pensa a che roba deprimente è diventata la filosofia in questo secolo.

La situazione era ben diversa negli anni Venti, quando s'imposero le teorie di Albert Einstein e di Niels Bohr. Questi fisici avevano una solida cultura filosofica; Einstein, per esempio, citava spesso Kant e riteneva che nessun fisico teorico potesse ignorare la storia del pensiero. Non mancavano poi gli scienziati che si avventuravano a scrivere opere filosofiche. Nel secondo dopoguerra questa vena speculativa si andò esaurendo, tanto che la nostra generazione crebbe con la convinzione che occuparsi di filosofia fosse, nella migliore delle ipotesi, tempo sprecato. E ancora oggi se un fisico scrive un saggio filosofico, o peggio ancora un libro di divulgazione, corre il rischio di rovinarsi la reputazione.

martin rees La maggioranza di coloro che detengono le leve del potere nei *media* ha ricevuto un'educazione essenzialmente umanistica e non è in grado di interpretare gli interessi dei lettori più esigenti. Questa inadeguatezza culturale è particolarmente grave in Gran Bretagna, dove il sistema scolastico è molto parcellizzato e non garantisce una formazione scientifica di base dopo le scuole medie.

Si sta comunque facendo strada la consapevolezza che ci sono concetti generali, come quello di caos, che possono essere quantificati e applicati a molti ambiti diversi. Questo è un fatto molto positivo, perché mette in comunicazione studiosi che altrimenti sarebbero rimasti isolati. Naturalmente c'è una grande differenza fra chi capisce la matematica e chi non la capisce. Direi che questa è la difficoltà principale che incontriamo nello spiegare le idee della fisica al pubblico. Questi argomenti sono molto richiesti e probabilmente a chi dirige i giornali non fa molto piacere apprendere che metà dei lettori ha una discreta cultura scientifica e che quindi desidererebbe maggiore attenzione su questi temi.

lee smolin Oltre ad avere una teoria quantistica della gravità, vorrei poterla comunicare al di fuori della comunità scientifica. Ascoltando studiosi di materie umanistiche, mi sono accorto che anche loro hanno grandi difficoltà nel comunicare i concetti più astrusi delle loro discipline. Non riesco a seguirne i ragionamenti riga per riga, perché il loro linguaggio risente delle dottrine di Hegel, Heidegger, o di qualche altro filosofo di cui non capisco assolutamente niente. Talvolta ho l'impressione che provino un certo compiacimento a essere oscuri; perché poi la cosa faccia tanto tendenza non so proprio dire. Ma torniamo alla scienza.

Credo di essere un buon comunicatore: datemi un paio d'ore e so spiegare quasi tutto. Una delle differenze fondamentali fra cultura scientifica e umanistica è che in quest'ultima i ricercatori non sono abituati a parlarsi, ma solo a scriversi e a leggersi nel chiuso dei loro studi. Gli scienziati, invece, prima di tutto si parlano e pertanto, forti di questa cultura verbale, sanno anche parlare al pubblico. Provate ad andare a una conferenza di filosofi o critici letterari: sicuramente si metteranno a leggere un discorso scritto, parola per parola. È raro che gli scienziati facciano lo stesso.

Secondo me, gli esponenti della cosiddetta terza cultura sono qualcosa di più di un semplice gruppo di accademici abituati a comunicare con un pubblico di profani. In

misura più o meno marcata, condividono una stessa visione del mondo. Nei momenti di ottimismo, mi pare di scorgere il rinnovarsi della gloriosa tradizione della filosofia naturale, ovviamente su basi diverse da quelle del XVII secolo. Un'idea centrale, ad esempio, è che il mondo non è statico ed eterno, ma si evolve nel tempo. Nel XIX secolo questa verità riguardava solo il mondo biologico, mentre nel secolo successivo l'ipotesi evoluzionista è diventata valida per l'universo nel suo complesso. Questa idea ha impiegato molto tempo ad affermarsi, così come è dovuto passare un secolo perché le ipotesi di Copernico fossero confermate. Si può dire che solo in questi anni ci stiamo rendendo conto di cosa significhi una realtà in evoluzione perenne.

Inoltre, questa nuova filosofia naturale considera inutile, anzi ridicola, l'ipotesi di una intelligenza superiore responsabile della bellezza e della complessità del mondo. Si può sostenere, invece, che in un contesto biologico la materia vivente si è creata e organizzata da sé a partire da principi semplici, come la selezione naturale. Credo che lo stesso si possa affermare per le leggi della fisica e la struttura del cosmo.

Il terzo tema chiave è la complessità: il mondo è intessuto di una straordinaria varietà di cose e fenomeni e questa ricchezza è essenziale e non accidentale. In questo mondo complesso e autorganizzato, le proprietà delle cose hanno una natura relazionale. La nozione di proprietà assolute, come ad esempio quella di specie biologica, è diventata altrettanto obsoleta dello spazio e tempo assoluti di Newton.

Questi temi talvolta riverberano anche nelle opere di alcuni artisti, come Saint Clair Cemin e Donna Moilyn. Ovviamente ci sono molti artisti - per non parlare poi degli "intellettuali" che scrivono d'arte - ancora prigionieri di fascinazioni nietzscheiane, che amano cioè trastullarsi con morte, violenza, negatività e infierire contro visioni del mondo ormai ritrite. Questa gente conta però sempre meno; altri hanno ormai compreso che il mondo non finirà domani, che il XXI secolo sarà straordinariamente interessante e che è giunto il momento di cominciare a pensare alle nuove strade che l'umanità può percorrere.

Parte prima

L'idea evoluzionistica

L'universo è cambiato col passare del tempo: da semplice è diventato più complesso. Ce lo insegnano gli ultimi sviluppi della teoria dell'evoluzione: la crescita di un nuovo ordine caratterizza la biologia fin dai tempi di Darwin, e anche la cosmologia del xx secolo.

Come i suoi contemporanei, Darwin non conosceva le leggi dell'ereditarietà, ma credeva nella teoria del naturalista francese Jean-Baptiste Lamarck, secondo cui un organismo può assumere certe caratteristiche in base alle interazioni con l'ambiente, e quindi trasmetterle alla prole. Solo nel Novecento, quando riemergono i risultati delle ricerche compiute da Mendel cinquant'anni prima, il gene diventa il protagonista della sintesi moderna di Darwin e Mendel, anche se la sua natura rimane ancora tutta da scoprire. La sintesi della genetica con la visione darwiniana della selezione naturale viene realizzata all'inizio degli anni Trenta da Ronald Aylmer Fisher, John Burdon Sanderson Haldane e Sewall Wright. Qualche anno più tardi il paleontologo George

Gaylord Simpson, il biologo Ernst Mayr e il genetista Theodosius Dobzhansky svilupperanno ulteriormente il paradigma neodarwiniano. Ciononostante, oggi fra i biologi evolucionisti c'è ancora discordia. Le discussioni più importanti riguardano i meccanismi di speciazione, ovvero se la selezione naturale operi sul gene, sull'organismo, sulla specie, o a tutti e tre i livelli. Il dibattito riguarda anche il ruolo di altri fattori, come le catastrofi naturali.

Il decano dei biologi evolucionisti è George C. Williams, uno scienziato molto apprezzato dagli addetti ai lavori ma poco noto al grande pubblico. Williams è stato il primo a sostenere che la selezione naturale agisce sul gene, precedendo così Richard Dawkins, del quale condivide molte idee, e distinguendosi da Stephen Jay Gould, che invece sostiene una teoria gerarchica dei processi di selezione, di cui il gene costituisce solo un livello. Il libro di Williams *Adaptation and Natural Selection*, pubblicato nel 1966, è il manifesto di ciò che poi verrà definito ultradarwinismo. Nei suoi lavori più recenti Williams insiste sulle caratteristiche informazionali del gene a scapito di quelle biologiche. Più che un oggetto, esso sarebbe cioè un "pacchetto d'informazioni".

Tre cose hanno reso famoso Stephen Jay Gould nella comunità scientifica: gli "equilibri punteggiati", una teoria sviluppata insieme a Niles Eldredge secondo la quale le nuove specie emergono improvvisamente invece di trasformarsi gradualmente l'una nell'altra; la riscoperta degli studi sulle relazioni fra embriologia ed evoluzione, documentata nel libro *Ontogeny and Phylogeny* e lo storico articolo *The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Program*, scritto a due mani con il genetista delle popolazioni Richard Lewontin. In seguito, bestseller come *La vita meravigliosa* e *Bravo brontosauero* hanno trasformato Gould in una star della divulgazione scientifica internazionale.

I paleontologi studiano i fossili per cercare le prove sulle regolarità di lungo periodo della storia della vita sulla Terra e sulle estinzioni delle specie nel corso di milioni di anni. Criticando la visione ultradarwiniana di Williams e Dawkins, dominante nella biologia evolucionistica, Gould esprime lo scetticismo di molti paleontologi riguardo la portata della selezione naturale.

Nel tentativo di riformare l'attuale modello darwiniano, Gould ha posto in evidenza tre aspetti dell'evoluzionismo: la teoria gerarchica della selezione naturale; i limiti all'evoluzione imposti dalle resistenze biologiche nei confronti dell'adattamento; gli eventi catastrofici che nel corso delle ere geologiche hanno provocato le estinzioni in massa. Data la sua capacità divulgativa e la sua prolificità di scrittura, il pubblico colto tende a identificare le sue idee con la corrente principale della biologia evolucionistica. Ma non è così: Gould è un critico della teoria ortodossa, sostenuta da George Williams, dall'inglese John Maynard Smith e da Richard Dawkins.

Dawkins viene considerato dai suoi colleghi il più puro fra gli ultradarwiniani. Anch'egli è uno scrittore molto dotato, noto sia per i libri di divulgazione, sia per i contributi originali alla teoria dell'evoluzione. Sue sono alcune delle metafore più efficaci per la comprensione del dibattito sul darwinismo: come quella del libro *Il gene egoista*, in cui i geni - le molecole del dna - vengono presentati come le unità fondamentali della selezione naturale, i cosiddetti "replicatori". Gli organismi invece - uomo compreso - sono solo i "veicoli", l'involucro esterno dei geni. Il successo o fallimento dei replicatori si giudica dalla loro capacità di costruire veicoli efficienti, il cui scopo è di propagare i geni-replicatori, non se stessi. Nel libro *II fenotipo esteso*, Dawkins va oltre l'organismo e applica la stessa idea alla famiglia, al gruppo sociale, all'architettura, all'ambiente modellato dagli animali: tutte strutture che vengono interpretate come parte del fenotipo, che è l'incarnazione dei geni. Con l'invenzione del concetto di "meme", l'unità di ereditarietà culturale, perfino la cultura viene intesa da Dawkins in un'ottica darwiniana. In pratica i meme sono le idee, anch'esse soggette alla selezione naturale.

Secondo Brian Goodwin la biologia è una scienza esatta: la sua concezione di "nuova biologia" si allontana dalla tradizione di scienza storica per avvicinarsi al rigore della fisica. Goodwin rappresenta la corrente strutturalista ed è in sintonia con lo zoologo scozzese D'Arcy Thompson, secondo il quale la variazione evolutiva degli organismi viene limitata da leggi strutturali. Fiero oppositore delle visioni riduzioniste, Goodwin va molto più d'accordo con le idee sulla complessità di Stuart Kauffman e con l'approccio olistico alla biologia di Francisco Varela.

Steve Jones è un genetista e biologo noto soprattutto per i suoi studi sulle chioccioline. Il suo pallino è la grande diversità che esiste nei regni animale e vegetale. Perché - si chiede Jones - non esistono mai due individui identici? In linea di principio, infatti, la selezione naturale dovrebbe portare all'evoluzione di una forma perfetta per ciascuna specie. Le osservazioni di Jones si basano - fra le altre cose - sull'impressionante varietà di colori e di striature che caratterizza il guscio della chiocciolina *Cepaea nemoralis*, una specie che fin dal secolo scorso ha rappresentato un archetipo della diversità intraspecifica. Negli anni Cinquanta i biologi inglesi Arthur Cain e Phillip Sheppard sostenevano che queste differenze, solo in apparenza insignificanti, sono invece determinate dalla selezione naturale; sviluppando diverse colorazioni, infatti, le chioccioline possono sottrarsi ai predatori, che imparano a riconoscere e ad attaccare solo un determinato tipo di forma. Secondo Jones anche il clima ha un ruolo importante nella diversificazione degli individui: minimi cambiamenti del microclima possono infatti alterare il comportamento e la sopravvivenza di chioccioline dal guscio diverso. Da qui la tesi che gli habitat ecologicamente complessi favoriscono la diversità genetica. Anche Jones è un divulgatore che scrive di scienza e tiene conferenze pubbliche da dieci anni; il suo ultimo libro, *The Language of the Genes*, ha vinto nel 1994 lo Science Book Prize.

Niles Eldredge, un paleontologo molto vicino a Stephen Jay Gould, sostiene che le specie sono come magazzini di informazione. La teoria degli equilibri punteggiati prova che le specie, una volta originate, tendono a rimanere stabili, mentre il cambiamento avviene rapidamente per diramazione e distacco di una piccola popolazione dalla specie ancestrale. Eldredge è famoso per le ricerche sulle strutture gerarchiche dei sistemi biologici e per le sue critiche al programma adattazionista. Dalla fine degli anni Sessanta in poi, i due naturalisti Eldredge e Gould si sono contrapposti a George Williams, John Maynard Smith e Richard Dawkins nel dibattito sui meccanismi della selezione naturale. Eldredge è convinto che le metafore della competizione, appropriate per la biologia riproduttiva, non possano essere utilizzate come criterio generale per spiegare i sistemi biologici su grande scala. Inoltre Eldredge sottolinea come in realtà gli ultradarwinisti prendano in considerazione i geni solo a livello di popolazioni, mentre trascurano la biologia molecolare.

Per la biologa Lynn Margulis gli studi sull'evoluzione dovrebbero risalire fino a quasi quattro miliardi di anni fa. Le sue ricerche più importanti riguardano l'evoluzione cellulare, che culmina con la comparsa della cellula eucariotica, dotata cioè di nucleo. Da essa derivano tutte le forme di vita complesse. Trent'anni fa la Margulis fu la prima a sostenere l'ipotesi che la cellula eucariotica nasce dalla simbiosi fra diversi tipi di batteri. Allora nessuno la prese sul serio: oggi il ruolo della simbiosi nell'evoluzione della cellula viene considerata una scoperta fondamentale della biologia.

Lynn Margulis è anche una sostenitrice di Gaia, l'idea sviluppata negli anni Settanta dal chimico dell'atmosfera britannico James E. Lovelock. Secondo l'ipotesi Gaia, l'atmosfera e i sedimenti superficiali del nostro pianeta formano un sistema fisiologico capace di autoregolazione. Nell'interpretazione spinta di Gaia, la Terra sarebbe equiparabile addirittura a un organismo vivente. La Margulis invece si limita a sottoscrivere la versione più blanda, che definisce il pianeta come un ecosistema integrato, capace di autoregolazione. C'è chi critica la biologa statunitense per aver ceduto a quella che George Williams definisce la sindrome "Dio è buono", una

debolezza che si manifesterebbe nell'estensione indiscriminata della metafora della simbiosi alla totalità dei processi naturali. Di rimando, la Margulis critica apertamente i biologi evuzionisti ortodossi, che non riuscirebbero a comprendere l'importanza della chimica e della microbiologia nell'evoluzione.

1. George C. Williams

Un pacchetto di informazioni

George c. williams è un biologo evuzionista; professore emerito di ecologia e di evoluzione presso la State University di New York a Stony Brook; autore di *Adaptation and Natural Selection: A Critique of Some Current Evolutionary Thought* (1966), *Sex and Evolution* (1975), *Natural Selection: Domains, Levels, and Challenges* (1992) e coautore con Randolph Nesse di *Why We Get Sick* (1995).

L'evoluzione, intesa come un cambiamento di lungo periodo in una popolazione che si riproduce sessualmente, dipende dalle percentuali relative di sopravvivenza dei geni che competono fra loro. Ci si aspetta quindi che un organismo sia in grado di riconoscere nell'ambiente i propri consanguinei, e che fra parenti si instaurino più facilmente rapporti di amicizia e collaborazione che fra estranei, o fra individui imparentati più alla lontana.

Ho cominciato a interessarmi di evoluzione nell'estate del 1947, durante un corso estivo tenuto dal paleontologo Sam Welles nel Painted Desert. Più che di teoria, il corso prevedeva il perfezionamento nell'uso di vanga e piccone; noi studenti trascorrevamo infatti la maggior parte del tempo scavando fossili per il progetto di ricerca di Welles, uno specialista di anfibi del Triassico. Di sera ci si riuniva intorno al falò per discutere di argomenti come l'evoluzione: avevo ventun anni, e per la prima volta nella mia vita incontravo dei veri biologi disposti ad ascoltare le mie idee. Fu certamente quello l'inizio del mio interesse per l'evoluzione, e poco dopo mi iscrissi a un corso dell'Università della California a Berkeley tenuto da Ledyard Stebbins, il maggior esperto di botanica dell'epoca. Il corso di Stebbins mi introdusse all'opera di Theodosius Dobzhansky *Genetics and The Origin of Species*. Stebbins era bravissimo, ma fu il libro di Dobzhansky che mi indusse a studiare la selezione naturale.

Come insegnante all'Università di Chicago, ero responsabile dei corsi di biologia per gli studenti del primo e del secondo anno. La didattica consisteva nell'esposizione dei classici, da Darwin a Mendel. Nel frattempo frequentavo seminari tenuti da persone come Alfred Emerson, uno specialista di termiti che allora era considerato un'autorità nel campo dell'evoluzione. Furono le sue idee balzane a convincermi che dovevo fare qualcosa: se quella di cui parlava Emerson era biologia, avrei fatto meglio a diventare un assicuratore.

Mi ricordo soprattutto una sua conferenza sul ruolo della morte nell'evoluzione: un fenomeno che Emerson considerava davvero provvidenziale, perché secondo lui si invecchia e si muore per far posto ai nostri successori. Ma questa idea di Emerson, che si proclamava darwinista, è impossibile da conciliare con la teoria di Darwin. Per il naturalista inglese l'evoluzione si realizza infatti attraverso la selezione naturale.

Nacque così la mia prima ossessione teorica: l'evoluzione della senescenza, cioè il

declino della capacità di adattamento che a sessant'anni ci impedisce di correre velocemente come a trenta. La sera di quella conferenza di Emerson, parlando con mia moglie, arrivai a una conclusione che poi fu ripresa da Peter Medawar solo nel 1952 (anche se forse negli anni Quaranta se ne poteva già intravedere qualche traccia nei suoi scritti): la capacità della selezione naturale di mantenere l'adattamento dipende principalmente dalla riproduzione e dalla sopravvivenza.

Il fattore sopravvivenza è facile da comprendere. Se ci sono molte più probabilità di essere vivi a trent'anni che a sessanta, allora la selezione riuscirà a preservare meglio l'adattamento in un trentenne che in un sessantenne. A un'età molto avanzata, quando le probabilità di sopravvivenza sono praticamente nulle, l'adattamento diventerebbe una causa persa, e quindi la selezione naturale non si preoccupa affatto di mantenerlo.

Parallelamente al declino dell'efficacia della selezione diminuisce la qualità dei suoi prodotti, ed ecco perché la mortalità aumenta con l'età. Ne ero convinto a quell'epoca e lo sono ancora oggi: se esiste la morte, le probabilità di sopravvivenza diminuiscono man mano che l'età aumenta.

Alfred Emerson sosteneva poi che nell'evoluzione è più importante la cooperazione della competizione, come proverebbe il comportamento degli insetti sociali. A me invece sembrava logico pensare il contrario. La cooperazione che esiste in certe colonie di insetti, infatti, è motivata da un alto livello di consanguineità. Affrontai questo argomento in un articolo pubblicato nel 1957, con un modello piuttosto ingenuo di selezione naturale fra famiglie. Non esisteva ancora il concetto di selezione di parentela, che fu proposto qualche anno dopo da William D. Hamilton. Portata all'estremo, quest'idea riesce a giustificare perfino la rinuncia alla riproduzione da parte di certi individui, a patto che questo comportamento garantisca la sopravvivenza di più della metà dei loro geni, anche solo attraverso i fratelli. Com'è possibile ottenere questo risultato senza riprodursi? I fratelli nati da stessi genitori condividono la metà dei geni, e quindi permettono la trasmissione di questi geni alle generazioni future; la cosa può avvenire sia con la riproduzione diretta, sia indirettamente, attraverso la riproduzione dei propri fratelli. Il caso degli insetti sociali è ancora più eclatante. A differenza degli animali superiori, infatti, fra gli insetti sociali le sorelle condividono tre quarti dei geni (e non solo la metà come avverrebbe con i figli), sicché è più conveniente per formiche, vespe e api sociali aiutare la nascita delle sorelle piuttosto che quella dei loro stessi figli.

Il mio interesse per queste ricerche non è mai diminuito, ed è all'origine del mio primo libro *Adaptation and Natural Selection*. A quell'epoca i miei interessi cominciavano a spaziare anche su altri argomenti dell'evoluzionismo.

In quegli anni il concetto di selezione di gruppo non era ancora stato definito esplicitamente. Il libro di V.C. Wynne-Edwards, *Animal Dispersion in Relation to Social Behavior*, era uscito nel 1962, ma io lo scoprii solo quando avevo già finito di stendere *Adaptation and Natural Selection*.

Prima di allora qualcuno aveva già tentato la strada del modello di selezione di gruppo, in particolare Alfred Emerson e A.H. Sturtevant in un articolo del 1938; nel 1945 Sewall Wright fece ricorso all'idea della selezione di gruppo in una recensione del libro di George Simpson *Tempo and Mode in Evolution*. Ma per chi non lo conosceva già, il concetto non era facile da cogliere. In generale, si sentiva il bisogno di ricorrere alla selezione di gruppo per giustificare una certa idea di adattamento. A quel tempo si parlava di "bene della specie": il che equivale alla sopravvivenza di una specie a scapito di un'altra, destinata a estinguersi per opera della selezione naturale. Il concetto di base del lavoro di Wynne-Edwards sulla selezione di gruppo era che niente può funzionare per il bene di un gruppo se non esiste una selezione a livello degli stessi gruppi. Si riteneva cioè che la selezione agisse sulle popolazioni che si riproducono

localmente, senza dare particolare rilevanza al fatto che esse potessero o meno essere specie diverse.

Con grande soddisfazione di quasi tutti, quella tesi è stata confutata. Più precisamente, oggi non si nega che la selezione possa agire a livelli più alti dell'individuo o della famiglia; tuttavia, essa non può costituire la forza trainante dell'evoluzione, com'era nelle intenzioni di Wynne-Edwards. Gli stessi fenomeni che egli cercava di giustificare con la selezione di gruppo oggi vengono attribuiti a processi di selezione fra gli individui.

Faccio un esempio: qualsiasi freno alla riproduzione che si osserva quando un certo gruppo non raggiunge il suo massimo tasso di natalità si può spiegare con un modello individuale di distribuzione delle risorse. Non ti ammazzi di lavoro oggi se sai che, lavorando a ritmi più lenti, potrai continuare a lavorare anche domani. E magari puoi decidere di non lavorare per nulla se sai che domani le condizioni di lavoro saranno più favorevoli. Ciò spiega anche perché gli uccelli non depongono in una stagione il massimo numero possibile di uova: la distribuzione delle loro risorse, dal punto di vista della riproduzione, sarà più efficace se dovranno allevare meno piccoli, e sopravvivere fino alla prossima stagione riproduttiva.

Nei miei primi lavori, come in quelli di quasi tutti i colleghi della mia generazione, c'era un'enorme lacuna: non avevo colto l'importanza fondamentale della riproduzione sessuata. Ho cominciato a occuparmene negli anni Settanta con il libro *Sex and Evolution*. Ma solo negli ultimi vent'anni, grazie a John Maynard Smith e a Bill-Hamilton, la nostra comprensione dell'argomento è notevolmente migliorata.

Richard Dawkins ha imboccato la strada giusta distinguendo fra geni-replicatori e organismi-veicoli. La sostituzione del termine "veicolo" con "interattore", proposta da David Hull, è solo un miglioramento terminologico. Dawkins però non si è spinto abbastanza avanti nella sua distinzione, poiché definisce il replicatore come un'entità fisica che si duplica in un processo riproduttivo. Anch'egli cade dunque nell'equivoco di identificare i geni con il dna.

biologi evoluzionisti stentano ancora a distinguere l'informazione dalla materia; ho trattato l'argomento nel mio libro del 1992 *Natural Selection: Domains, Levels, and Challenges*. Questi due regni non sono omogenei fra loro. Una galassia e una particella di polvere possono essere descritti in modo unitario, perché ambedue sono dotati di massa, carica, lunghezza e larghezza. Lo stesso però non si può fare con informazione e materia: l'informazione non ha proprietà fisiche, così come la materia non si misura in *byte*, né possiamo applicare a essa i concetti di ridondanza o fedeltà che attribuiamo all'informazione. La mancanza di fattori descrittivi comuni rende perciò necessario trattare separatamente i due campi.

gene è un pacchetto di informazioni, non un oggetto. La successione delle basi in una molecola di dna specifica il gene, ma questa molecola costituisce il mezzo, non il messaggio. E la distinzione fra mezzo e messaggio è fondamentale in biologia.

Forse mi sono lasciato influenzare dal fatto che quindici anni fa ho cominciato a usare il computer; il continuo trasferimento d'informazione da un mezzo fisico a un altro, e la possibilità di ritrovare la stessa informazione sul mezzo originale, è infatti un perfetto esempio della separabilità fra questi due domini. Allo stesso modo in biologia, quando si parla di geni, genotipi e pool genici, si fa riferimento all'informazione, non alla realtà del mezzo fisico: si tratta di modelli concettuali.

Mi ha anche colpito il concetto di "meme" inventato da Dawkins, ovvero l'unità di informazione culturale che influenza il comportamento degli individui. I memi, a differenza dei geni, non sono archiviati su un unico supporto. Il libro *Don Chisciotte* è costituito da una serie di fogli stampati, ma la stessa informazione può essere trasferita a un cd o registrata su una cassetta. E questo vale per tutti i prodotti

culturali: al mutare del mezzo, il meme resta lo stesso.

Pensiamo a una tazza da caffè o a un tavolo: non gli oggetti, ma la loro idea persiste nella cultura, insegnando alle generazioni successive come fare altre tazze da caffè e altri tavoli. La stessa cosa avviene in biologia: mani, piedi e nasi non sopravvivono, ma ricorrono grazie all'informazione genetica che determina la loro formazione. L'informazione perdura e si evolve nel tempo, anche se certamente noi possiamo risalire a essa attraverso la sua manifestazione fisica. Ecco perché le teorie di Dawkins non mi convincono del tutto: perché considerano il gene come un oggetto e privilegiano la replicazione a scapito del proliferare dell'informazione.

Non si comprende la selezione naturale se non si accetta la distinzione fra informazione e materia. Non è corretto, per esempio, paragonare il gene a un individuo, dove per "individuo" si intende un oggetto materiale e per "gene" un pacchetto di informazioni: occorre invece parlare di "gene" e di "genotipo". Tutte le comparazioni devono avvenire o all'interno del regno dell'informazione, o di quello della materia.

Posta questa premessa di metodo, si può notare che nei due settori i livelli non corrispondono perfettamente. Se osserviamo le popolazioni che si riproducono sessualmente nel regno dell'informazione, che io preferisco chiamare "del codice", vediamo che esistono solo due livelli di selezione: il gene e il pool genico. La selezione può operare su geni alternativi all'interno di una popolazione, così come su pool genici alternativi in un biota.

Nel regno della materia, invece, la selezione naturale agisce sugli individui, ma anche su gruppi di individui - come le colonie di insetti - o su famiglie, che formino o meno colonie elaborate. Questi raggruppamenti temporanei danno luogo alla cosiddetta "selezione del tratto di gruppo", e a quella fra popolazioni alternative, che rappresenta la base fisica della selezione fra pool genici. Ma per i gradini più bassi di selezione a livello fisico - per esempio fra colonie avversarie della stessa specie di insetti sociali - non esiste un livello corrispondente nel codice. Le tappe della competizione fra colonie di insetti sono infatti registrate a livello di un gene, dato che non esistono differenze genetiche abbastanza stabili fra colonie diverse perché avvenga una efficace selezione sul piano del codice. Credo che anche David Wilson, che si occupa di selezione fra interattori nel regno fisico, sia d'accordo con me.

Oggi le tesi del mio libro del 1966 sono accettate da tutti; e se non l'avessi scritto io, ci avrebbe pensato qualcun altro, come Hamilton, Dawkins, Robert Trivers, che a quei tempi lavoravano sulle stesse idee. Basta pensare al libro di Dawkins, *Il gene egoista*, che ritengo abbia superato di molto le mie ricerche.

Quello che verrà considerato il mio contributo più importante è la distinzione fra i due regni in cui opera la selezione naturale. Mi ricorderanno anche perché sono stato uno dei primi a interessarsi della riproduzione sessuata e a chiedersi perché è tanto diffusa.

In futuro sarà la paleontologia a generare le maggiori scoperte nel campo dell'evoluzione. Dalle ricerche e dagli scavi in corso emergeranno fra qualche decennio informazioni molto utili. Ci sono gruppi di scienziati che stanno cercando granelli di polline nei sedimenti lacustri e altri ancora che sono alla caccia di trilobiti negli scisti paleozoici. Altri contributi importanti arriveranno da settori tradizionalmente lontani dagli studi evolutivisti, come dalle ricerche sul conflitto fra genomi. Fra le novità teoriche più convincenti e chiarificatrici c'è quella dell'imprinting genetico, secondo cui nelle prime fasi dello sviluppo dell'embrione l'attività del gene è influenzata dal fatto che provenga dalla madre o dal padre. Sono rimasto molto impressionato da una recente pubblicazione del biologo David Haig sul conflitto genetico nella gravidanza umana. Certo non si tratta dell'esempio più chiaro di imprinting genetico, e non sarà semplice arrivare a conclusioni certe, ma sono lavori come questi che fanno riflettere

seriamente sui livelli e i domini in cui agisce la selezione. Oggi mi sto occupando di ciò che definirei medicina darwiniana, ossia l'applicabilità generale delle idee evoluzioniste alla ricerca, alla clinica e alla formazione medica. L'idea è nata dalle mie conversazioni con Randolph Nesse, un professore di medicina di Ann Arbor, e dalla lettura di un saggio di Paul Ewald.

Ornitologo di formazione, Ewald ha cominciato a interessarsi di medicina solo quando si è ammalato: una semplice infezione intestinale, niente di drammatico come l'attacco di malaria che aveva ispirato le ricerche di Alfred Russel Wallace. Paul ha cominciato allora a riflettere sull'interazione evoluzionistica fra ospite e parassita; riflessioni che l'hanno indotto a utilizzare i principi dell'evoluzione per interpretare i sintomi e i segni delle malattie infettive nell'organismo ospite. Credo che questa idea eserciterà una grande influenza sulla medicina del futuro.

Una delle intuizioni più importanti di Paul è che l'aids non sia una nuova malattia, vale a dire che l'hiv non sia un nuovo agente patogeno, ma che i suoi livelli di virulenza siano rapidamente aumentati a causa di circostanze ambientali. Si poteva trattare di un virus che, fino a venti o trent'anni fa, veniva trasmesso principalmente dai genitori alla prole, e forse raramente fra partner sessuali. Pertanto i fattori evoluzionistici di selezione riuscivano a mantenere molto basso il suo potere patogeno. Gli individui infetti dovevano infatti sopravvivere abbastanza a lungo da riprodursi, altrimenti il virus non si sarebbe trasmesso.

Immaginiamo ora di trasportare questo virus in una società completamente diversa, in cui i nuclei familiari sono distrutti e dove gli uomini frequentano prostitute che hanno contatti sessuali con centinaia di partner diversi all'anno. In questa situazione si creano le condizioni per una trasmissione del virus che non è più condizionata dalla sopravvivenza a lungo termine dell'individuo infetto. Più un ceppo è virulento all'interno di un individuo, più facilmente si trasmetterà a un suo simile e migliori saranno le sue possibilità evolutive: l'equilibrio della selezione naturale del virus si è spostato dal contesto sociale ai singoli soggetti. All'interno dell'organismo ospite, infatti, esiste una selezione naturale che dipende dal livello di virulenza dell'infezione: e qui s'innesci l'epidemia di aids. Ci sono poi molti altri esempi di comportamenti umani che possono influenzare l'evoluzione degli agenti patogeni.

Le idee evoluzioniste potrebbero anche aiutare la medicina a comprendere come gli adattamenti evolutivi della razza umana oggi non siano più sintonizzati con l'ambiente in cui viviamo: questa dissonanza è probabilmente una delle cause principali delle malattie attuali.

Fra venti o trent'anni, tutti gli studenti di medicina studieranno la selezione naturale e l'equilibrio fra le mutazioni sfavorevoli e la selezione. Studieranno l'evoluzione della virulenza e della resistenza agli antibiotici da parte dei microrganismi, ma anche le condizioni di vita delle popolazioni primitive, che hanno dato le pennellate finali alla fisionomia dell'uomo moderno. Queste idee circoleranno anche fra il pubblico, e influenzeranno il rapporto medico-paziente, perché i pazienti faranno domande a cui i clinici dovranno rispondere. Oltre a questa spinta dal basso verso l'alto, che parte dagli studenti e dai pazienti stessi, io mi auguro che anche ai vertici della medicina ufficiale, fra ricercatori e accademici, nasca un interesse per la prospettiva evoluzionista. Del resto, visti i ritmi attuali di sviluppo in questo settore, è inevitabile che ciò accada molto presto.

stephen jay gould George Williams è un personaggio molto importante. Quest'uomo mite ha esercitato una grande influenza sulla teoria dell'evoluzione fin dagli anni Sessanta, particolarmente con il libro *Adaptation and Natural Selection* del 1966: essenzialmente una critica della falsa logica delle forme di selezione di gruppo, allora in voga, e una difesa a oltranza della visione darwiniana ortodossa, basata sulla

selezione individuale. Si trattava di una questione metodologica, giacché Williams non sosteneva l'impossibilità teorica della selezione di gruppo; diceva piuttosto che gli argomenti impiegati per dimostrarla erano sbagliati. Da ciò concludeva che occorre limitarsi al livello più basso, quello della competizione darwiniana fra organismi, che a suo dire è sufficiente per spiegare l'evoluzione naturale. Benché non condivida questa argomentazione, ritengo che il suo libro sia una pietra miliare dell'evoluzionismo.

Richard dawkins Provo una grande ammirazione per George Williams, che considero uno dei grandi saggi del mio campo. Il succo del *Gene egoista* è contenuto in un paio di paragrafi di *Adaptation and Natural Selection*. All'inizio quell'opera non aveva suscitato molta attenzione, ma con il passar del tempo la sua influenza sulla teoria dell'evoluzione è diventata evidente.

lynn margulis Di Williams ho letto solo *Adaptation and Natural Selection*, un libro che ha il merito di chiarire il concetto basilare di evoluzione. Molti infatti non comprendono quali conseguenze comporti il fatto che nei mammiferi la riproduzione non può essere altro che sessuata. Sotto questa luce, il comportamento umano e degli altri mammiferi si chiarisce in funzione del suo passato evoluzionistico: Williams ha saputo aprire gli occhi a chi non riusciva a cogliere questa verità scientifica, in un'atmosfera culturale ricca di resistenze. E il fatto che pochi prima di lui avessero affrontato questo tema aumenta l'importanza del suo lavoro.

steven pinker Considero George Williams uno degli scrittori più brillanti della storia della scienza. *Adaptation and Natural Selection* precorreva decisamente i tempi. Nella prima parte del libro Williams denuncia la faciloneria dei biologi che ricorrevano alla teoria dell'evoluzione per giustificare qualsiasi cosa come benefico per l'organismo, oppure per la specie, l'ecosistema, la comunità, il pianeta, e così via. Williams invece disseziona il concetto di selezione naturale per chiarire quando deve essere applicato e quando no: non tutte le caratteristiche degli organismi che si adattano a qualcosa rappresentano infatti un adattamento nel senso tecnico della definizione. Se le zampe di una volpe tracciano un percorso nella neve, aiutandola a ritrovare il pollaio, questo non significa che le zampe della volpe si siano formate per lasciare impronte nella neve.

Nella seconda parte del libro Williams spiega invece perché alcune parti degli organismi non possono che avere una spiegazione basata sulla selezione naturale. La mano, l'occhio, il cuore, la pelle sono la dimostrazione di un progetto adattativo molto complesso, e non si giustificano con le leggi generali della crescita, o per impreviste svolte genetiche: così come nulla riesce a spiegare perché la mela abbia i semi al suo interno invece che altrove. Ogni struttura biologica destinata a svolgere una specifica funzione è frutto di un processo fisico la cui unica spiegazione scientifica possibile è la selezione naturale.

In questo modo Williams ha distinto molto nettamente ciò che va riferito alla selezione naturale e ciò che invece ha un'altra origine. E gran parte delle ricerche in biologia studia i tratti complessi degli organismi per cercare di capire se siano il sottoprodotto di altri tratti, o se siano chiaramente destinati a svolgere qualche funzione particolare. Dawkins, nell'*Orologiaio cieco*, ha sviluppato lucidamente, e divulgato al pubblico, le due parti della tesi originale di Williams. Stephen Jay Gould e il suo collega Richard Lewontin enfatizzano invece la prima metà del ragionamento, ignorando completamente la seconda.

niles eldredge L'evoluzionista inglese John Maynard Smith mi diceva di essere sconvolto dal fatto che George Williams non facesse parte della nostra Accademia nazionale: infatti vi entrò solo nel 1993. Quando andai a visitare Williams a Stony Brook verso la metà degli anni Ottanta, mi confidò la sue difficoltà nel reperire finanziamenti per le sue ricerche, e io non credevo alle mie orecchie. Il suo infatti rappresenta il più importante contributo statunitense alla biologia evoluzionista dal centenario darwiniano del 1959 a oggi: è veramente incredibile che non abbia ottenuto il successo e il plauso che merita. Williams è una persona riservata, molto simpatica, oltre che un pensatore di grande profondità. Ho per lui un'ammirazione enorme, anche se da anni non facciamo altro che polemizzare.

Secondo me il suo libro migliore è *Adaptation and Natural Selection*, mentre *Sex and Evolution* non mi convince fino in fondo. Williams ha frainteso alcune delle idee sviluppate da me e Gould, e devo confessare che trovo questo fatto molto frustrante. Anche perché credo dipenda dalla mia incapacità di spiegare ciò che penso davvero. Questo ovviamente non toglie nulla al valore che tutti noi riconosciamo a questo grande scienziato.

daniel c. dennett Non sono il primo a dire che George Williams è l'Abraham Lincoln del settore: il suo stile di comunicazione scarno ed efficace si sposa a una grande limpidezza di pensiero. Leggendo i suoi scritti ho capito com'è difficile lavorare sulla teoria dell'evoluzione, e com'è facile cadere in errore. Con piccoli, instancabili interventi di puntualizzazione, Williams attacca le idee superficiali, con calma e fermezza, fino a quando le ha completamente demolite. Allora ci si rende conto che il gioco è molto più difficile di quanto sembra, e che chi sa giocare meglio di tutti è George.

Il suo maggiore contributo è stato naturalmente quello di attirare l'attenzione sul concetto di "bene delle specie". Nel suo libro del 1966 Williams riuscì a provare che le idee di Wynne-Edward e degli altri, allora considerate l'abc della teoria dell'evoluzione, erano sbagliate. Williams ha spiegato che il concetto di base non è "ciò che serve alle specie serve all'organismo", e viceversa, ma "ciò che serve al gene serve al gene". È vero che in certi casi il bene del gene coincide con quello dell'organismo, e anche della specie. Ma chi comanda è sempre lui.

2. Stephen Jay Gould

Il modello della storia della vita

stephen jay gould biologo evoluzionista e paleontologo, insegna zoologia alla Harvard University. È autore di numerosi volumi, fra cui *Ontogeny and Phylogeny* (1977), *The Mismeasure of Man* (1981), *Il sorriso del fenicottero* (1985, tr. it. 1987), *La vita meravigliosa* (1989, tr. it. 1990) e *Bravo brontosauo* (1992, tr. it. 1992).

L'evoluzione non è sinonimo di progresso. I cambiamenti evolutivi che si sono manifestati nel corso del tempo non possono essere interpretati secondo questa nozione. In una prospettiva biologica, essa si rivela infatti tutt'altro che inevitabile. Gran parte di ciò che chiamiamo evoluzione è una perdita piuttosto che un acquisto di complessità morfologica. Insomma, non stiamo affatto marciando verso qualcosa di simile alla perfezione.

Strana cosa la storia della vita. Noi ci illudiamo che col passare del tempo gli organismi diventino sempre più complessi, e ci rimaniamo male quando ci accorgiamo che almeno i cinque sesti delle creature oggi esistenti sono ancora unicellulari. In realtà io credo che il livello di complessità della vita non è mai cambiato e mai cambierà. Se ci siamo messi in testa il contrario è perché abbiamo considerato solo un piccolo settore della storia della vita, dove un relativo progresso si è effettivamente verificato; peccato che questo sia più il frutto di una serie di coincidenze che di una necessità generale.

C'è un progetto che mi ossessiona da anni: quello di modificare la teoria darwiniana dell'evoluzione in modo da renderla più aderente ai fatti.

I temi su cui sto lavorando sono essenzialmente tre. Il primo è una teoria gerarchica della selezione naturale, che opera sia verso l'alto sia verso il basso. Richard Dawkins, che si ostina ancora a spiegare praticamente tutto ricorrendo alla selezione genetica, almeno su una cosa ha ragione: la selezione dei geni esiste. Ma sbaglia quando crede che sia l'unica fonte del processo evolutivo. In realtà essa è solo una delle fonti e probabilmente nemmeno la principale. Questo tipo di selezione è sicuramente responsabile, per esempio, della conservazione o perdita di certi geni nelle varie specie.

Il secondo tema riguarda la teoria classica dell'adattamento, e di quanto questa sia superata se solo si considerano le resistenze che i singoli organismi oppongono al cambiamento. Forse è più semplice capire ciò che intendo usando una metafora. Secondo il darwinismo più ortodosso (e in questo Darwin non era un darwinista), una popolazione è come una palla da biliardo che può andare indifferentemente in tutte le direzioni. È il colpo della stecca (cioè la selezione naturale) a decidere dove andrà a finire la palla. Ecco in cosa consiste, in estrema sintesi, la teoria classica dell'adattamento evolutivo. Nel XIX secolo Francis Galton, cugino di Darwin, ha elaborato una interessante metafora: egli vedeva l'organismo come un poliedro che se ne sta su una delle sue facce. Per farlo muovere c'è ancora bisogno della famosa stecca - cioè la selezione naturale. In questo caso, però, trattandosi di un poliedro, non potrà andare in qualsiasi direzione, poiché la sua stessa forma glielo impedisce. Gli sarà quindi facile seguire certi percorsi e del tutto impossibile seguirne altri, anche se dovessero risultare più vantaggiosi dal punto di vista dell'adattamento. Quindi è molto importante chiarire quanto questi limiti strutturali modifichino il darwinismo e la teoria dell'adattamento funzionale.

La terza cosa su cui mi sono interrogato è fino a che punto può reggere l'assunzione di fondo del darwinismo, secondo cui ciò che è stato osservato nei piccioni nell'arco di qualche generazione può essere estrapolato e applicato all'immensità del tempo geologico. Nei miliardi di anni in cui si dipana la storia della Terra entrano in azione altre leggi - come quelle che regolano le estinzioni in massa - che rendono il modello estrapolazionista non applicabile universalmente.

Il mio scopo è di far rientrare questi tre filoni - la selezione gerarchica, i limiti interni e l'immensità del tempo geologico - in una più ampia teoria dell'evoluzione.

Il concetto di tempo geologico è considerato indispensabile dai darwinisti ortodossi per applicare la cosiddetta estrapolazione biouniformista: essa consiste nell'osservare i piccoli cambiamenti che si verificano nella storia delle popolazioni locali per poi estrapolarli nella scala dei tempi geologici. Ma se sul piano delle ere geologiche entrano in gioco nuove cause che non possono essere comprese nel tempo breve, allora la strategia di ricerca darwinista non funziona più. Ecco perché lo stesso Darwin faceva finta di ignorare le estinzioni in massa: la geologia mette in crisi l'aspetto uniformista, o estrapolazionista, del pensiero darwiniano.

La persona più brillante con cui ho avuto il piacere di collaborare è il mio collega Richard Lewontin, professore di genetica delle popolazioni; ad Harvard teniamo

insieme il corso sui principi dell'evoluzione. Nel 1978 Dick Lewontin fu invitato a un convegno organizzato dalla Royal Society di Londra dove ovviamente prevaleva la corrente adattazionista inglese (nel comitato promotore penso ci fosse John Maynard Smith). Dick doveva essere il portavoce del punto di vista contrario, che del resto aveva già espresso con vigore in molte occasioni: in particolare dopo la pubblicazione nel 1975 di *Sociobiologia* di Edward O. Wilson, un testo fortemente adattazionista.

È chiaro che in natura l'adattamento gioca un ruolo importante. La mano e il piede, per esempio, sono strutture così ben funzionanti solo in virtù della selezione naturale. Altra cosa è invece voler giustificare qualsiasi struttura della natura come frutto della selezione naturale. Questo punto di vista caratterizza il naturalismo inglese fin dai tempi di Darwin.

Quando s'ignora la funzione di qualcosa, sia essa la parte di un fiore o di una talpa, i biologi darwinisti cercano subito di scoprire "a cosa serve", per individuare il processo di selezione naturale. Ma questa ricerca non dà sempre buoni frutti, poiché alcune strutture possono emergere come semplici effetti secondari di altre che hanno scopo adattativo. Ciò non toglie che, una volta manifestatisi, questi caratteri secondari si rivelano utili a qualcosa. Un esempio tipico è l'ala degli uccelli: una struttura in cui circa il cinque per cento non serve per volare, e quindi in origine doveva essere destinata a qualcos'altro.

Prendiamo il cervello umano: pur assolvendo a funzioni ben determinate, esso è anche un computer straordinariamente complesso che non è necessariamente il frutto della selezione naturale. Di sicuro la selezione non gli ha insegnato a leggere e a scrivere, perché queste funzioni sono state acquisite molto recentemente.

Io nutro da tempo molti dubbi sull'adattazionismo. Nei primi anni Settanta avevo lavorato con Dave Raup, Tom Schopf e Dan Simberloff sui modelli casuali di filogenesi, e avevo verificato quanta parte di una struttura apparente possa essere invece il prodotto di combinazioni casuali. Scrivendo nel 1977 il mio primo libro *Ontogeny and Phylogeny*, mi ero avvicinato alla biologia non adattazionista o strutturale tedesca e francese: la scuola continentale che si contrappone alla tradizione inglese. Mi preoccupava inoltre l'eccessivo ricorso all'adattazionismo da parte della letteratura sociobiologica. Nel 1978, dunque, a Dick Lewontin fu chiesto di preparare il discorso di chiusura del congresso della Royal Society, in rappresentanza della corrente non adattazionista: un intervento di grande prestigio, concesso dagli inglesi con il loro consueto fair-play.

Ma Dick odia volare, e all'epoca era occupatissimo su altri progetti. Quindi, dato che le nostre idee sull'argomento coincidevano, mi chiese di prendere il suo posto alla conferenza londinese. Scrissi l'intervento praticamente da solo. Si trattava di una critica del panadattazionismo, nella quale cercavo di spiegare perché la selezione naturale non riesce a spiegare tutti i caratteri di un organismo. Il mio intento non era di confutare la selezione naturale darwiniana, quanto di ridimensionarne la portata.

Credo nell'importanza dell'interdisciplinarietà e, come saggista, nell'efficacia divulgativa degli esempi tratti da altri campi di studio: la mia allocuzione - intitolata *The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm; A Critique of the Adaptationist Program* - esordiva con un paragone tratto dall'architettura. Qualche mese prima ero stato a Venezia, e nella basilica di San Marco, sotto le cupole, mi era venuta un'idea molto efficace per spiegare gli errori del modello adattazionista.

Mettiamo di voler costruire una chiesa sovrapponendole una cupola circolare a una costruzione a sezione quadrata formata da quattro archi: questo modello architettonico può essere paragonato a un fenomeno di adattamento. Quando si appoggia la cupola alla base quadrata, agli angoli avanzano quattro spazi triangolari, che in linguaggio architettonico vengono chiamati pennacchi. È evidente che essi non hanno alcuna funzione particolare; sono piuttosto la conseguenza accidentale

dell'"adattamento" della cupola alfa base quadrata che la sorregge.

Nella basilica di San Marco tutti i pennacchi sono stati utilizzati molto abilmente per completare l'iconografia delle cupole: quelli della cupola centrale, per esempio, ospitano i quattro evangelisti, e sotto di essi ci sono quattro figure umane che impersonano i fiumi biblici, il Tigri, l'Eufrate, il Nilo e l'Indo, ognuno dei quali regge un'anfora che versa acqua su un fiore sottostante, posto nella punta inferiore del pennacchio. È una composizione bellissima, anche se nessuno può sostenere che i pennacchi sono stati creati per ospitare i quattro evangelisti. Visto che ci sono - devono aver pensato gli architetti - tanto vale utilizzarli per una funzione utile e importante.

Dire che qualcosa nasce come effetto secondario non significa certo negare l'importanza delle sue conseguenze, come fanno certi biologi. Infatti i pennacchi di San Marco, nonostante la loro origine, sono molto rilevanti per il programma iconografico della basilica, in cui domina una radiosa simmetria: le decorazioni delle cupole, infatti, sono divise sempre in quattro parti in armonia con i pennacchi sottostanti.

Torniamo ora al cervello umano: probabilmente, attraverso la selezione naturale, esso si è ingrandito per assolvere a un numero limitato di funzioni legate alla sopravvivenza dell'uomo nella savana africana. Ma come conseguenza di questi adattamenti, si sono creati alcuni "pennacchi", cioè spazi cerebrali liberi utilizzati per migliaia di nuove funzioni non previste dal progetto evolutivo di partenza.

Scegliendo un esempio nel campo dell'architettura, avevo cercato di non incrociare le spade con i biologi darwinisti sul loro terreno, come invece sarebbe successo con un esempio tratto dal regno della vita organica. Ma la mia astuzia si rivelò inutile: contravvenendo alla sua funzione di moderatore, Arthur Cain chiuse il congresso londinese con un feroce attacco nei nostri confronti. Ci accusò di aver attaccato l'adattazionismo solo perché contrari alle implicazioni politiche della sociobiologia, tradendo così la nostra imparzialità di scienziati.

Davanti a una critica così virulenta e immotivata, mi avvicinai al podio dove campeggiava il motto della Royal Society "Nullius in verba", chiedendo a uno dei congressisti di farsi da parte per darmi la possibilità di replicare. Quella persona si risentì della mia foga. Ma c'era un buon motivo per insistere: volevo replicare a Cain secondo il mio stile, che è assai diverso da quello della maggior parte degli scienziati. Confesso di non sentirmi molto a mio agio né con i numeri né con gli esperimenti; in compenso ho una formazione umanistica, conosco qualche lingua e sono un appassionato cultore dei classici.

La chiave della mia autodifesa era proprio il motto "Nullius in verba". Quasi tutti credono che significhi "Le parole non contano", o meglio ancora "Alla scienza non servono chiacchiere, ma esperimenti". Ma chi conosce il latino sa che "*nullius*" è genitivo, quindi vuoi dire "di niente", o "di nessuno". E quel motto mi era familiare: si tratta del breve frammento di un famoso verso di Orazio che recita "Nullius addictus jurare in verba magistris", ovvero "Non sono obbligato a giurare sulle parole di nessun maestro".

Dissi allora che Arthur Cain ci aveva frainteso, e che il nostro intervento, presentando un punto di vista alternativo a quello dominante, applicava alla lettera il motto della Royal Society. Quindi, perché tanto astio nei nostri confronti?

Il lavoro sui pennacchi di San Marco è diventato un classico della letteratura evolucionista. Spesso viene citato negli articoli a favore dell'adattazionismo per dimostrare che si è preso in considerazione almeno uno studio della corrente opposta. Non so quale peso abbia veramente esercitato, ma credo sia una fonte importante per un'interpretazione più ampia delle cause dell'evoluzione. Da quel saggio deriva il mio concetto di limite (storico e strutturale) all'adattamento. In seguito dai pennacchi è nato anche il concetto di "ex-attamento".

Credo che nell'adattazionismo vi sia un limite di fondo: la parola adattamento viene utilizzata sia per indicare il processo con cui la selezione naturale definisce una struttura per uno scopo determinato, sia l'effetto di quel processo. Un esempio? Il mio piede è certamente una struttura ben funzionante. Ma solo per il fatto che funziona lo posso definire un adattamento? I darwinisti pensano di sì, sovrapponendo processo e risultato.

Invece la teoria dei pennacchi permette di spiegare l'esistenza di una struttura ben funzionante in modo indipendente dalla selezione. Oggi definisco queste strutture "ex-attamenti", un termine che ho coniato insieme ai paleontologi Elizabeth Vrba e Niles Eldredge.

Gli ex-attamenti, contrapposti agli adattamenti, sono strutture utili perché cooptate. Sono "ex-atte": atte a qualcosa pur non essendo progettate per esserlo dalla selezione naturale. I darwinisti non possono negare la loro esistenza, anche se si affrettano ad aggiungere che si tratta di eventi molto rari e insignificanti. Tuttavia l'esempio dei pennacchi dimostra che il fatto di essere conseguenza di qualcos'altro non li rende necessariamente insignificanti.

Poiché Arthur Cain ha sollevato la questione delle implicazioni politiche delle teorie biologiche, voglio dire la mia. Io e Niles Eldredge abbiamo pubblicato il primo lavoro sull'equilibrio punteggiato nel 1972. Cinque anni dopo ho scritto un aggiornamento della teoria, considerandone le fonti sociali e psicologiche. Sarebbe stato ipocrita da parte mia ricondurre la teoria avversaria - quella del gradualismo - a un particolare contesto sociale e ideologico e spacciare l'equilibrio punteggiato come pura verità scientifica. Come il gradualismo mi sembra il frutto del liberalismo vittoriano, così ritengo che la nostra teoria - che prevede un tipo di cambiamento discontinuo - affondi le sue radici nel pensiero di Hegel e di Marx. Non per nulla sono stato allevato da un padre marxista, quindi conosco bene questi concetti.

Detto questo, non credo che la mia formazione culturale possa essere utilizzata per verificare o confutare la teoria degli equilibri punteggiati. Al massimo può spiegare perché sia venuta in mente a me e non a un altro, ma non può dire molto di più di questo. Oltretutto, la maggior parte delle intuizioni in questo campo sono di Niles, che non ha avuto un papà marxista.

Gli storici della scienza distinguono fra logica della giustificazione e logica della scoperta. La prima è indipendente dalle idee politiche e sociali degli scienziati, mentre la seconda ha sicuramente a che vedere con le loro convinzioni personali. Ma la storia personale di ciascuno ha un'influenza davvero minima sul fatto che un'idea sia giusta o no. Deve essere l'esperienza a decretarne la validità.

In ogni campo si finisce col discutere di argomenti che, visti dall'esterno, sembrano inezie. Nessun biologo serio si sognerebbe di mettere in dubbio la correttezza della teoria dell'evoluzione. Essa è senz'altro vera, ma non tutti sono d'accordo sul modo in cui si manifesta. Le divergenze maggiori fra Richard Dawkins e me riguardano il meccanismo e il raggio d'azione della selezione naturale, nonché i gradi di adattamento che produce. Sono dettagli solo in apparenza irrilevanti, che invece definiscono l'essenza stessa del darwinismo.

Per Richard la selezione naturale deve essere onnipotente, perlomeno quando si ha a che fare con i fenotipi, le varie forme degli organismi. Secondo lui essa riguarda essenzialmente i geni. Io invece penso che la selezione naturale avvenga simultaneamente su più livelli, dai geni agli organismi, dalle popolazioni alle specie. Anche su queste entità complesse la selezione è molto efficace, ma non produce necessariamente adattamento. La cosa risulta particolarmente evidente se si segue l'evoluzione lungo i milioni di anni che scandiscono le ere geologiche.

Nel lungo periodo, si scopre che la storia della vita sfugge al controllo adattativo.

Entrano in gioco infatti nuovi fattori contingenti, come le estinzioni in massa e l'emergere di nuove specie per via dell'equilibrio punteggiato. Il successo a lungo termine nei vari gruppi di organismi dipende più dal tasso di speciazione che dalle morfologie costruite dalla selezione naturale. In questo senso il mio modo di interpretare i meccanismi dell'evoluzione è molto diverso da quello di Richard, sebbene i non addetti ai lavori ci accomunino nella grande famiglia degli evoluzionisti.

Secondo me Richard è un iperdarwinista. La genialità del pensiero di Darwin, e la sua natura squisitamente radicale, consiste nell'aver capovolto l'interpretazione del mondo. Prima si credeva che gli organismi fossero così ben congegnati grazie all'intervento diretto di un Dio saggio, benevolo e previdente. Con Darwin la spiegazione viene abbassata al livello degli organismi, che perfezionano le loro caratteristiche attraverso la lotta per la riproduzione, ossia per il loro vantaggio personale. Siamo agli antipodi del creazionismo, poiché il miglioramento degli organismi non nasce dal bene bensì dall'assenza di moralità che caratterizza la vita naturale.

Richard ha voluto spostare il livello di spiegazione al gradino più basso: non sono gli organismi, ma i geni che lottano per riprodursi. Gli organismi sono solo i "veicoli" dei geni, un termine molto dispregiativo che molti colleghi preferiscono sostituire con "interattori". Ma Richard ha torto. E ha torto anche la filosofa inglese Helena Cronin, che nel suo libro *The Ant and the Peacock* sostiene che le idee di Dawkins hanno rivoluzionato la nostra disciplina. A parte le mie opinioni personali, Cronin sbaglia per un motivo puramente numerico, dato che non sono in molti nel nostro campo a prendere in seria considerazione questa teoria. Filosofi e biologi come Elliott Sober, Richard Lewontin e Peter Godfrey Smith l'hanno confutata sia dal punto di vista logico sia da quello empirico.

In natura sono gli organismi che lottano fra loro. Se essi potessero essere definiti come un'addizione cumulativa di quello che fanno i geni, allora si potrebbe ricondurli a essi. Ma non è così, perché gli organismi hanno miriadi di caratteristiche emergenti. In altre parole, i geni interagiscono in modo non lineare; questa interazione definisce l'organismo, il quale non può essere ridotto a una mera sommatoria dell'azione di quel gene o di quell'altro. È chiaro infatti che quando in un organismo si manifestano caratteristiche emergenti dovute all'interazione non addizionale fra entità di un livello inferiore, queste caratteristiche non possono essere ridotte a tali entità. Per far questo bisognerebbe essere in grado di dire in che percentuale interviene ogni gene, cosa palesemente impossibile. Si tratta di un'argomentazione di tipo filosofico, puramente tecnica, che prova non solo l'inadeguatezza, ma l'errore in cui è caduto Dawkins.

Certo le sue idee, perlomeno dal punto di vista sociologico, sono molto affascinanti. E lo sono anche da un punto di vista riduzionista, perché radicalizzano ulteriormente la posizione darwiniana: dal Dio creatore agli organismi in lotta per la sopravvivenza, fino addirittura ai loro geni.

Il paradigma della selezione genetica non ha mai attratto molte persone. Invece la generazione prima di Dawkins, che lavorava negli anni Cinquanta, credeva in una forma classica di adattazionismo darwiniano, incentrata sull'organismo. Un'interpretazione che non giudico sbagliata ma riduttiva. Oggi questa tendenza domina la scena evoluzionista, nonostante i nostri tentativi di scalzarla facendo leva sulla paleontologia. Quello che ci stiamo sforzando di dimostrare è che l'evoluzione non può essere spiegata con il semplice meccanismo dell'adattamento degli organismi e delle popolazioni.

Anche se mi trovo ai margini dell'ortodossia, sono convinto che la selezione naturale sia una forza di importanza enorme. E credo che Dawkins sia il miglior interprete vivente del darwinismo. In un certo modo, è la reincarnazione di un razionalista ateo del secolo scorso. Qui sta anche il suo limite: Dawkins è il più geloso

depositario dell'ortodossia. Per lui tutto ciò che esiste è frutto dell'adattamento e va ricondotto alla competizione fra i geni, e in ciò sbaglia: come esiste la selezione fra i geni, esiste anche fra gli organismi e le specie.

Mi piacerebbe chiedere a Richard perché secondo lui conta solo la complessità organizzata adattativa. Come darwinista, anch'io la ritengo importante, ma non credo che sia sufficiente per spiegare quello che succede in natura. Perché insiste a interpretare i grandi mutamenti avvenuti durante le ere geologiche in chiave darwiniana, quando non lo sono? In lui prevale la cieca convinzione che la classica idea dell'adattamento debba pervadere tutta la teoria dell'evoluzione.

Comunque Richard e io siamo sicuramente quelli che sanno scrivere meglio di evoluzione. Lui scrive di teorie microevoluzioniste in un modo che io non condivido. Io invece studio i fossili e la macroevoluzione, argomento che lascia Richard molto freddo. Lui studia l'evoluzione nella piccola scala degli organismi biologici, mentre io considero la grande scala della storia della Terra.

È molto difficile dire se oggi Darwin sarebbe un darwinista ortodosso. Stando alle sue idee, direi proprio di sì. Ha sempre cercato di applicare la teoria della selezione a tutti i costi. Le poche eccezioni alla regola - si veda la celebre selezione di gruppo - sono state riservate a situazioni molto particolari, come l'evoluzione del comportamento morale dell'uomo. Certo si tratta di un'eccezione importante, visto che ci riguarda. Tuttavia resta un'eccezione, che non può riguardare altre specie perché è circoscritta a individui dalle capacità cognitive molto sviluppate; in altre parole, a chi è sensibile "all'approvazione o alla disapprovazione dei suoi simili", per usare le sue parole.

D'altra parte, continuando con le congetture psicologiche, credo che un pensatore così brillante e audace come Darwin s'interesserebbe sicuramente a fenomeni quali le estinzioni in massa, gli scontri fra asteroidi e perfino l'equilibrio punteggiato. Non era così sprovveduto da credere che la scienza si sarebbe fermata dopo la sua morte.

stuart kauffman Steve è molto intelligente e creativo. Ha una padronanza completa della paleontologia e della biologia evoluzionistica. Gould ci ha aperto gli occhi sul cosiddetto equilibrio punteggiato, che spiega il susseguirsi di fasi statiche e di cambiamenti improvvisi nell'evoluzione di una specie. Il dilemma è questo: il cambiamento si arresta per lunghi periodi; ma se le mutazioni ci sono sempre, perché gli organismi non continuano a cambiare? Evidentemente perché hanno raggiunto un buon grado di adattamento, e perché vivono in un ambiente stabile. Quella di Gould è una riflessione fondamentale.

Parlare con lui, o ascoltarlo mentre tiene una conferenza, è un po' come giocare a tennis con qualcuno molto più bravo di te: ti fa giocare meglio di quanto non saresti in grado di fare. Per anni Steve ha cercato di scoprire il principio ordinativo che agisce in biologia senza dover ricorrere sempre alla selezione naturale, come vuole il credo evoluzionista. Certo, si può sempre dire che il piede è frutto dell'evoluzione perché serve a camminare: nessuno però lo può provare. Considero Steve un mio naturale alleato, perché anch'io sto cercando di trovare le fonti dell'ordine naturale, senza dover sempre tirare in ballo la selezione.

marvin minsky Ammiro profondamente Stephen Gould per la sua abilità nello spiegare i meccanismi dell'evoluzione che stanno dietro a ciò che osserviamo. Per costruire le sue ipotesi, Gould riesce a combinare sia i principi generali sia i minimi particolari dei campi di ricerca più disparati: ha una capacità di sintesi eccezionale, ma quello che mi colpisce ancora di più è la chiarezza, l'eleganza delle sue descrizioni.

niles eldredge Per me Steve è come un fratello. Quando siamo insieme, discutiamo su ciò di cui non siamo d'accordo, anche se tutti cercano di farci passare l'uno per la fotocopia dell'altro. Invece no, abbiamo delle divergenze. Per esempio, quando lavoravamo ai primi articoli sull'equilibrio punteggiato, io pensavo che fosse più una questione di "modo", mentre Steve era convinto che la variabile fondamentale fosse il "tempo", per usare i concetti del libro di George G. Simpson *Tempo and Mode in Evolution*. Allora avevamo un'interpretazione diversa del significato della teoria, e probabilmente l'abbiamo ancora adesso.

Non ho mai incontrato una persona più intelligente e operosa di Steve. È uno studioso di enorme valore, e nessuno è più pronto di lui nel cogliere l'essenza di un argomento. Fin dai tempi dell'università, per me era l'esempio di come anche i giovani possono, anzi, devono pensare criticamente e venire allo scoperto con le proprie idee.

L'unico svantaggio di lavorare con Steve è che qualche volta ti senti un po' relegato nell'ombra, e sei considerato solo un suo apostolo. Ma i benefici superano senz'altro i lati meno positivi. E oggi siamo più amici di quanto non lo siamo mai stati.

murray gell-mann Ho collaborato con Stephen Jay Gould nella causa legale *Edwards contro Aguillard*: il famoso caso dei creazionisti della Louisiana. Ci siamo appellati alla Corte Suprema per ottenere l'incostituzionalità di una legge che imponeva ai professori di scienze della Louisiana di dedicare lo stesso tempo di insegnamento al creazionismo e all'evoluzionismo. Una vera pazzia, dato che l'evoluzionismo è scienza, mentre il creazionismo è un dogma religioso. È un ricordo piacevole, perché ci diedero ragione sette giurati su nove.

francisco varela Mi sento molto vicino alle principali idee di Steve Gould, e ho imparato molto dalla sua critica al programma adattazionista. Io sto lottando da anni per dimostrare che il cervello non è una macchina che raccoglie informazioni e crea una perfetta rappresentazione del mondo esterno, ma qualcosa di molto diverso. Lo stesso accade nell'ambito dell'evoluzione. Nella visione darwiniana tradizionale - e semplicistica - l'adattamento consiste in un perfetto accomodamento a un dato ambiente. Secondo Gould, invece, vi sono fattori intrinseci all'evoluzione che sono altrettanto importanti nel modellare la nicchia e la forma delle specie. Ed è proprio quello che io sto cercando di dire a proposito del cervello, o del sistema immunitario: le critiche all'adattazionismo postdarwiniano sono molto in sintonia con il mio lavoro.

Ma ciò che ammiro di più in Gould è la sua capacità di comunicare con il grande pubblico. Chiunque legga *La vita meravigliosa*, per esempio, si accorge di come sappia chiarire gli argomenti più astrusi e nel contempo offrire al lettore una nuova interpretazione della biologia.

Per quanto riguarda il dibattito fra Gould e Dawkins, dico brutalmente che Gould ha ragione e Dawkins torto.

j. doyne farmer Stephen Jay Gould è uno scrittore eccellente, dal pensiero lucido, con un vero talento per la divulgazione scientifica. Lo definirei l'Herbert Spencer dei nostri giorni. Non conosce la teoria della complessità, e tanto meno è interessato alla prospettiva della vita artificiale.

Gould è della vecchia scuola: un biologo senza una formazione matematica. Anche se conosce la fisica, non sta cercando in nessun modo di portare la biologia evoluzionistica ai suoi livelli di astrazione.

Steven Pinker Nell'autorevole storia del pensiero biologico di Ernst Mayr, viene osservato con ironia che, fra i biologi, i paleontologi sono i più scettici sulla selezione naturale. Probabilmente questo dipende dal fatto che i paleontologi studiano gli organismi dopo che si sono tramutati in roccia. Pertanto lo studio delle funzioni degli organi non sta certo in cima ai loro pensieri. Secondo il genetista dell'evoluzione John Maynard Smith, anche gran parte degli scritti di Gould esprime il tipico scetticismo del paleontologo, che con la selezione naturale non riesce a spiegare i modelli di lungo periodo della storia della vita. Secondo Gould, infatti, il semplice meccanismo della selezione non spiega perché un certo animale finisce per rimpiazzarne un altro nell'arco di decine di milioni di anni.

Per la verità, i darwiniani moderni come Maynard Smith, Richard Dawkins e George Williams, non si sognano lontanamente di sostenere il contrario. Anzi sono i primi a riconoscere che molti fenomeni di macroevoluzione non possono essere spiegati con la selezione naturale: come per esempio l'estinzione dei dinosauri, che potrebbe essere stata provocata dall'impatto di un asteroide o di una cometa con la Terra. Detto questo, però, la loro attenzione di biologi va comunque alla selezione naturale, di cui sanno apprezzare appieno il potere nella formazione degli organismi complessi.

Spesso i dibattiti scientifici assomigliano a dialoghi fra sordi. Alcuni ricercatori credono di essere in conflitto con altri, mentre in realtà stanno semplicemente studiando altre cose, o la stessa cosa da punti di vista diversi. Pensiamo alle critiche di Gould a Dawkins, a Helena Cronin e a quelli che lui chiama sociobiologi: costoro si avvalgono della selezione naturale dove non se ne può fare a meno, cioè per interpretare forme e comportamenti complessi. Gould invece si occupa di problemi quali le estinzioni in massa o le differenze fra le striature colorate sui gusci delle chioccioline, dove la selezione naturale non c'entra.

Amo molto gli scritti di Steve Gould, che mi hanno insegnato un bel po' di biologia. E condivido alcune delle sue tesi, come la mancanza di progresso nell'evoluzione, la nuova interpretazione della filogenesi e l'importanza degli eventi storici contingenti nell'evoluzione.

In altri casi mi convince meno. In primo luogo, non credo che Gould riconosca completamente la complessità dei nostri processi mentali inconsci quotidiani: ha infatti tracciato fuorvianti analogie fra mente e computer. In esse suggerisce che, come un computer può giocare a scacchi, così il cervello potrebbe essere stato destinato a svolgere certe funzioni e poi impiegato per altre. È un paragone improprio. Non si può far giocare a scacchi un computer se qualcuno non lo ha programmato a questo fine, e la stessa considerazione vale per il cervello umano: le funzioni che svolge non possono essere frutto del caso. In natura deve esistere qualcosa di equivalente al programmatore che fa giocare a scacchi il computer. E questo qualcosa è la selezione naturale.

Nicholas Humphrey Richard Dawkins e Steve Gould continuano a discutere di cose vecchie. Dovrebbero smetterla! Sono successe tante cose dalla pubblicazione del *Gene egoista* e dai primi lavori di Gould. Ora ci troviamo in un territorio nuovo, che possiamo chiamare "evoluzione della evolvibilità": oggi ci si chiede se, al mutare delle circostanze, la selezione naturale si applichi alla stessa abilità di evolversi. E abbiamo sempre più prove che in certe situazioni i sistemi biologici possono essere più o meno adattati a evolversi.

Un esempio semplice è quello del sesso: gli organismi che si riproducono sessualmente sono molto più abili a evolversi. Anche nella biochimica abbiamo le

prime evidenze di tipi di dna che riescono a evolversi meglio di altri. Queste nuove idee potrebbero risolvere gran parte della disputa fra Gould e Dawkins.

brian goodwin Stephen Jay Gould ... Un nome quasi magico, non è vero? Secondo me è un paradosso vivente: anche lui in fondo è un darwinista che crede alla selezione naturale come l'arbitro finale, la causa ultima dell'evoluzione. Secondo me, invece, la selezione naturale spiega molto poco; Stephen sembra esserne consapevole quando parla di morfospazio e ammette che dobbiamo cercare di capirlo. Per me è proprio qui che vanno cercate le ragioni della forma e della tassonomia in natura.

Rispetto molto Gould, ma le nostre strade si stanno divaricando. Lui crede che la biologia sia una scienza storica, in cui la selezione naturale decide cosa deve o non deve sopravvivere. A me sembra molto più interessante porsi la domanda: "Che cosa emerge?". Stephen intuisce l'importanza della questione ma non sta cercando una risposta. Secondo lui, io sto insistendo troppo sugli aspetti dell'emergenza, della morfologia e della morfogenesi.

steve jones Per dirla in modo irriverente, Steve Gould è un biologo delle chioccioline andato a finire male. Le peggiori tempeste avvengono in un bicchier d'acqua, e tutti i bicchieri della biologia evuzionista sono stati riempiti, metaforicamente, dalle sue idee sulle chioccioline e su altre bizzarrie.

Qualche volta i suoi testi sono forzati, ma io credo che valga sempre la pena leggerli, non fosse altro che per l'efficacia dello stile. In un certo senso, c'è troppo baseball nei suoi articoli scientifici: baseball allegorico, speculazioni scritte benissimo ma basate su dati che, per essere franchi e brutali, non sostengono la tesi come dovrebbero. Ma divagazioni come quelle sono davvero perfette per un saggio divulgativo. Mi piace molto leggere i suoi saggi sull'evoluzione, alcuni sono veri e propri capolavori del genere scientifico-letterario. Tuttavia usare quel tipo di approccio per la scienza significa correre costantemente il pericolo di far trionfare la forma sulla sostanza.

George e. Williams Non riesco a capire perché Gould si sforzi di minimizzare l'importanza della selezione naturale e dei mutamenti adattativi che produce. Essa impone dei costi e permette che dai mutamenti adattativi derivino anche molte conseguenze accidentali. Questo deve essere messo in relazione all'adattamento secondo un chiaro ragionamento di causa-effetto. Per esempio, se qualcosa avviene per deriva genetica occorre chiedersi perché in quel caso la deriva è stata più forte della selezione.

Ovviamente il caso ha una parte importante nell'evoluzione a tutti i livelli. Ai livelli più alti, di solito, le dimensioni dei campioni sono più piccole, nel senso che non ci sono tante specie in un genere quanti individui in una specie: in quel tipo di situazione, la sopravvivenza di un'entità e l'estinzione di un'altra è più probabilmente frutto del caso.

Il processo dell'evoluzione lavora sull'esistente: non parte da zero e non produce nulla di radicalmente nuovo. Semplicemente ciò che già esiste è soggetto a nuovi adattamenti. Ecco la ragione per cui un elemento che gioca un ruolo essenziale nella vita di un organismo può diventare accidentalmente utile anche per un altro scopo. Se questo si rivela importante, l'elemento subirà le modificazioni relative al suo nuovo scopo in aggiunta a quello originario.

Steve ha spiegato molto bene il ruolo del caso nella macroevoluzione e la sua dipendenza dalle eredità storiche. Ci possono essere altri scienziati al suo livello, ma

certamente pochi sono in grado di scrivere bene come lui per il grande pubblico.

Mi sembra che sia stato Gould a fare l'esempio dell'ala dell'uccello, che come tutti sanno è un'appendice locomotoria. Esiste però un airone che usa l'ala per ombreggiare lo specchio d'acqua dove sta pescando, in modo da vedere meglio, proprio come facciamo noi con la mano. Questo è un buon esempio di una struttura che si è specializzata per eseguire un compito - il volo - e che accidentalmente serve anche ad altro. Tuttavia noi non possiamo sapere se l'ala verrà modificata in modo da diventare sempre più utile alla visione antiriflesso. Gli ossicini del nostro orecchio interno una volta erano ossa della mascella; oggi invece sono una componente fondamentale dell'udito. In questo caso si è completamente persa la funzione originale a favore di quella secondaria.

L'esempio dell'ala dell'uccello è quello che Gould chiama "ex-attamento" e succede continuamente in natura. Ma quando chiamiamo "ala" l'ala dell'airone, subentra anche un problema semantico. Originariamente quella struttura era infatti una pinna, e solo casualmente si è dimostrata utile per camminare, e ancora accidentalmente si è trasformata in un'appendice utile al volo. Pertanto occorre sempre specificare prima la prospettiva funzionale. Un'ala può essere definita alternativamente un adattamento o un ex-attamento a seconda che la si riferisca al volo o alla precedente capacità di camminare.

daniel c. dennett Noto una regolarità nella storia delle controversie che hanno circondato la teoria dell'evoluzione fin dai tempi di Darwin: i teorici della nuova generazione credono sempre di aver trovato il modo di confutare il darwinismo, di aver ucciso il mostro, o perlomeno di averlo fatto cadere in contraddizione. Come ha osservato John Maynard Smith, i primi mendeliani, cioè quelli che hanno riscoperto Mendel all'inizio di questo secolo, si definivano antidarwiniani. Non si accorsero che Mendel rappresentava invece la salvezza del darwinismo. Nel suo recente libro *Steps Towards Life*, il chimico tedesco e premio Nobel Manfred Eigen presenta il suo lavoro come rivoluzionario, ma poi intitola l'epilogo "Darwin è morto; lunga vita a Darwin", riconoscendo così che il suo contributo costituisce solo una nuova versione del darwinismo. Anche Stuart Kauffman parte definendosi antidarwiniano, fino a quando scopre che il suo lavoro non è altro che un buon sviluppo di alcune parti del pensiero darwiniano.

A tutti piacerebbe passare alla storia come rivoluzionari. Primo fra tutti a Stephen Jay Gould, che cerca di mettere in ginocchio un certo tipo di darwinismo ortodosso. Ma quando si dilegua il polverone, si capisce che le sue non sono rivoluzioni, ma più modestamente contributi interessanti e talvolta importanti. Invece il pubblico non la vede in questi termini e crede che il darwinismo sia morto, "come ci ha dimostrato Stephen Jay Gould". Ebbene, il pubblico si sbaglia di grosso.

Darwin ha scoperto che l'evoluzione è un processo algoritmico, cieco ma eccezionalmente efficace, per produrre gradualmente tutte le meraviglie della natura. È un punto di vista riduzionista solo nel senso che elimina i miracoli, i ganci che scendono dal cielo: tutto quello che ha prodotto l'evoluzione attraverso le ere è stato fatto con semplici gru terrestri. Steve agogna ancora all'intervento di uno di questi ganci celesti: un fenomeno che risulta del tutto incomprensibile agli occhi dei cosiddetti ultra o iperdarwinisti. Secondo Gould l'errore dei darwinisti è di coniugare la nozione di progresso con quelle di gradualismo e di adattamento pervasivo. In questa prospettiva, l'evoluzione sarebbe un processo che rende migliore il mondo sia dal punto di vista globale che locale.

Prendiamo adesso queste tre idee: progresso, gradualismo, adattamento. Non conosco nessun evoluzionista che le abbia combinate insieme come pretende Steve. Anche lui deve ammettere che se si è gradualisti non per questo si è adattazionisti;

oppure che si può essere adattazionista e non credere nel progresso. I suoi attacchi partono insomma da un'idea fissa che non corrisponde a verità.

Anche Steve è un gradualista, deve esserlo per forza. Si è baloccato un po' con l'idea di non esserlo, dando credito per un certo periodo ai "mostri speranzosi" del saltazionismo. Ha cercato in tutti i modi di sostenere questa tesi, ma quando ha visto che non sfondava vi ha rinunciato. Non c'è davvero niente di sbagliato nel gradualismo.

Insieme a Richard Lewontin, Steve ha scritto il famoso articolo sui pennacchi di San Marco: dovrebbe essere un attacco all'"adattamento pervasivo", ma fa proprio cilecca. Infatti l'adattazionismo non è quello spauracchio che dipingono, e anche loro non lo evitano. Anche Steve è un adattazionista, quando gli fa comodo.

Ma il darwinismo è stato davvero impoverito dalla versione di Richard Dawkins, o di John Maynard Smith, gli arciadattazionisti di oggi? Io non vedo ancora questo impoverimento, e certamente non me lo hanno dimostrato le ricerche di Steve.

I suoi tre temi preferiti - la gerarchia dei livelli evolutivi, i limiti all'adattamento e la rilevanza dei tempi geologici - non mancano d'interesse (anche se credo che il suo lavoro recente sull'importanza dell'estinzione in massa sia destinato al fallimento). Ma nessuna di queste tre idee è originale, giacché circolano nella teoria dell'evoluzione fin dai tempi di Darwin. Niente di rivoluzionario, quindi. C'è chi le ha prese sul serio, e chi no.

3. Richard Dawkins

Una macchina per la sopravvivenza

Richard Dawkins è un biologo evoluzionista; lettore nel dipartimento di zoologia presso l'Università di Oxford e ricercatore associato del New College, è autore di *Il gene egoista* (1989², tr. it. 1992), *Il fenotipo esteso* (1982, tr. it. 1986), *L'orologio cieco* (1986, tr. it. 1988) e *River out of Eden* (1995).

Qualche tempo fa mi è capitata una cosa curiosa. Per una mia intervista, una televisione giapponese ha ingaggiato un attore inglese travestendolo da Darwin. Durante la trasmissione io dovevo illustrare il neodarwinismo moderno a mister Darwin, suscitando i suoi commenti stupiti e soddisfatti. Sono convinto che Darwin apprezzerebbe davvero le nuove interpretazioni delle sue idee; sappiamo infatti quanto fosse turbato dalla genetica. Ma purtroppo la genetica a quei tempi era compresa solo da Mendel, che anche per Darwin era un perfetto sconosciuto.

Se solo Darwin avesse letto Mendel! Una grande tessera del puzzle sarebbe andata subito al posto giusto. Darwin non riusciva a spiegarsi il rimescolamento dei fattori ereditari: a quel tempo si credeva che i figli fossero un miscuglio dei genitori, così come il grigio è la tinta che si ottiene da una vernice bianca e una nera. Ma se ciò fosse vero, la selezione naturale non potrebbe funzionare, perché si perderebbe la variazione. Diventeremmo cioè tutti di un grigio uniforme.

Darwin cercò a lungo una soluzione, perché è evidente che gli organismi non tendono al grigio, e le generazioni dei nipoti non sono più uniformi di quelle dei loro nonni. L'informazione vitale che gli mancava era la genetica mendeliana, nonché la genetica delle popolazioni, frutto del neodarwinismo degli anni Trenta. Darwin ne

sarebbe stato entusiasta, e oggi credo che gli piacerebbero anche le idee di selezione di parentela e del gene egoista.

Io interpreto l'evoluzione dal punto di vista del gene non perché sia un genetista, o sia particolarmente interessato all'argomento. Ma quando insegnavo il darwinismo, e in particolare l'evoluzione del comportamento animale, mi ritrovavo sempre a dover fare i conti con i comportamenti sociali, famigliari e sessuali, che mi sembrano spesso di tipo cooperativo. Così mi sono reso conto in fretta che il modo più creativo di interpretare e di insegnare l'evoluzione consisteva nel riferirla completamente ai geni. Sono i geni che, per il loro interesse, manipolano i corpi che li trasportano. L'organismo dell'individuo è una macchina per la sopravvivenza dei suoi geni.

Iniziai a sviluppare questa idea nel 1966, dopo il mio dottorato, quando l'etologo Niko Tinbergen mi chiese di tenere una serie di conferenze a Oxford. In quel periodo ero ispirato dalla teoria della selezione di parentela, appena pubblicata da William D. Hamilton. Così ho cominciato a generalizzare il punto di vista di Hamilton estendendolo a tutto il comportamento sociale e a insegnare ai miei studenti a pensare agli animali come a macchine che trasportano le proprie istruzioni. Al centro della mia ricerca c'era la trasformazione degli organismi individuali in strumenti: interpretavo i loro arti, le dita, i piedi, come leve per proiettare i geni nella generazione successiva.

Circa dieci anni dopo scrissi *Il gene egoista*, il libro che mi ha reso famoso. L'idea di base non era nuova, come hanno creduto in molti: io la consideravo solo un modo diverso e creativo di interpretare il darwinismo classico.

Anche se sono stato io a svilupparlo, il concetto di gene egoista è implicito nel lavoro del biologo August Weismann, a cavallo fra Ottocento e Novecento, e nella sintesi neodarwiniana degli anni Trenta. Negli anni Sessanta la nozione fu ripresa da William D. Hamilton (che allora era a Londra, mentre oggi è mio collega a Oxford) e da George C. Williams dell'Università di New York a Stony Brook.

Nella prospettiva del gene egoista, l'animale non è altro che un robot dotato di cervello, occhi, mani, che trasporta il proprio progetto. Se l'animale viene divorato da un altro muore anche il progetto: per questo gli unici geni che si trasmettono alle generazioni successive sono quelli che hanno reso i loro "robot" abbastanza efficienti da sfuggire ai predatori prima di essere riusciti a riprodursi.

In altre parole, il mondo è popolato di geni che si sono trasmessi attraverso una linea ininterrotta di antenati di successo, poiché se non lo fossero stati quei geni sarebbero scomparsi. I nostri geni sono appartenuti via via ai nostri genitori, nonni, bisnonni, e ciascuno di essi, a parte le nuove mutazioni, proviene da organismi che erano macchine efficienti per la sopravvivenza dei geni. Al contrario, fra noi non vi è più alcuna traccia dei geni dei molti individui che non hanno avuto successo.

Alcuni sono disturbati dall'aspetto riduzionista della selezione naturale basata sul gene, dato che il riduzionismo, in certi circoli, è diventato una parolaccia. Certamente esiste un riduzionismo stupido, che nessuna persona sensata accetterebbe mai: Daniel Dennett lo chiama "riduzionismo ingordo", io l'ho soprannominato "da precipizio". Prendiamo un computer: funziona attraverso elettroni che si muovono lungo i cavi, o i circuiti di semiconduttori. Ma solo un pazzo cercherebbe di spiegare come funziona il programma Word della Microsoft facendo ricorso agli elettroni: questo sì che si potrebbe definire riduzionismo ingordo. E sarebbe altrettanto privo di senso tentare di interpretare la poesia di Shakespeare in termini di impulsi neuronali. Le cose vanno invece spiegate secondo una gerarchia di livelli. Nel caso del computer il livello più alto, quello dei programmi come Word, va interpretato al livello immediatamente sottostante di procedure e sottoprogrammi. Il funzionamento di questi, a sua volta, si spiega scendendo di un altro livello. Dal gradino dei programmi si passa poi ai semiconduttori, fino ad arrivare al pianterreno, cioè ai principi della fisica. Ed è questo sistema ordinato, gradino per gradino, che dovrebbe essere seguito dalla scienza: io lo

definisco riduzionismo gerarchico.

Riduzionismo significa essenzialmente spiegare: ma la sua versione ingorda, quello che in un salto ti porta dal gradino più alto a quello più basso della gerarchia, non riesce a spiegare proprio nulla.

Non ho problemi ad ammettere che il gene è un'astrazione: in fondo si tratta solo di un frammento di dna. Il biologo Seymour Benzer del Caltech ha proposto di non parlare più di un solo gene, ma di dividerlo in recomb, l'unità minima di ricombinazione; mutone, l'unità minima di mutazione; e in cistrone, che equivale al tratto di dna che codifica per una catena polipeptidica.

Sono d'accordo nel considerare il gene non come una particolare unità, ma come un *continuum*, cosa che del resto ho spiegato nel *Gene egoista*. L'unico motivo per cui ritengo importante identificare nel gene l'unità di selezione è che esso si trasmette a molte generazioni successive, e le unità di informazione che si tramandano sono quelle di successo, grazie al loro effetto sui fenotipi. Quindi non importa che l'unità di selezione sia il cistrone, oppure una serie di cistroni. Anche se tecnicamente si tratta di parecchi geni, per la mia teoria contano come uno solo; si tratta cioè di un gruppo di informazioni che si trasmette per molte generazioni e che costituisce il materiale su cui può agire la selezione naturale.

Credo che il mio contributo principale sia la teoria del fenotipo esteso. Il gene è l'unità di selezione che esercita effetti fenotipici, poiché i geni di successo si esprimono nei corpi, per esempio dotandoli di artigli affilati per cacciare meglio le prede. Esiste un nesso causale che porta dal cambiamento del gene al cambiamento del fenotipo attraverso una serie di passaggi intermedi. Alla fine del processo gli artigli diventano più affilati, l'animale caccia più prede, i geni che rendono gli artigli più affilati si trasmettono a una prole più numerosa. Fin qui ci troviamo nell'ambito del darwinismo classico.

Il fenotipo esteso permette alla serie di nessi causali di andare oltre i limiti del corpo, fino a comprendere anche manufatti animali come i nidi o le costruzioni degli uccelli giardinieri. Mentre il pavone usa la sua bella coda per attirare le femmine, l'uccello giardiniere si costruisce una specie di coda con l'erba, cioè un piccolo pergolato fra i cespugli che ha lo stesso scopo della coda del pavone. Pertanto i geni che consentono di costruire pergolati più attraenti sono quelli che passano alle generazioni successive, e anche il pergolato rappresenta un effetto fenotipico dei geni: ecco perché ho usato l'espressione di fenotipo esteso.

Anche in questo caso ci troviamo davanti a un adattamento darwiniano. Perciò devono esistere geni preposti alle costruzioni più disparate, come le tane di sassi delle larve delle mosche, o i nidi di foglie e rametti di altri animali. Devono dipendere dai geni la dimensione dei sassolini, il loro colore, e tutte le altre caratteristiche delle tane. Così quella catena di rapporti causali di cui si parlava prima non si arresta all'organismo, ma continua fino a coinvolgere i sassi o l'erba.

La logica del fenotipo esteso presuppone che qualsiasi cosa nel mondo esterno possa essere, almeno teoricamente, un effetto fenotipico dei geni. La diga di un castoro provoca un allagamento, quindi la formazione di un lago che va a tutto vantaggio del castoro: il lago diventa dunque un adattamento per il castoro, un suo fenotipo esteso. Esistono geni anche per laghi più grandi e più profondi. Dai geni, in altre parole, ha origine una catena di effetti che arriva a influenzare il mondo intero.

I nostri geni assomigliano a una colonia di virus sociali che si contrappongono ai virus anarchici. Sono sociali nel senso che lavorano insieme per costruire il corpo nel modo migliore, e lo fanno solo perché sono tutti destinati a lasciare quel corpo, per trasmettersi alla generazione futura attraverso lo sperma o le uova. Se solo potessero spostarsi attraverso lo starnuto, facendosi respirare dalla loro prossima vittima, c'è

da scommettere che lo farebbero.

È così che si comportano, infatti, i virus anarchici, quelli che non vanno d'accordo fra loro e a cui non importa proprio nulla se muoriamo: vogliono solo farci starnutire, oppure, nel caso del virus della rabbia, far salivare il cane e indurlo a mordere. Ma la gran parte dei nostri geni sono virus sociali, disciplinati e collaborativi, che lavorano per uscire dal nostro corpo tutti insieme, attraverso la riproduzione.

Prima che diventasse di moda porre il gene al centro della selezione naturale, si diceva che se una cosa è buona senz'altro accadrà: perciò alcuni si sono convinti che l'adattazionismo funzioni sempre e che una spiegazione di tipo darwiniano sia sempre a disposizione. Al contrario, se si interpreta correttamente il darwinismo a livello genetico, si limita molto il campo di spiegazione, evitando le conclusioni affrettate. Per affermare che qualcosa è vantaggioso, e quindi accadrà, occorre spiegare che è vantaggioso per i geni che lo hanno prodotto.

I computer rappresentano un'ottima metafora, perché nella loro complessità sono simili agli esseri viventi: l'idea di programmare in anticipo il comportamento di un meccanismo è essenziale per comprendere anche gli organismi. Dal punto di vista del gene egoista, infatti, noi siamo solo robot che garantiscono la sua sopravvivenza; siamo programmati per raccogliere oggetti, mangiare, camminare, agire al posto suo e nel suo interesse.

Ho utilizzato la metafora di un gruppo di alieni che decidono di visitare un'altra galassia. Non potendo spostarsi abbastanza velocemente per raggiungerla, inviano messaggi alla velocità della luce in modo che gli abitanti del lontano pianeta possano costruire un computer e quindi usufruire di quelle informazioni. Ma poiché la galassia è troppo lontana per poter inviare gli ordini uno alla volta, viene trasmesso un programma che anticipa tutte le eventualità possibili e che contiene tutte le istruzioni d'uso. I geni fanno proprio questo: il successo nell'evoluzione consiste nel creare programmi che non si inceppano.

Ho elaborato l'idea del meme culturale per sottolineare che i geni non sono tutto nel mondo darwiniano; e il fatto che molti ricercatori di settori diversi abbiano abbracciato questa metafora prova che essa stessa costituisce un buon meme.

Il meme è l'unità di ereditarietà culturale in grado di replicarsi. Benché il dna sia abilissimo in questo, ciò non significa che sia l'unico a saperlo fare; negli altri pianeti la vita potrebbe sfruttare un altro tipo di replicatore. Il meme è solo un esempio di un diverso tipo di darwinismo che agisce sul nostro pianeta sotto forma di replicatore culturale.

Brian Goodwin la pensa molto diversamente da me e mi accusa di ultradarwinismo. Lui crede di essere antidarwiniano, ma non lo è, perché non ha nessuna teoria alternativa da proporre. Il suo interesse principale è l'embriologia, cioè la scienza che spiega come si sviluppa un organismo, mentre io studio come l'essere si evolve. Per interpretare gli esseri viventi, Goodwin ricorre spesso alla fisica. Utilizza per esempio l'analogia del vortice, di cui le leggi della fisica permettono solo due configurazioni stabili: una spirale in senso orario e una in senso antiorario.

Secondo Goodwin i geni possono limitarsi a cambiare il senso della spirale, da orario ad antiorario. Ma l'idea è accettabile solo per il guscio di una chiocciola o il corno di un montone, che sono appunto a forma di spirale: questo modello, infatti, è bello ed elegante solo in fisica, alle cui leggi Goodwin vorrebbe ridurre tutti i meccanismi d'azione dei geni.

Io non sono contrario per principio alla tesi di Goodwin, secondo cui l'evoluzione consiste solo nella scelta fra una configurazione stabile e un'altra. C'è infatti una continuità fra i nostri punti di vista: io credo infatti che i geni possano trasformare gradualmente tutto ciò che esiste. Secondo me, per esempio, la selezione naturale

riesce a mutare facilmente un corno di rinoceronte grande in un corno piccolo, o più affilato, o meno appuntito, mentre per Goodwin è possibile ottenere solo certe forme di corno. La questione è aperta: se avesse ragione lui, esisterebbero serie limitazioni nel campo d'azione dell'embriologia. Ma il suo non sarebbe comunque un punto di vista antidarwiniano.

Il ramo d'olivo che ho offerto a Goodwin e colleghi, in segno di riappacificazione, verte sulla cosiddetta embriologia caleidoscopica. All'interno del caleidoscopio c'è una manciata di pietruzze che si dispongono casualmente. Ma quando le osservi attraverso un sistema di specchi, le pietruzze compongono un bel modello simmetrico che può assomigliare a un fiore. Agitando il caleidoscopio le pietruzze si spostano a caso, ma sullo schermo si compone un'immagine sempre elegante. Anche le differenti embriologie hanno una natura caleidoscopica, nel senso che piccole mutazioni casuali producono effetti molto complessi e organizzati. Spesso infatti l'embriologia rivela strutture complesse e regolari, come nel caso della stella marina dotata di cinque bracci uguali. Ogni stella marina si evolve secondo i normali processi di mutazione; ma questa mutazione trasforma tutti i bracci e quindi lavora simultaneamente in cinque punti diversi. E la stessa cosa succede ai bruchi o ai millepiedi composti da una lunga struttura di segmenti uguali. Questi sono due esempi che spiegano il concetto di embriologia caleidoscopica.

La selezione naturale a breve termine favorisce ovviamente gli individui abili a sopravvivere e a riprodursi. Ma può esistere un tipo di selezione a un livello superiore che privilegia le embriologie caleidoscopiche, come quelle della stella o del riccio di mare dotati di strutture simmetriche. Ogni tanto, infatti, le embriologie di questi organismi vanno soggette a mutazioni che li rendono più adatti all'ambiente in cui vivono. Quando avviene un'estinzione in massa che svuota un continente, può succedere per esempio che lo spazio lasciato libero venga rapidamente colonizzato da un qualsiasi gruppo di animali dotato di un'embriologia in grado di irradiarsi e di evolversi in una serie di nuove linee.

Le estinzioni sono molto importanti nell'evoluzione. È ovvio che se i dinosauri non si fossero estinti l'intera storia della vita sarebbe stata diversa: probabilmente non esisterebbero i mammiferi. I dinosauri sono scomparsi sessantacinque milioni di anni fa per un motivo che non ha nulla a che vedere con la selezione naturale, ma a causa di una catastrofe. È un evento che accade frequentemente nella storia naturale e di cui bisogna tener conto per ricostruire la storia della Terra. Ma solo la selezione naturale a breve termine, guidata dal vantaggio immediato e che provoca un cambiamento graduale, è responsabile dell'adattamento complesso. L'estinzione invece è il colpo di spugna che offre a una nuova forma di vita, per esempio ai mammiferi, l'occasione per prosperare.

Questo mio punto di vista si esprime nel concetto di "evoluzione della evolvibilità": certe forme di vita - soggette a una selezione di ordine superiore - mostrano una particolare abilità non solo a sopravvivere, come prevede il darwinismo ortodosso, ma anche a evolversi. Ogni volta che ha luogo un'estinzione, una nuova forma di vita comincia a diffondersi; in alcuni casi si può dire che eredita la Terra, come i mammiferi dopo la scomparsa dei dinosauri. Ciò significa che nell'embriologia dei mammiferi c'è qualcosa che ha reso il loro organismo particolarmente adatto a evolversi rapidamente, occupando gli spazi lasciati liberi dalle specie estinte e surclassando le specie concorrenti.

Sono approdato a questa concezione giocando con i "biomorfi", particolari simulazioni informatiche della vita organica generate da quello che ho battezzato "il programma dell'Orologiaio cieco". Facendo girare il programma Life nel computer, ho imparato che certi algoritmi si evolvono più efficacemente di altri. E così sono giunto a immaginare una selezione di ordine superiore che favorisce la capacità di

evolversi.

Stephen Jay Gould sostiene che non c'è progresso nell'evoluzione. In un certo senso siamo tutti d'accordo. Se ci chiediamo perché un gruppo di individui si è estinto - come la fauna degli argilloscisti di Burgess - sono certo che verrà tirata in ballo la cattiva sorte. Come potrebbe essere altrimenti? Nelle ere geologiche può sempre accadere che un asteroide o una tremenda eruzione vulcanica cancelli dalla faccia della Terra una o più specie. Tuttavia, considerando l'evoluzione nel breve periodo all'interno di gruppi di animali - dove assistiamo alle alterne vicende del rapporto predatore-predatore o di quello ospite-parassita - il progresso appare indubbio. Con questo non si vuole affermare che l'evoluzione debba essere sempre progressiva. Ma almeno per un milione di anni una linea di predatori si evolve insieme a una linea di prede: gli uni e le altre diventano sempre più veloci, i loro sensi più acuti, i loro artigli più affilati. Il progresso non è altro che questo: le prede migliorano perché migliorano i loro predatori.

Sono d'accordo nel dire che l'evoluzione non ha un fine ultimo, e tantomeno che l'uomo rappresenta il capolinea di questo progresso: in realtà nessun evoluzionista serio ha mai pensato una cosa di questo genere. Quando Gould si scaglia contro questi presunti difetti del darwinismo, in realtà parte lancia in resta contro i mulini a vento.

La cosiddetta visione pluralista dell'evoluzione - di cui Stephen Gould è il sostenitore più agguerrito - confonde la mia distinzione fra replicatori e veicoli. La selezione naturale agisce sui replicatori, nel senso che quelli che hanno successo tendono a rimpiazzare quelli che non ne hanno. L'affermazione dei primi sui secondi si misura dalla loro maggiore abilità nel costruire i veicoli, ossia i fenotipi, più appropriati. Questi a loro volta si organizzano in una gerarchia di individui, gruppi, specie e così via. Il successo dei veicoli può essere analizzato ai vari livelli di questa gerarchia. Ma quando si parla di replicatori siamo fuori da questo ambito, perché il replicatore è uno solo.

Steve non vuole capire questa fondamentale distinzione. Continua a parlare del gene come se fosse l'ultimo gradino di una gerarchia. Ma il gene ne è completamente al di fuori.

Io e Gould non siamo soltanto divulgatori: le nostre idee influenzano davvero la vita della gente, e soprattutto fanno ragionare gli altri scienziati in un modo più costruttivo. Più che un divulgatore, mi considero un innovatore di questa disciplina: quello che faccio non ha nulla a che spartire con il giornalismo scientifico, che spiega al pubblico in modo acritico l'ortodossia della scienza. Noi andiamo oltre: cambiamo il modo di pensare del pubblico.

Sbaglia tuttavia chi ci considera i due pensatori di punta dell'evoluzionismo: le grandi forze creative in questo campo oggi sono William D. Hamilton, John Maynard Smith e George Williams. Hamilton è l'inventore della selezione di parentela; adesso si sta concentrando sul sesso, un grande punto interrogativo nella teoria dell'evoluzione di cui occorre giustificare l'esistenza. A questo proposito Hamilton ci ha già fornito l'ultima e più promettente teoria, secondo la quale il sesso sarebbe un adattamento contro i parassiti. Alla luce di questa interpretazione rivoluzionaria, l'evoluzione equivarrebbe a una corsa continua e forsennata fatta con il proposito di non muoversi di un passo. E non stupisce che questa originalità provenga da Hamilton, che per tutta la vita ha ispirato generazioni di ricercatori.

C'è chi mi considera un materialista impenitente. Credo che dipenda dalla mia repulsione verso la fatuità dei pregiudizi religiosi. Come scienziato tendo all'appassionata ricerca della verità e mi oppongo a ogni genere di oscurantismo. Se mi accorgo che qualcuno sta facendo una cosa non perché ne è sinceramente convinto ma per qualche secondo fine, oppure se cerca di sembrare più intellettuale, profondo o misterioso di quanto non sia, posso diventare perfido. Riguardo alla religione, credo

che l'universo sia un posto già abbastanza inospitale senza doverlo complicare ulteriormente con una congerie di misteri senza capo né coda. Da un punto di vista puramente estetico, non si può negare che il cosmo sia grandioso, pieno di una bellezza difficile da comprendere. Ma la versione che ne danno i credenti è in qualche modo meschina: quella di un povero piccolo universo medievale.

Sono darwinista perché le uniche alternative sono credere in Lamarck o in Dio, e nessuno dei due riesce a offrirmi una spiegazione esauriente della realtà. L'unico principio esplicativo della biologia è il darwinismo. Nessun biologo mette in dubbio l'importanza della teoria dell'evoluzione, eppure ne dobbiamo ancora fare di strada per convincere il grande pubblico: basti pensare al fatto che il 50% della popolazione americana, sviata da persone ignoranti e in malafede, non crede nemmeno nell'evoluzione delle specie.

Negare l'evoluzione oggi equivale a negare che la Terra è rotonda. Perciò è possibile che i biologi evolucionisti passino per arroganti; da molto tempo i fisici non devono più difendersi da questo genere di attacchi.

Negli ultimi tempi mi sto sempre più appassionando ai modelli computerizzati e alla vita artificiale, perché m'interessa indagare sul darwinismo come principio generale dell'universo. Certo sarebbe più interessante andare alla ricerca della vita su altri pianeti, ma dubito che potremo mai incontrarla, sebbene sia convinto della sua esistenza.

L'unico modo per raggiungere un altro pianeta è costruirlo artificialmente con l'aiuto del computer: nel suo mondo di silicio si può viaggiare liberamente, immaginarlo secondo i propri gusti e applicare le regole del darwinismo per vedere cosa succede. Con un po' di fortuna si può scoprire cosa c'è di veramente essenziale in questa teoria.

george c. williams Anche se l'ho criticato, il concetto di replicatore presentato da Dawkins nel *Gene egoista* è senz'altro un importante passo avanti. Ho molto rispetto e ammirazione per Dawkins.

lynn margulis Richard Dawkins è il classico esempio di scienziato "razionale". Intervistato in televisione sull'ipotesi Gaia, ha detto testualmente: "L'idea (di Gaia) non sembra pericolosa o preoccupante a nessuno, tranne che agli scienziati che amano la verità". Questa frase tradisce la sua arroganza. Invitato a discutere con me e Lovelock, ha rifiutato perfino una conversazione telefonica. Come lui sa bene, io ero disposta a fare un viaggio per organizzare un confronto su Gaia. Ma quando Dawkins parla degli "scienziati che amano la verità" allude solo a se stesso. Da questa sua frase emerge tutto il suo solipsismo.

Marvin minsky Di Richard Dawkins adoro l'idea dei memi, cioè delle unità strutturali di conoscenza che sono in grado di riprodursi facendo copie di se stessi da una mente all'altra. Alcuni milioni di anni fa, in qualche nostro antenato si è evoluta una struttura cerebrale specializzata a rappresentare la conoscenza in modo seriale ed esplicito, invece che parallelo e implicito. Questi nostri lontani parenti hanno cominciato così a trasmettere i frutti della loro esperienza attraverso segnali vocali. Da quel momento sono rapidamente migliorate sia le capacità di apprendimento e di rappresentazione della conoscenza, sia - cosa forse più importante - l'evoluzione sociale di idee nuove.

Affinata la capacità di ogni singolo cervello di elaborare le informazioni in modo seriale, la società ha potuto accumulare, infatti, conoscenza in forma parallela. Da

allora, la natura stessa dell'evoluzione è cambiata profondamente: non riguarda più solo i geni, ma anche i memi, le unità culturali. Attraverso la loro trasmissione, un sistema di idee può evolversi autonomamente, senza bisogno di alcun cambiamento biologico. Anche in questo ambito vediamo all'opera i classici meccanismi dell'evoluzione biologica, come la lotta per l'adattamento: basta osservare i filosofi quando riescono a mettere a punto una nuova critica contro i loro avversari. Evoluzione darwiniana e propagazione del meme interagiscono, dando vita così a un nuovo quadro concettuale. In particolare, trovano una giustificazione fenomeni quali la "selezione di gruppo", difficili da dimostrare per le specie più semplici. Sebbene questo concetto non abbia ricevuto una buona accoglienza da parte della maggior parte degli evoluzionisti, io e molti colleghi lo consideriamo di fondamentale importanza.

brian goodwin Io e Dawkins la pensiamo molto diversamente: per Richard il darwinismo è stato una rivelazione divina. Lo definirei uno zoologo a cui improvvisamente è apparso Darwin. "Ecco la verità", ha pensato, "tutti la devono conoscere!". Ed è diventato una specie di predicatore.

Non potrei essere più lontano dal suo punto di vista sulla biologia: una brillante esposizione del riduzionismo biologico neodarwinista che scende fino al rango dei geni. Di Richard apprezzo soprattutto la chiarezza con cui ha saputo spiegare perché dal neodarwinismo sono scomparsi gli organismi. Lui crede di aver afferrato la realtà biologica con i geni, di cui gli organismi sono soltanto l'involucro esterno, i veicoli. Per me invece sono essenziali come lo erano per Darwin: è su questo punto che io e Richard ci scontriamo. Ed è anche il motivo per cui lo considero l'esponente più estremista di una tendenza nefasta della biologia attuale.

Ecco come Dawkins presenta le tesi del neodarwinismo nel *Gene egoista* e nel *Fenotipo esteso*: (1) gli organismi sono costruiti da gruppi di geni il cui scopo è di trasmettere più copie di se stessi; (2) i geni sono, metaforicamente parlando, egoisti; (3) questo egoismo si riflette sulle competizioni fra gli organismi, di cui sopravvivono le varianti più dotate dal punto di vista genetico; (4) la conclusione è che gli organismi perseguono sempre l'obiettivo di migliorarsi, affinando le loro capacità e cercando di scalare vette sempre più alte nel "paese dell'adattamento".

Nelle ultime pagine del *Gene egoista* Richard dice che fra tutte le specie solo gli esseri umani sono capaci di trascendere questo retaggio di egoismo e diventare genuinamente altruisti grazie all'educazione. Leggendo quelle righe ho capito che la sua teoria non è altro che la versione aggiornata dei principi del fondamentalismo cristiano, che possiamo riassumere nei seguenti punti: (1) l'umanità nasce nel peccato; (2) l'egoismo fa parte della nostra eredità; (3) l'umanità è pertanto condannata a una vita di conflitto e di affanni; (4) esiste però una possibilità di salvezza.

Richard non ha fatto altro che trasformare il darwinismo in una nuova versione della teologia cristiana. Si tratta ovviamente di un'eresia, poiché secondo Darwin la forza vitale dell'evoluzione risiede nella materia; ma il resto non cambia. Ho il sospetto che Richard sia stato religioso, e che una volta convertitosi al darwinismo ne abbia fatto la sua nuova fede.

Sono d'accordo con lui riguardo ai cambiamenti su piccola scala: attraverso la selezione naturale l'evoluzione può produrre piccole mutazioni all'interno di una specie. In questo modo è possibile selezionare, per esempio, diverse razze di cani. Ma come fanno i cani a trasformarsi in qualcos'altro? Per rispondere a questa domanda occorre un principio nuovo: il darwinismo spiega solo i piccoli cambiamenti dimenticando le grandi trasformazioni che emergono durante l'evoluzione.

Il darwinismo è nel giusto anche quando sostiene che la selezione naturale riguarda la stabilità dei cicli di vita in vari habitat. Per sopravvivere, una specie deve

avere un tipo di stabilità dinamica riferita a un habitat particolare. È un'osservazione corretta, anche se piuttosto superficiale.

Sarebbe ben più importante scoprire come funziona questa dinamica, come l'evoluzione riesca a generare forme diverse. Secondo Dawkins l'accumulazione di piccole mutazioni genetiche provoca differenze significative che spiegano le specie, i generi, gli ordini e le famiglie; insomma, tutta la trafila della tassonomia. Esistono tuttavia diverse categorie di forma, e qui inizia il compito della fisica e della matematica. Credo che gli organismi si distinguano in tipi naturali, laddove i generi e le specie sono simili agli elementi della chimica e della fisica: forme distinte e possibili in natura come lo sono l'idrogeno, l'ossigeno, l'azoto e il carbonio. Gli atomi di questi elementi si suddividono a loro volta in una varietà di isotopi, i quali tuttavia mantengono inalterate le "qualità" degli elementi. Gli isotopi di carbonio, per esempio, hanno sempre la chimica del carbonio. Lo stesso si può dire delle specie viventi. Al loro interno possono avvenire molte modificazioni, ma appartengono sempre a un tipo naturale. Perciò abbiamo bisogno di una teoria della forma biologica che coinvolga anche la fisica e la matematica.

steven pinker La lettura dei tre libri di Richard Dawkins ha rappresentato una svolta nella mia formazione intellettuale. Quando ero studente a Cambridge, nel Massachusetts, mi ero lasciato convincere dalle teorie di Gould e di Lewontin, che all'epoca dominavano in quell'ambiente accademico intriso di snobismo di sinistra. Il programma antiadattazionista mi aveva sempre procurato qualche inquietudine, ma inizialmente lo attribuivo alla mia ignoranza. Quando ho letto i libri di Dawkins, specialmente *Il fenotipo esteso*, sono rimasto colpito dal modo brillante e rigoroso in cui analizza il concetto di selezione naturale.

Ho subito apprezzato il punto di vista di Williams e di Dawkins perché cerca di spiegare quella parte della biologia di cui mi occupo anch'io: la complessità adattativa. Io studio processi mentali ai quali non si fa caso proprio perché funzionano alla perfezione. Non mi interessa spiegare le vette gloriose dell'intelletto umano, il genio di un Mozart o di un Einstein. Mi interessano aspetti prosaici, come camminare in una stanza, porre una domanda, riconoscere un volto.

Concentriamoci un istante su queste banalità e immaginiamo le caratteristiche che dovrebbe possedere un computer per poterle riprodurre alla perfezione. Occorrerebbe una quantità spaventosa di conoscenze e di circuiti, di software e di hardware; anni, forse secoli di lavoro. Williams e Dawkins sottolineano la necessità di ricorrere alla selezione naturale per spiegare le caratteristiche meno probabili e più raffinate degli organismi. E poiché gran parte della mente consiste appunto in "circuiti" improbabili e raffinati, viene spontaneo concludere che essa è il frutto dell'adattamento e della selezione naturale. Solo chi non presta attenzione al modo in cui funziona la mente può pensare alle sue attività come al frutto casuale di un cervello particolarmente voluminoso, o di fortunate mutazioni genetiche. In realtà dietro la mente mi sembra proprio di scorgere lo zampino di Darwin.

niles eldredge Ho incontrato Richard solo nel 1994. Prima di allora mi aveva scritto una lettera dicendomi che stava per iniziare *The Oxford Surveys in Evolutionary Biology* e che avrebbe gradito un mio contributo. Proprio in quei giorni la rivista "Evolution" aveva rifiutato un lavoro scritto da me e Stan Salthe. L'ho mandato a Richard, avvisandolo che probabilmente non sarebbe piaciuto a un riduzionista come lui, tutto dalla parte dei geni, perché riguardava il concetto di gerarchia. Pochi giorni dopo ho ricevuto una lettera in cui scriveva: "E perché mai non dovrebbe interessarmi la gerarchia?". È vero, anche Dawkins parla di gerarchie, ma in

un altro senso.

Dawkins è molto importante per la nostra disciplina, e anche se non lo fosse resta una delle persone più divertenti che conosca. Perfino quando ha cercato di farci a fette, devo riconoscere che lo ha fatto con stile e muovendo critiche molto efficaci.

Richard non è solo un abile comunicatore; è anche un pensatore originale. Poi non va dimenticato che tutto questo ultradarwinismo sta dando lavoro a un sacco di gente. Forse è l'aspetto più positivo della corrente riduzionista inaugurata da Williams e proseguita da Richard: dare lavoro a palate a genetisti e sociobiologi.

w. daniel hillis Se Dawkins ha un difetto, è di essere troppo chiaro. I suoi libri fanno credere ai lettori che le cose sono molto più semplici di quanto non siano in realtà. Succede lo stesso con gli scritti di Marx, la cui lettura crea istantaneamente esperti in storia e in economia. Idee come quella dei geni egoisti, dei memi, del fenotipo esteso sono potenti, appassionanti e rivoluzionarie. Purtroppo molti tendono a fraintenderle e ad applicarle in modo troppo ampio. Con queste persone mi capita spesso di dover discutere e perdere un sacco di tempo. Come vedete, questo Dawkins è un tipo pericoloso. Come Marx. O come Darwin.

stuart kauffman La mia posizione e quella di Richard sono diametralmente opposte. Richard è un erede del darwinismo puro che vuole interpretare tutto in funzione della selezione naturale. Ha deciso di ignorare la teoria dell'ordine spontaneo semplicemente perché non fa parte della tradizione darwiniana. In definitiva, Richard è più darwinista di Darwin.

Dawkins ha elaborato un programma per computer in grado di generare morfologie e l'ha descritto nell'*Orologiaio cieco*. Ho avuto modo di vederlo in funzione e l'ho trovato divertente. Ma è più fumo che arrosto. È ovvio che se giocherelli con il genotipo, creando in esso mutazioni casuali, puoi generare una o più morfologie diverse. Puoi anche selezionare una discendenza di morfologie, cosa peraltro utilissima per farsi almeno una vaga idea di come proliferano le filogenesi. Ma quello che non mi convince dei meccanismi di sviluppo postulati da Richard è la mancanza di autorganizzazione e di naturalezza: sono programmi informatici che combinano arbitrariamente certe figure. La biologia reale è un'altra cosa.

Se ho capito bene, nel programma dell'*Orologiaio cieco* ci sono piccoli sottoprogrammi che disegnano sullo schermo figure di animali. In essi si trovano istruzioni per determinare la lunghezza degli arti, le dimensioni del corpo, e tutte le altre caratteristiche necessarie alla costruzione di un organismo. Il giochetto consiste nel far variare i parametri in modo da ottenere nuove forme. Il meccanismo di sviluppo con cui lavora Richard consiste in un piccolo algoritmo che disegna una linea. Se cambia l'algoritmo, cambia anche la morfologia del disegno.

Il guaio è che il modo in cui un programma di computer disegna linee su uno schermo è completamente arbitrario. Prendiamo un caso di morfologia reale: se si versano lecitina o colesterolo nell'acqua si formano vescicole di lipidi, chiamate liposomi, che assomigliano alla membrana di una cellula. Nell'acqua i lipidi assumono spontaneamente questa forma a basso contenuto di energia: non si tratta di qualcosa di arbitrario, ma di una morfologia che dipende dalle leggi della fisica e della chimica. Nel caso specifico, è una membrana bilipidica stabile, che non cambia modificando i tipi di lipidi, la temperatura, la soluzione e il solvente. Questa tendenza alla stabilità è una caratteristica fondamentale della morfologia.

Il computer potrebbe creare modelli di questo genere, ma non con il programma di Dawkins.

daniel c. dennett Ho conosciuto Richard dopo aver letto *Il gene egoista*. Ed è stato comico, perfino impressionante scoprire quanto siamo simili. La pensiamo allo stesso modo su così tanti argomenti che dobbiamo stare attenti a non parlare troppo fra noi se non vogliamo darci sempre ragione. Abbiamo in comune anche molte debolezze e ce le perdoniamo reciprocamente. Fa piacere trovare qualcuno con una formazione e interessi così diversi, che condivide esattamente il tuo punto di vista!

Alcuni accusano Dawkins di essere un "riduzionista ingordo", un semplificatore che vuole risolvere i problemi in pochi passaggi. Ma anche se così fosse, non mi sembra un peccato grave. L'approccio algoritmico di Dawkins è volutamente semplificato, come lui stesso ha chiarito in più di un'occasione. Nulla vieta di renderlo più complesso, se la cosa può essere utile. Dawkins non ha torto: caso mai qualche volta è un po' troppo ottimista.

Il disaccordo fra Gould e Dawkins riguarda essenzialmente la strategia. Sotto questa luce, si può anche riconoscere a Gould una parte di ragione. Il rapporto fra vita ed evoluzione, e in particolare la capacità di evolversi, è infatti più complesso di quanto ammetta Dawkins.

Maynard Smith ha fatto osservare molto acutamente che esistono due concezioni contrapposte della natura: quella che potremmo definire del cittadino e quella del campagnolo. Ecco, mi sembra che la prima sia tipica di Gould, mentre la seconda sia quella di Dawkins e Maynard Smith. Proviamo a fare un piccolo esperimento. Immaginiamo di resuscitare Aristotele e di catapultarlo su un'autostrada nell'ora di punta. Certamente rimarrebbe molto sorpreso: ma cosa lo stupirebbe di più? L'esistenza delle automobili e dei camion? O la loro grande varietà? Probabilmente ambedue i fatti sono degni di nota e hanno bisogno di una spiegazione. Dawkins e Maynard Smith sono più impressionati dall'eccezionalità del progetto, dal fatto che in certe condizioni sia possibile realizzare meraviglie ingegneristiche di questo tipo. Gould è più interessato al fatto che i diversi modelli siano così diversi l'uno dall'altro.

In fondo questi aspetti sono le due facce di una stessa medaglia. Se non ci fosse tanta varietà di modelli, non si potrebbe raggiungere un'alta qualità progettuale. Possiamo facilmente immaginare un pianeta che per miliardi di anni è stato abitato da poche e semplici forme di vita, capaci solo di fotosintesi. Per molto tempo la Terra si è trovata in queste condizioni. Adattazionisti come Dawkins e Maynard Smith non possono negare che la diversità sia un motore che porta all'ottimizzazione. Nello stesso tempo, le competizioni creano l'occasione per la diversificazione, facendo in modo che il sistema si autoalimenti. Queste due idee non sono in contraddizione: anzi, secondo me vanno d'accordo come il cacio e i maccheroni.

steve jones Dawkins ha scritto il più importante libro di teoria generale dell'evoluzione dalla fine della seconda guerra mondiale: *L'orologio cieco*. All'apparenza è un libro semplice, salta alcune parti, come l'autore è il primo ad ammettere, ma trasmette l'essenza dell'argomento come nessun testo è mai riuscito a fare. All'inizio della sua carriera, Dawkins era uno che si sporcava le mani - e non metaforicamente - perché faceva esperimenti sul comportamento alimentare dei gallinacci. C'è una regola generale secondo la quale la maggior parte degli scienziati non diventano famosi fino a quando non smettono di fare esperimenti, e Richard ne è l'esempio perfetto.

Dawkins è il divulgatore più importante nella sua disciplina. Ha fatto un gran bene all'evoluzionismo, rendendo la materia accessibile a tutti. Ha anche avuto il coraggio di applicare idee di una semplicità brutale, come quella del gene egoista, ai campi più disparati. E nella maggior parte dei casi è riuscito a dimostrare che quelle

idee erano giuste a dispetto della loro semplicità.

In un certo senso Richard Dawkins è stato il Martin Lutero della biologia. È lui che ha sfrondata la chiesa evoluzionistica di tutto il misticismo ideologico che si portava appresso per porsi le domande davvero fondamentali e interessanti.

4. Brian Goodwin

La biologia non è altro che una danza

brian goodwin insegna biologia alla Open University, nei pressi di Londra. Ha scritto *How the Leopard Changed its Spots* (1994).

La nuova biologia è una scienza esatta di sistemi complessi, che s'interessa alla dinamica e all'ordine emergente. Vista in questa prospettiva, la biologia cambia radicalmente. Invece delle metafore dei conflitti, della competizione, dei geni egoisti e dell'adattamento, per descrivere l'evoluzione propongo l'immagine di una danza priva di un fine. Come dice Stephen Jay Gould, l'evoluzione non ha scopo, progresso, o direzione. È una danza attraverso il morfospazio, lo spazio delle forme degli organismi.

Riuscirà la biologia a saldarsi con la fisica, ad assumere il suo metodo, le sue nozioni di regolarità e di ordine? Il nuovo movimento sta cercando di trasformare la biologia da scienza storica, darwiniana, a scienza di strutture. Il suo obiettivo non deve più essere quello di ricostruire la storia della vita sulla Terra, bensì di ricercare le leggi che riguardano la dinamica del processo di vita. Come la fisica. Quando avremo individuato queste leggi, potremo dire: "La storia ha seguito questo percorso per rivelare l'ordine sottile dello stato vivente, che è un tipo particolare di organizzazione della materia".

Come biologo teorico, sono convinto che la vita si organizzi in un sistema dinamico molto complesso, di cui sappiamo ancora molto poco. A una concezione statica degli organismi - incardinata sul concetto di omeostasi - va sostituita una rappresentazione di tipo dinamico. Basta considerare il modo peculiare in cui ogni organismo mette in atto sistemi di controllo che lavorano su diversi ritmi e frequenze, scanditi sul tempo degli orologi biologici.

Le variabili fisiologiche non sono costanti, ma ritmiche: la temperatura corporea, la concentrazione di sostanze nel sangue, il battito cardiaco, i ritmi circadiani, i cicli mestruali sono fenomeni studiati dalla cronobiologia. Io non ho inventato il termine, ma ho senz'altro dato un grande impulso alla visione dinamica degli organismi come entità organizzate ritmicamente.

La medicina di oggi può imparare molto dalla cronobiologia, che suggerisce di sincronizzare le terapie sui ritmi dell'organismo. Oggi si comincia a parlare anche di patologia dinamica: il biologo teorico Arthur Winfree ha spiegato, per esempio, perché persone perfettamente sane possono morire improvvisamente di un attacco cardiaco. Questi decessi avvengono per fibrillazione ventricolare, che è una delle tante risposte dinamiche tipiche del cuore. Anche la fibrillazione, infatti, è ritmica, oscillatoria, e

perfettamente naturale; essa tuttavia non consente al cuore di pompare il sangue come dovrebbe e in certi casi può portare alla morte. Il corpo umano è un sistema molto resistente, le cui componenti interagiscono rinforzandosi l'una con l'altra. In alcuni casi, però, all'interno dell'organismo avvengono bruschi passaggi di stato, del tutto naturali dal punto di vista della dinamica del sistema, ma letali per la persona che li sperimenta. Le cosiddette terapie olistiche sembrano funzionare proprio perché mantengono in sintonia fra di loro i diversi sistemi ritmici dell'organismo.

Dopo aver lavorato per molti anni sui ritmi, ho deciso di passare allo studio delle forme biologiche. Questo nuovo filone di ricerca sta mutando il modo d'intendere l'evoluzione, spostando l'interesse dai geni alle forme e alle metamorfosi degli organismi. In pratica stiamo tornando al punto di partenza della biologia moderna, a Linneo e alla classificazione delle specie. Finalmente l'organismo nella sua interezza torna a essere l'entità principale soggetta al cambiamento evolutivo. Occorre poi recuperare il concetto di organismo anche in medicina, negli studi sull'ambiente e nella spiegazione delle dinamiche terrestri, come in parte è già stato tentato con l'ipotesi Gaia. Olistimo è un termine abusato, ma sicuramente esprime bene la nuova tendenza della biologia.

I cambiamenti su piccola scala e il minuzioso adattamento degli organismi al loro habitat sono spiegati egregiamente dal neodarwinismo. Ciò che resta da chiarire è invece il cambiamento evolutivo su grande scala. Come emerge una nuova specie o un nuovo ordine? Qual è la forza che porta alla progressiva differenziazione di calamari, pesci e pinguini? La scienza oggi sta cercando di capire come dalla complessità si possano sviluppare le qualità emergenti, da cui poi scaturisce l'ordine. Ma è difficile mettere d'accordo la ricerca teorica come l'evidenza biologica, dato che i modelli computerizzati di oggi sono ancora molto astratti, e le loro applicazioni agli organismi ancora incerte.

Ho sempre pensato che la genetica non mi sarebbe stata di grande aiuto. Conoscevo i lavori di Theodosius Dobzhansky, di Ronald A. Fisher ed Ernst Mayr; sono andato a convegni organizzati dall'embriologo, genetista e filosofo della scienza inglese C.H. Waddington, dove ho avuto l'occasione di incontrare Ernst Mayr e di discutere con lui. Ho il massimo rispetto per le sue idee, credo che abbia compiuto molti passi importanti, ma non mi sembra che abbia risolto il problema della forma biologica. Nessuno di questi scienziati è riuscito a spiegare come sono nati i diversi tipi di organismi nel corso dell'evoluzione; forse perché si limitano a considerare i piccoli cambiamenti adattativi.

Questo è stato il punto di partenza di Darwin: osservando l'allevamento di maiali, cani, gatti e cavalli, ha messo in evidenza come la grande varietà di razze dipenda essenzialmente dalla selezione delle variazioni spontanee. Ma per quanto le razze possano differire fra loro, non vengono oltrepassati i confini delle specie. Anche se la teoria dice che accumulando un certo numero di variazioni genetiche si può ottenere un organismo qualitativamente diverso, nessuno è mai riuscito a mostrare come ciò avvenga.

All'Università del Sussex ho avuto la fortuna di incontrare John Maynard Smith, che aveva lavorato a Londra con John B.S. Haldane, uno dei fondatori della sintesi moderna. Maynard Smith aveva cominciato come ingegnere aeronautico, ma trovando quel lavoro piuttosto noioso, decise di diventare un biologo. Secondo lui, Haldane aveva elaborato le idee di selezione di parentela e di fitness complessiva prima che William Hamilton, a Oxford, diventasse famoso per gli stessi concetti. Con ciò non voglio affatto screditare Hamilton, che ha senz'altro sviluppato quegli studi in modo autonomo. Evidentemente queste teorie pangenetiche erano nell'aria e si riteneva che avrebbero potuto risolvere alcuni enigmi affascinanti della natura, come il comportamento altruistico degli insetti sociali.

La cooperatività degli insetti sociali come le formiche, le api o le termiti, viene spesso attribuita ai loro legami di parentela. Questi animali, dunque, convivono d'amore e d'accordo perché hanno in comune gran parte del materiale genetico. Questo è il dogma centrale della fitness complessiva di Hamilton. Ma io non la considero una spiegazione soddisfacente del comportamento cooperativo, perché non chiarisce il motivo della sua origine. E la stessa cosa si può dire a proposito dell'interpretazione genetica della forma.

È diffusa l'idea che, essendo in grado di modificare la forma degli organismi, i geni ne siano anche la causa. Nulla viene detto, però, sul modo in cui la forma ha origine. Questa, come la cooperazione degli insetti sociali dovuta alla loro parentela, è senz'altro una semplificazione della tesi di Hamilton; ma per quello che ne so, nessuno del gruppo di Oxford è mai riuscito a dimostrare come la cooperazione possa scaturire dalle dinamiche delle interazioni di gruppo.

Un altro grande maestro dell'evoluzionismo è George Williams, i cui contributi fondamentali riguardano il significato del sesso nell'evoluzione. Il sesso è un bel grattacapo per i neodarwinisti, dato che la riproduzione asessuata, per esempio quella delle fragole, è molto più conveniente rispetto a due piante o due animali che devono incontrarsi per poter procreare. Ma se così è, perché esiste il sesso?

Molto acutamente Williams fa notare come, mescolando i geni in una popolazione, il sesso produca vantaggi in termini di diversità e variazione. È il cosiddetto algoritmo genetico: gli organismi riescono a esplorare molto meglio lo spazio potenziale dei geni mescolando fra loro diversi genomi. Dawkins e Maynard Smith hanno sentito profondamente l'influenza di Williams, e non si può negare che all'interno del paradigma neodarwinista le spiegazioni di Williams sono senz'altro plausibili.

I primi a dare uno scossone a questa scuola di pensiero sono stati Niles Eldredge e Stephen Jay Gould, che con la teoria dell'equilibrio punteggiato hanno riportato l'attenzione sui cambiamenti evolutivi di lungo periodo. Esaminando i fossili, si sono resi conto, infatti, che le specie non si trasformano l'una nell'altra. L'avvicinarsi degli organismi segue altre regole: una nuova specie emerge improvvisamente, prospera per parecchi milioni di anni e poi scompare, spesso in modo altrettanto improvviso. La sua vita può durare cinquecento milioni di anni o pochi milioni. Avendo posto l'accento sulle rivoluzioni biologiche, Eldredge e Gould sono stati scioccamente accusati di marxismo. E pensare che Eldredge non è affatto marxista, mentre Gould, che effettivamente ha avuto teste calde in famiglia, non ha mai cercato di far passare le sue ipotesi come frutto di una dottrina rivoluzionaria. In fondo non ha fatto che presentare il risultato delle sue osservazioni paleontologiche.

Critiche altrettanto dure sono state rivolte in Gran Bretagna ai cladisti, che costruiscono le tassonomie attraverso dettagliati studi al computer sulla distribuzione dei caratteri nelle specie. Il loro peccato originale è consistito nell'utilizzare criteri strettamente logici, indipendenti dalla storia, per individuare le differenze e le somiglianze fra i vari organismi. Non l'avessero mai fatto! Scandalo, eresia! Come si permettevano di trasgredire il principio fondamentale della tassonomia, basato sulla Storia? I cladisti sono stati accusati di abbandonare Darwin, così come Gould ed Eldredge di ignorare i principi fondamentali del darwinismo, basati sull'accumulazione di piccoli cambiamenti. Finiti gli strepiti, il problema resta irrisolto: il darwinismo ortodosso non riesce a spiegare il proliferare di nuove specie.

Il ruolo della fisica continua a essere sottovalutato in biologia. Se ci si concentra sul cambiamento dei geni nel corso del tempo, si finisce per ignorare la dimensione spaziale degli organismi. In quanto sistemi organizzati spazialmente, questi dovrebbero essere descritti piuttosto con le teorie dei campi, con cui la fisica esplora l'ordine spaziale. In un organismo in crescita, per esempio, sarebbe utile applicare i

campi morfogenetici, in grado di ripercorrere le diverse tappe dello sviluppo della forma dall'uovo all'individuo adulto. Ma quando i biologi incontrano il concetto di campo preferiscono scantonare; probabilmente perché la loro formazione prevede poca fisica e matematica, che invece sono essenziali per capire come le forme complesse possano sorgere da un inizio semplice, come quello di un uovo fecondato.

Le leggi della forma e i principi dell'ingegneria differiscono profondamente: i secondi sono di tipo strutturale e non spiegano affatto come le cose cambiano e si sviluppino secondo un loro ordine spontaneo. Si limitano a dire in che modo vanno messe assieme per ottenere certe proprietà. Per capire come si sviluppa la forma di un organismo occorre invece un equivalente della cosmologia. Penso a qualcosa di simile alle idee di Hawking, oppure alla teoria dell'origine di un sistema planetario, che all'inizio prevede una massa di gas, dalla quale poi si ottengono, per condensazione, i pianeti in orbita ellittica intorno a un sole. Allo stesso modo si potrebbe contemplare l'evoluzione della forma nel regno vivente. Con la differenza che gli organismi sono molto più complessi di un sistema planetario.

Mi piace paragonare la morfogenesi all'idrodinamica. Immaginiamo di avere un fluido e di voler capire perché assume certe configurazioni, come le onde generate dal vento, o i vortici ai piedi di una cascata. In essi la materia si organizza secondo certi schemi, proprio come succede negli organismi. Le loro forme sono riconducibili a diverse interazioni cellulari, che possono essere descritte con equazioni. Introducendo questi algoritmi nel computer dovremmo ottenere le forme mutevoli degli organismi. Se per la biologia questo resta ancora un sogno, l'idrodinamica ha dimostrato che non si tratta di una pretesa immotivata. In effetti è possibile tradurre una serie di numeri in immagini che rispecchiano e riproducono il comportamento dei fluidi; perché non dovrebbe funzionare anche per gli esseri viventi?

L'ipotesi è che la vita sia uno stato particolare di organizzazione, un sistema fisico e chimico di cui occorre trovare le regole.

Io quindi mi considero più un fisico che un ingegnere, impegnato in una nuova sintesi di fisica e biologia. Con il libro *Crescita e forma*, pubblicato nel 1917, lo zoologo scozzese D'Arcy Thompson fu il primo a definire in termini matematici la forma biologica. Oggi però il panorama è completamente modificato dai nuovi strumenti matematici che abbiamo a disposizione, e da una conoscenza molto maggiore degli organismi.

Le metafore a cui mi ispiro fanno riferimento ai concetti di emergenza, creatività e cosmo creativo, di cui l'evoluzione rappresenta solo un aspetto. Questo filone annovera grandi filosofi come Alfred North Whitehead, dal quale abbiamo mutuato un certo modo d'intendere il carattere processuale e creativo della realtà. Io credo che la nuova biologia debba molto a queste riflessioni, così come sono convinto che il riduzionismo genetico sia uno degli esempi migliori di ciò che intendeva Whitehead per "fallacia della concretezza mal posta". I geni infatti non sono creativi in quanto tali, ma possono funzionare solo nel contesto di un organismo creativo.

Whitehead descrive l'evoluzione come "avanzamento creativo nel nuovo": un concetto che coincide con quello della danza senza fine della creazione, la quale non conduce da nessuna parte ma semplicemente esprime se stessa. In epoca postmoderna, possiamo lasciar cadere il concetto di progresso e parlare del processo evolutivo come di un movimento privo di significato, scopo o direzione. Ci troviamo di fronte alla stessa sfrenata creatività della vita che Gould celebra, seppure con qualche intemperanza scientifica, in *La vita meravigliosa*.

Per come la intendo io, ogni specie ha la sua natura e le sue caratteristiche; ogni organismo esprime un particolare tipo di ordine che è insito nel suo essere. Da una parte è vero che tutti gli organismi sono simili perché fanno parte dello stesso processo, come sosteneva Darwin. Dall'altra, nel corso dell'evoluzione ogni essere

vivente esprime la sua natura, dunque va valutato per quello che è piuttosto che per la funzione che svolge.

Privilegiando il conflitto e la competizione, il darwinismo si trova in imbarazzo nel dover spiegare come mai molti organismi che sopravvivono non sono affatto superiori a quelli che si estinguono. In realtà il compito di una specie non è tanto d'essere migliore di un'altra, quanto di trovare un luogo dove poter esprimere se stessa. L'evoluzione è tutta qui, in questa danza delle specie viventi intente a esplorare lo spazio delle loro possibilità.

Nella sua esaltazione della lotta e del progresso, il darwinismo tradisce l'influenza della teologia calvinista, secondo la quale chi ha accumulato più ricchezze si è dimostrato superiore agli altri nella competizione della vita. Per me questi ragionamenti non sono altro che un mucchio d'immondizia. Solo quando ce ne saremo liberati potremo comprendere la vita attraverso le metafore della creatività, della danza e della spontaneità naturale.

D'accordo, la lotta non è un'invenzione di Darwin. Essa serve effettivamente all'uomo e alle altre specie per affermare la propria creatività. Poiché fra le specie esistono tanto la cooperazione quanto la competizione, la lotta va vista però come un mezzo per ribadire il proprio essere, la propria natura.

Nella scienza si cominciano a utilizzare metafore tratte dalle arti e dal gioco. Mi sembra un fatto molto positivo: il gioco è l'attività più importante dell'uomo e la cultura stessa può essere intesa in termini ludici.

La cultura umana dominante ha interiorizzato i valori del lavoro e dell'accumulazione di beni. Tutta l'avventura capitalista è un'orribile sfacchinata distruttiva, che deve essere riequilibrata. Ecco perché si comincia a rivalutare le culture indigene, che non accumulavano merci e consentivano di vivere in armonia; la cultura di quelle genti esprimeva la loro natura. A questo mi riferisco quando parlo di scienza delle qualità contrapposta alla scienza delle quantità, caratterizzata dall'accumulazione di merci, di geni, di prodotti genetici, dal bilancio costi-benefici. La sfera della qualità comprende invece l'estetica, i rapporti tra individui, la creatività, la salute e il benessere.

Questa scienza nuova cerca di portare all'interno di un unico sistema la biologia, il gioco e la matematica. Quest'ultima è uno strumento molto efficace per chi voglia esplorare la natura del reale; per esaminare la stabilità, la dinamica e il cambiamento delle forme naturali. Rappresenta tuttavia un punto di vista impersonale, oggettivo, che va integrato con gli aspetti soggettivi e creativi propri del gioco. Questa è la sintesi postmoderna della scienza delle qualità, per la quale non esistono più paradigmi in competizione fra loro, ma solo paradigmi alternativi. La scelta fra questi dipende dalla posizione etica dell'individuo, da ciò che si ripromette di fare nel mondo.

La scienza delle qualità è debitrice al postmoderno di altri concetti essenziali. È infatti da questo nuovo tipo di sensibilità culturale che trae l'idea di una biologia attenta al valore intrinseco degli organismi. Sempre dal postmoderno ha origine l'impegno ambientalista, che si traduce nel rispetto da accordare alle altre specie e nella difesa della biodiversità. Dallo stesso tronco nasce anche la rivalutazione delle culture indigene e della loro peculiare civiltà agricola che, al contrario della monocultura dei paesi industrializzati, sa adattarsi alle periodiche fluttuazioni dell'ambiente ed è in grado di salvaguardare in modo più efficace la biodiversità.

L'alternativa rispetto al neodarwinismo è radicale. Con ciò non voglio dire che sia scorretto intendere l'evoluzione in termini di variazioni genetiche casuali, di selezione naturale e di adattamento. Dico semplicemente che quella non è la mia strada.

Quando Stuart Kauffman andò al Santa Fé Institute, mi invitò a fargli visita. Passò un po' di tempo prima che potessi andare a trovarlo e nel frattempo conobbi

Doyne Farmer e altre persone interessanti ai laboratori di Los Alamos. Quando finalmente riuscii ad andare a Santa Fé, ne rimasi entusiasta. Da allora, su invito di Stuart, faccio parte del comitato scientifico dell'istituto e ci vado una o due volte all'anno. È fantastico vedere come possano convivere tanti talenti diversi in un solo centro di ricerca: dal fondatore, il fisico Murray Gell-Mann, al chimico George Cowan, che è riuscito a imprimere una svolta - pratica e visionaria a un tempo - alla sua disciplina. Pochi ancora lo sanno, ma laggiù sta avvenendo una rivoluzione.

La cosa più notevole è che il nuovo paradigma è più rigoroso dal punto di vista matematico e si accorda con i fenomeni biologici meglio del neodarwinismo. Abbiamo elaborato modelli matematici che ci consentono di mostrare come si verifica lo sviluppo degli organismi. È un risultato importante, perché non c'è biologo che neghi l'importanza dello sviluppo nel processo evolutivo, ma nessuno è in grado di darne ragione restando nei canoni del darwinismo classico. E quando si inserisce lo sviluppo nell'evoluzione, la prospettiva cambia radicalmente. Gli organismi tornano a essere entità reali, che vivono nel loro spazio e che riconosci immediatamente come esseri equivalenti a te stesso. Sono tali per il loro valore intrinseco, non semplicemente perché fanno parte dello stesso processo evolutivo. Così si impara ad attribuire alla natura lo stesso valore di un'opera d'arte.

murray gell-mann Brian Goodwin si interessa in particolar modo alla biologia dello sviluppo: lo incuriosiscono i limiti posti dalle leggi fisico-chimiche al funzionamento dei sistemi biologici. Oggi è evidente che quando l'evoluzione - basata su variazioni casuali del materiale genetico e sulla selezione naturale - opera sulla struttura degli organismi, deve sottostare alle leggi della fisica. Esse pongono limiti insuperabili al modo in cui gli esseri viventi possono essere costruiti. Enfatizzando l'importanza di questo argomento, Brian sembra suggerire che il lavoro sugli aspetti informativi dell'evoluzione e sui sistemi adattativi complessi non sia rilevante. Trovo questo atteggiamento piuttosto strano. Ma forse non la pensa davvero così, sta solo cercando di essere provocatorio.

stephen jay gould In contrasto con la cultura inglese del xx secolo, Brian è il rappresentante di una delle grandi tradizioni del pensiero occidentale, quella dello strutturalismo in biologia: un punto di vista non selezionista e non storicista. Secondo lui, le leggi che regolano forma e struttura della materia costituiscono un limite anche per la formazione degli organismi. Pertanto le caratteristiche salienti di un organismo non sarebbero né adattamenti generati dalla selezione naturale (come sostengono i funzionalisti), né contingenze storiche (come sostengo io, almeno in molti casi), bensì il frutto di modelli naturali intrinseci.

L'opera che ha fatto nascere questo filone di pensiero è *Crescita e forma* di D'Arcy Thompson. Si tratta certamente di una tradizione grandiosa, che io non posso condividere in pieno, vista l'importanza che attribuisco alla contingenza storica. Ma lo strutturalismo mi interessa molto: è un modo spesso efficace di interpretare la forma ed è un'altra via per criticare il funzionalismo puro del programma adattazionista.

steve jones Ho letto parte degli scritti di Brian Goodwin, ma li ho trovati molto ardui. Come me lo spiego? Forse sono stupido. Eppure ho studiato embriologia, leggo molti libri di biologia molecolare e generalmente non ho particolari difficoltà a capire queste materie. Goodwin si esprime in modo complesso e non è l'approccio che fa per me. Credo sia un mistico. Ci deve essere qualcosa nell'aria di Santa Fé che si attacca alle persone che bazzicano da quelle parti. È il guaio della complessità: è contagiosa.

Richard dawkins Quando Brian Goodwin lavorava con John Maynard Smith nel Sussex, pensavamo che facesse bene a essere un po' stravagante, dato che Maynard Smith è sempre così assennato. Quando Goodwin si è trasferito alla Open University, dove sono tutti matti, credevamo sarebbe diventato giudizioso. Ma non è andata così. Il ragazzo ha un punto di vista interessante, e l'ho anche sostenuto sulla stampa: che la gamma di variazione disponibile alla selezione naturale non sia infinita contrasta con certe interpretazioni estremistiche del darwinismo, secondo le quali sarebbe possibile cambiare tutto in una morfologia, a patto che il cambiamento della variabile quantitativa sia piccolo e graduale.

È certamente possibile che le leggi sottostanti della morfologia consentano solo una serie limitata di forme. Non credo tuttavia che esistano molte prove a favore di questa ipotesi. È comunque importante che ci sia qualcuno come Brian Goodwin che la sostiene, perché rappresenta l'estremo opposto dell'ultradarwinismo. Probabilmente la verità sta nel mezzo, in una zona dove si possono variamente collocare le persone sagge.

nicholas humphrey Ho conosciuto Brian solo di recente. L'ho ascoltato in una conferenza a Waddington e sono rimasto di stucco. Proponeva una teoria da sostituire alla selezione naturale come principio motore dell'evoluzione. Secondo lui, tutte le belle strutture che esistono al mondo sarebbero già pronte ed emergerebbero da sistemi dinamici complessi grazie all'azione di vari attrattori. "Non può parlare seriamente", mi sono detto. Forse queste cose sono possibili dal punto di vista matematico, ma non si può arrivare a negare l'esigenza di qualsiasi principio organizzativo. Ne abbiamo discusso accanitamente, ma lui è rimasto del suo avviso e io del mio.

Goodwin non mi aveva solo sorpreso, ma anche preoccupato. Poi, quando ho letto i lavori di Stuart Kauffman e parlato con il matematico Ian Stewart, presente anche lui alla conferenza, mi sono reso conto che era in atto una rivoluzione di cui non mi ero accorto.

In certi casi l'idea degli attrattori può spiegare come nascono le strutture biologiche in modo forse più semplice di quanto non consenta la selezione naturale. Ma questo punto di vista risulta sempre molto difficile da confutare. A posteriori, infatti, puoi sempre affermare che un evento è stato determinato da un attrattore. Se il mondo ha assunto una certa configurazione, si può sempre sostenere che doveva essere attratto da essa!

Dopo aver ascoltato Ian Stewart discutere a ruota libera con il suo amico Jack Cohen, biologo della riproduzione, mi sono reso conto che stanno cercando di utilizzare gli attrattori per qualsiasi cosa. Per esempio, la mente umana ha la capacità di memorizzare a breve termine circa sette informazioni, il solito magico numero sette. Ho chiesto a Ian e Jack se ciò potrebbe suggerire l'esistenza nel cervello di un particolare attrattore per il numero sette. E perché no, mi hanno risposto. Oppure, dato che abbiamo cinque sensi, cinque modi qualitativamente diversi di fare esperienze, ognuna di queste modalità sensoriali dovrebbe corrispondere a un attrattore? E ci sarebbero solo cinque possibili attrattori di questo tipo? Per loro è possibile. Io ribatto che così il gioco diventa troppo facile. È troppo comodo fare ricorso a un attrattore per spiegare ogni modello stabile che incontriamo.

daniel c. dennett Non avendolo mai incontrato di persona, per me Brian Goodwin è più un archetipo che un particolare individuo. Lo vedo come il tipico esponente di una certa posizione nello spazio logico, che non mi sorprende vedere occupata da qualcuno. Ciò non toglie che secondo me sia una posizione totalmente sbagliata.

Brian Goodwin è un romantico che vuole negare la natura tutto sommato ingegneristica della biologia. Per descriverlo ricorrono all'arma un po' sleale della parodia. Dice un ingegnere: "Voi credete che gli ingegneri abbiano *progettato* le automobili, le televisioni e così via. Invece hanno solo *scoperto* i pochi artefatti che erano possibili. Questi progetti quindi non sono affatto interessanti, perché le automobili e le televisioni sono tali solo grazie alle leggi della fisica. Inoltre per questi modelli esistono molte meno alternative di quanto possiate immaginare". La posizione di Goodwin è analoga; solo che si applica agli artefatti biologici, cioè agli organismi.

Non ho mai sentito nessuno sostenere l'esistenza di profonde, fondamentali leggi dell'ingegneria automobilistica. In fondo Goodwin fa proprio questo, quando afferma che in biologia esistono leggi della forma. Le auto hanno il volante piazzato in modo che l'autista possa guardare in avanti e non all'indietro: è una regolarità profonda dell'automobile, una legge della natura? No, solo sarebbe stupido fare in un altro modo. Per lo stesso motivo gli organismi in grado di muoversi hanno gli occhi e la bocca davanti; non per una legge di natura, ma perché questo è il modo di strutturare un organismo che deve saper badare a se stesso. Non soddisfatto da questa giustificazione, a Goodwin piacerebbe che le leggi della fisica potessero spiegare tutto. Capisco la sua preoccupazione, ma non mi sento proprio di condividerla.

lynn margulis Brian Goodwin critica seriamente il neodarwinismo e le idee oggi di moda in biologia. Lo ammiro perché è un critico molto puntuale, che suscita interessanti interrogativi per la biologia dello sviluppo. Sfortunatamente non può fornire anche le risposte, perché provengono da un settore che non è il suo. Quel campo è la microbiologia, che include la chimica comparativa dei metabolismi e la conoscenza delle comunità di microbi, che comprendono i batteri e i protisti. Dubito che si renda conto che la soluzione dei suoi problemi esiste già da qualche altra parte.

francisco varela Brian dovrebbe essere definito biologo teorico. Da molti anni si occupa di biologia, ma solo recentemente ha scelto una prospettiva strutturalista, andando alla ricerca dei modelli fondamentali attraverso cui si esprime la vita. In questo senso è il promotore di un nuovo modo di fare biologia.

Sebbene ci siano molte cose che ci dividano, io e Brian siamo accomunati da un certo tipo di ricerca. Brian si pone l'obiettivo di descrivere gli organismi come strutture unitarie, e lavora principalmente con i modelli dell'embriologia, i cosiddetti morfemi di base. Cercare modelli e forme fondamentali è un nobile approccio, che stimo molto e che si collega alla teoria delle catastrofi di Rene Thom.

5. Steve Jones

Perché esiste tanta diversità genetica?

steve jones è biologo. Professore di genetica al Galton Laboratory presso l'University College di Londra, ha scritto *The Language of the Genes: Biology, History, and the Evolutionary Future* (1993) e ha curato (insieme a Robert Martin e David

Pillbeam) *The Cambridge Encyclopedia of Human Evolution* (1992).

Ho dedicato molto tempo allo studio delle chioccioline. Anche se può sembrare un'occupazione strana, questi animali ci rammentano continuamente la straordinaria diversità delle specie viventi, che gli stessi biologi tendono a sottovalutare. Senza diversità non esisterebbero la genetica, l'evoluzione, e probabilmente nessun tipo di biologia. L'argomento periodicamente riaffiora, per poi scomparire senza risposta, un po' come succede in certe discussioni politiche. Oggi comincia a intravedersi un inizio di spiegazione, la quale deriva proprio dal fatto che in alcuni luoghi esistono specie di chioccioline particolarmente variabili. Eppure non abbiamo la minima idea del perché non esistono due individui perfettamente identici, in nessuna specie, luogo, o momento storico.

Io sono un biologo evoluzionista. Per molti di noi, dai tempi di Darwin in poi, l'organismo da studiare è secondario rispetto alla sua evoluzione. Inevitabilmente, però, si finisce sempre per parlare del particolare anziché del generale. Come già si pensava in epoca vittoriana, le chioccioline rappresentano l'evoluzione in miniatura, poiché hanno un'apparenza così diversa l'una dall'altra, e anche da una specie all'altra. Forse questa è l'unica ragione per cui rappresentano un buon caso da studiare, oltre naturalmente al fatto che sono facili da catturare.

Credo che nessuno scienziato possa spiegare, in tutta onestà, come è arrivato a occuparsi di una certa cosa. Quale che sia la ragione che si trova in seguito, la maggior parte di noi inizia per caso. Il mio professore era un certo Bryan Clarke, un bravissimo ricercatore che studiava la genetica delle chioccioline. A quei tempi, prima dell'avvento della genetica molecolare, le chioccioline erano fra i pochi animali di cui fosse facile studiare la diversità, quindi tali ricerche erano meno stravaganti di quanto sembrino oggi. Ero stato assegnato a quel gruppo di ricerca in base all'iniziale del mio cognome. Fui l'unico a trovare questo argomento affascinante, tanto che è ancor oggi il mio interesse scientifico principale. Ma nessuno mi può accusare di essere uno specialista limitato, visto che adesso studio anche le lumache!

Dal punto di vista professionale, studiare i molluschi non è stata una scelta felice. Avrei potuto passare anch'io armi e bagagli alla nuova genetica e forse oggi sarei un po' meno sconosciuto. Il mio nome potrebbe essere sulla bocca di tutti, com'è successo al mio collega Ed Southern, quello che ha inventato il "Southern blot", una tecnica di genetica rivelatasi d'importanza fondamentale. Io sono rimasto fedele ai molluschi e in fondo non me ne pento.

Steve Gould ha studiato le differenze di forma e di modello nella chiocciolina delle Bahamas, un argomento molto più ampio e difficile del mio. Io lavoro sulle varietà di colore e di disegno dei gusci, correlandole alle differenze del dna. Le variazioni nei disegni dei gusci sono un argomento classico della biologia evoluzionistica, d'attualità fin dal secolo scorso. Oggi possediamo dati su più di un milione di individui classificati secondo la loro apparenza fisica; si tratta di un'enorme quantità di informazioni sulle differenze.

Passando da una regione all'altra d'Europa, si nota facilmente che i geni delle chioccioline cambiano in relazione al calore del sole. Come molti altri animali, le chioccioline dai gusci scuri sono rare nelle regioni meridionali, poiché assorbono più calore. La stessa distribuzione si verifica anche in una scala di pochi chilometri. Ho studiato a lungo questo fenomeno ai confini fra la Bosnia e la Croazia, e giusto qualche mese fa ho saputo che la città in cui mi ero stabilito per i miei studi è stata rasa al suolo dalla guerra.

Tali osservazioni non risolvono però la questione più spinosa: se in luoghi diversi sono favoriti individui dai diversi genotipi, perché in una determinata popolazione ogni

chiocciola non è uguale all'altra?

Credo che oggi possiamo rispondere a questo interrogativo usando le stesse chioccioline come indicatori ecologici. Ho sperimentato infatti un tipo di vernice che sbiadisce in modo proporzionale all'esposizione al sole: se dipingi qualche piccola macchia sul guscio delle chioccioline, le rimetti in libertà, e poi torni dopo un mese a controllare lo stato della vernice, avrai un indice della quantità di energia solare assorbita dagli animali. La conclusione a cui sono arrivato è che individui con geni diversi possono avere comportamenti anche molto differenziati: sono attivi in diversi momenti della giornata, o in diverse parti dell'habitat. E ciò suggerisce che un habitat ecologicamente complesso favorisce una maggiore diversità genetica.

Per condurre questo tipo di ricerche ho sviluppato un'altra tecnica che tutti oggi chiamano "le palle di Jones". Si prendono sfere di plastica della dimensione di una chiocciolina e le si lanciano a caso in un certo habitat. Poi, come direbbe un bambino, si fa finta di essere il sole. Si sale cioè in cima a una scala e ci si trasforma nel satellite più economico del mondo, osservando l'ambiente circostante dall'alba al tramonto. Le palline che si vedono sono quelle esposte alla luce del sole, mentre quelle che non si vedono sono nascoste dall'ombra del fogliame. Questi modelli di esposizione, che cambiano lungo il corso della giornata, cioè con lo spostamento del sole, possono essere assimilati a quelli delle chioccioline. Forse non è una gran trovata, però funziona, e riesce a misurare la diversità dell'habitat come viene percepita dalle chioccioline. Si può infatti verificare una buona corrispondenza fra diversità genetica, diversità ecologica e scelta individuale di un microhabitat.

L'idea di studiare l'ecologia di un ambiente attraverso l'esperienza dei suoi abitanti è abbastanza nuova, e siamo riusciti ad applicarla anche al moscerino della frutta, la famosa drososila. Con la mia collega Linda Partridge e Jerry Coyne dell'Università di Chicago eravamo interessati a misurare dal punto di vista genetico le interazioni della drososila con il suo ambiente. Pertanto abbiamo deciso di utilizzare una varietà di moscerino i cui occhi hanno colori diversi a seconda della temperatura a cui è stata esposta durante il suo sviluppo. L'esperimento si è svolto nel Maryland, dove c'è un clima caldo umido: dopo aver liberato milioni di insetti con questa mutazione, abbiamo catturato la loro prole, cresciuta allo stato selvatico.

Questi insetti fungevano da termometri viventi, poiché dal colore dei loro occhi potevamo capire la temperatura in cui erano cresciuti. La variazione termica che abbiamo rilevato era in effetti molto ampia. Quindi, dato che i moscerini che crescono a temperature diverse raggiungono dimensioni diverse, si possono giustificare ecologicamente molte delle variazioni di forma e dimensioni che prima venivano ritenute d'origine genetica. Inoltre si può rispondere a un altro importante interrogativo evolutivo che viene spesso ignorato: quello della convenienza delle grandi dimensioni. Per la maggior parte delle creature, infatti, essere più grandi favorisce nell'accoppiamento, nell'affrontare i nemici, nel sopportare il caldo e il freddo. Perché, allora, gli animali hanno dimensioni così diverse? Forse il motivo è che la maggior parte delle differenze - almeno per quanto riguarda la drososila - dipendono dall'ambiente e non sono affatto di origine genetica.

In secondo luogo mi interessa del sesso che, in fin dei conti, è solo un meccanismo per generare diversità fra i genitori e la prole. Nessuno conosce davvero il motivo per cui esiste la riproduzione sessuata; il solo modo per capirne qualcosa di più è osservare le poche creature che l'hanno abbandonata. Gran parte delle lumache sono ermafrodite, ma molte hanno un comportamento abbastanza decoroso: un lui-lei incontra una lei-lui, e la natura segue il suo corso. Alcune invece prendono la scorciatoia e si fecondano da sole, lasciando perdere il sesso. I loro geni mostrano che queste specie sono essenzialmente una massa di gemelli identici, del tutto privi di diversità. Non sappiamo il perché di questo comportamento, anche se abbiamo stabilito che è più conveniente abbandonare la riproduzione sessuata in un luogo

freddo, per esempio in Norvegia, che in un luogo caldo come la Spagna.

Le persone che più hanno influenzato il mio lavoro sono state Bryan Clarke e Dick Lewontin. Terminato il dottorato, ho scritto a Lewontin a Chicago per chiedergli un consiglio su dove avrei potuto continuare la carriera universitaria. Mi ha risposto quasi immediatamente reclutandomi per il suo laboratorio, a partire dal mese successivo. E pensare che non avevo nemmeno presentato una domanda formale. Ovviamente mi sono precipitato a Chicago. Sotto la guida di Lewontin ho imparato molte cose, ma soprattutto mi sono reso conto rapidamente di quanto fosse vasta la mia ignoranza.

Abbiamo cominciato allora a occuparci di diversità genetica. Dick è un uomo pieno di brio e di entusiasmo; ha il potere di elettrizzare la gente con le sue idee, siano esse giuste o sbagliate. Io mi sono lasciato incantare da un'idea sbagliata: prelevare dal deserto della California moscerini della frutta appartenenti a una popolazione isolata, farli accoppiare in laboratorio con insetti geneticamente diversi e vedere cosa sarebbe successo alla loro evoluzione dopo un paio di anni.

È stato un periodo magnifico. Ho viaggiato in tutti i deserti della California, fino al Messico, alla ricerca di moscerini. Tre anni dopo, abbronzatissimi e senza soldi, abbiamo scoperto che queste popolazioni non erano per nulla isolate: i moscerini della frutta erano ovunque, un traffico mai visto. Si trattava pur sempre di una scoperta scientifica, che forse ha un certo interesse per la genetica della drososila. Di certo non ha cambiato il corso della biologia evolutiva.

Lewontin ha acceso il sacro fuoco per la scienza a un sacco di persone, me compreso. Se si traccia l'albero genealogico di tutti i biologi evolutivisti nel mondo, moltissimi sono stati suoi allievi o suoi protetti.

Qualche volta la sua influenza è stata negativa, un po' alla maniera di Marx o di sant'Agostino. Sebbene avessero probabilmente torto entrambi, il mondo senza di loro sarebbe stato molto meno interessante. Il meno che si possa dire di loro è che hanno costretto milioni di persone a riflettere sulle proprie idee. Dick è un talento nell'arte della confutazione, è un tafano che non da requie ai dogmi di turno. Ha distrutto molte teorie, cosa senz'altro utile; la scienza però ha bisogno non solo di tafani, ma anche di formiche come me, che costruiscano perché i Lewontin del momento possano abbattere le loro costruzioni.

La genetica delle chioccioline è un campo limitato e scarsamente intellettuale, ma che per certi versi rappresenta un repertorio del peggio che si può trovare nella biologia evolutiva. La sua letteratura è piena di parole vacue, come "coadattamento", "paesaggio adattativo", "equilibrio punteggiato". Questi termini mi fanno pensare alla teologia, e non sono affatto utili quando stai cercando di programmare il tuo prossimo esperimento.

Se ho ben capito, con questo vocabolario si vuole suggerire l'idea che un gene esiste perché si è adattato ai geni già esistenti. È indubbiamente una visione ottimistica del mondo, inteso come una bella struttura le cui parti si adattano armoniosamente l'una all'altra. Non ci si deve preoccupare del modo in cui è stato costruito questo edificio che chiamiamo natura; ci basti vederlo solidamente piantato nel terreno.

Considero quest'idea estremamente dannosa, presuntuosa e qualunquista. Anni fa, probabilmente in un momento di noia, ho letto il libro *Holism* del generale sudafricano Jan Smuts. A tempo perso il generale si diletta di filosofia: secondo lui il mondo è un grande schema di cui non serve a nulla cercare di capire lo scopo delle singole parti, perché solo il Tutto ha un senso. Era un pessimo filosofo, i cui insegnamenti ritrovo però in buona parte del pensiero biologico: l'evoluzione viene intesa da molti come una totalità magica dotata di una intrinseca bellezza. Guai a cercare di spiegarla partendo dai suoi costituenti elementari, vale a dire i geni. Se

questo è vero, il riduzionismo è una prospettiva molto limitata, se non inservibile.

Non escludo che il riduzionismo abbia dei limiti, ma almeno indica una prospettiva di lavoro seria, mentre quando si dice che una cosa è inspiegabile non c'è più motivo per cercare di spiegarla. Steve Gould e Dick Lewontin hanno attaccato con molto spirito il riduzionismo nel famoso articolo sui pennacchi di San Marco. Il saggio contestava la pretesa degli iperadattazionisti di trovare una semplice spiegazione biologica per ogni caratteristica degli organismi. In effetti, il riduzionista estremo potrebbe scrivere libri interi sui profondi motivi artistici che hanno spinto un pittore a dipingere un quadro rotondo anziché rettangolare. In realtà la forma di un dipinto dipende da circostanze che hanno poco a che vedere con la pittura. Facendo questo paragone, Gould e Lewontin hanno avuto buon gioco nello stigmatizzare un certo tipo di evolucionismo.

C'è del vero nel loro ragionamento, ma accettarlo *in toto* significa fare i bagagli e andarsene a casa, smettere di essere un ornitologo e diventare un birdwatcher, passare dall'analisi all'osservazione. Alle orecchie dei biologi, il loro messaggio suona come un invito ad abbandonare la ricerca e a prendersi una laurea in lettere. Forse sto esagerando nel criticare Lewontin e Gould, che se la godono a punzecchiare gli sprovveduti con i loro forconi, o meglio con i loro acuminati pennacchi. Ma cosa è successo dopo quel loro famoso intervento? Non molto, direi.

Vediamo invece cosa ha combinato il tanto bistrattato Richard Dawkins. Almeno all'apparenza, la semplicità del suo punto di vista è disarmante: tutto può essere ricondotto ai geni. In realtà Dawkins non sarebbe mai così ingenuo da affermare che gli organismi sono solo veicoli per trasportare in giro i loro geni egoisti. Tuttavia questa metafora si è rivelata molto produttiva, perché ha aperto la strada a un nuovo filone di ricerca.

Ancora una volta, il riduzionismo offre allo scienziato la materia prima su cui lavorare. Il bello dell'idea del gene egoista è che la puoi afferrare, puoi cercare di provarla. Può darsi che un giorno si riveli sbagliata, ma intanto avrà dato origine a molti lavori interessanti. Uno di questi afferma che le regole fondamentali della biologia, quindi perfino le leggi di Mendel, sono il risultato di una tregua nella battaglia fra geni egoisti. Il ragionamento è molto stimolante e porta a fare previsioni che possono essere verificate.

Se ho imparato qualcosa dal mio lavoro con le chioccioline, è che per avvicinarsi alla verità bisogna sporcarsi le mani. Lasciamo al papa il compito di pontificare. La scienza progredisce con i dati, non con le teorie, ed è per questo che mi sono sentito utile solo quando stavo raccogliendo dati. Sfortunatamente il sistema cospira per fermarti; così adesso passo il tempo a concedere interviste come questa o a scrivere brevi articoli per il "Daily Telegraph". L'età che avanza, la pigrizia, la carenza di fondi per la ricerca fanno il resto.

Le domande che mi pongo oggi sono simili a quelle di trent'anni fa, se non fosse per il fatto che l'uomo è diventato la nuova drosofila, l'organismo tecnicamente accessibile per studiare i geni. Ecco allora come riformulerei le domande chiave della ricerca contemporanea: Quanto sono diverse geneticamente due persone? Perché ci sono gruppi di uomini diversi gli uni dagli altri? Qual è la storia della diversità umana?

Sono passato a questi argomenti, anche se devo aggiungere che ormai sono sempre più un voyeur della scienza che uno scienziato.

Collaboro spesso con i giornali, la radio e la televisione, e dunque sono più conosciuto dal grande pubblico che dai colleghi genetisti. Pur avendo scritto molto sulla genetica umana, non ho mai pubblicato niente di "serio" sull'argomento: nel settore, insomma, sono più spettatore che protagonista. E sono grato ai miei colleghi, che nei miei confronti sono un po' meno sprezzanti di quanto avrebbero il diritto di

essere, forse perché sono convinti che la divulgazione scientifica abbia un suo ruolo. In ogni caso, posso consolarmi con il pensiero di essere uno dei sei migliori specialisti al mondo di genetica delle chiocchie, in un campo dove siamo circa una mezza dozzina.

Richard dawkins Mi è piaciuto il recente libro di Steve Jones *The Language of the Genes*. Se posso azzardare una critica, mi sembra troppo preoccupato a ridare una rispettabilità politica a una scienza dal passato burrascoso come la genetica. Non mi intestardirei su questo aspetto; credo invece che dovremmo farla finita, mettere tutto alle nostre spalle e andare avanti. Per Jones ho comunque un grande rispetto.

stephen jay gould Apprezzo molto il lavoro di Steve Jones. Ho letto la maggior parte dei suoi articoli scientifici dedicati ai molluschi polmonati, le chiocchie insomma. Anch'io mi occupo di questi animali e devo riconoscere che Jones è uno dei ricercatori di punta in questo campo. Mi dispiace non conoscerlo meglio. Recentemente ha abbandonato la ricerca per dedicarsi al giornalismo, ma nella biologia delle chiocchie resta sempre un maestro.

6. Niles Eldredge

Una battaglia di parole

niles eldredge paleontologo, è curatore del Dipartimento degli Invertebrati dell'American Museum of Natural History di New York. È autore di *Strutture del tempo* (1985, tr. it. 1991), *The Miner's Canary* (1991), *Fossils* (1991) e *Reinventing Darwin* (1995).

Sono conosciuto soprattutto per il lavoro, svolto con Steve Gould, sugli equilibri punteggiati. Siamo arrivati a elaborare questa teoria combinando le riflessioni di Theodosius Dobzhansky e di Ernst Mayr sulla discontinuità delle specie con la paleontologia di George Simpson. Alle conseguenze di questa nuova teoria - in particolare la natura generale dei sistemi biologici su grande scala - ho dedicato gran parte del mio lavoro successivo.

Gli equilibri punteggiati nascono dall'osservazione che una specie non cambia molto nel corso della sua storia: un periodo di cinque o dieci milioni di anni, per esempio, nel caso degli invertebrati marini. Eppure l'evoluzione avviene e il cambiamento sembra dipendere dal meccanismo di speciazione. La cosa è abbastanza strana, in quanto la speciazione dà origine alle nuove comunità riproduttive, alle nuove specie, e quindi non dovrebbe aver nulla a che fare con il cambiamento adattativo.

Dal concetto degli equilibri punteggiati nascono paradossi notevoli, che riguardano per esempio gli andamenti evolutivi sul lungo periodo. Prendiamo l'aumento delle dimensioni del cervello umano nel corso di quattro o cinque milioni di anni: il vecchio modello detta selezione naturale favorisce, per esempio, cervelli progressivamente più grossi. Se si osservano i fossili, però, si nota che le dimensioni

dei cervelli non aumentano gradualmente, ma per scatti successivi.

L'ipotesi degli equilibri punteggiati ha perciò sostituito il vecchio e comodo progresso evolutivo con i cambiamenti improvvisi registrati nei fossili. Tuttavia, se ci ostiniamo a sostenere l'esistenza di un progresso nel corso del tempo, è necessario cercare una spiegazione adeguata.

Secondo noi le specie sono entità dotate di storia, origini e limiti propri, legate alla dimensione spazio-temporale, da cui possono nascere o meno specie discendenti. Possiamo paragonarle a individui, un po' come gli esseri umani, anche se di tipo molto diverso: si tratta di sistemi su grande scala, ma molto meno astratti di quanto vengano considerati dalla biologia evuzionistica tradizionale. Altre entità, come per esempio le popolazioni ecologiche, funzionano in una loro nicchia particolare. Ma, a differenza degli individui e dei gruppi, le specie non compiono azioni: il loro compito nel processo evolutivo è di fungere da magazzino di informazioni.

Quando parliamo di "selezione di specie" intendiamo dire che l'origine e l'estinzione delle diverse specie sono importanti elementi addizionali che modificano la storia della vita e influenzano gli andamenti dell'evoluzione di lungo periodo.

Quest'idea presuppone uno spostamento ontologico. I genetisti non accettano di considerare le specie come entità reali, dotate di un ruolo specifico nel processo evolutivo, perché studiando i cambiamenti che avvengono nelle popolazioni non ne sentono la necessità. Per questo motivo il nostro lavoro non interessa a John Maynard Smith, e nemmeno a Richard Dawkins, che cerca di forzare tutto all'interno di un'interpretazione genica. Pur non addossando loro nessuna colpa, credo valga la pena cercare di convincere i nostri colleghi che, con questa interpretazione delle specie, si inserisce un elemento valido e interessante nella teoria dell'evoluzione.

Per contrapporci agli ultradarwinisti concentrati sui geni, i cui esponenti più importanti sono Maynard Smith, George Williams e Richard Dawkins, io e Steve ci potremmo definire "naturalisti". Anche noi accettiamo le leggi fondamentali del cambiamento evolutivo, ossia le modificazioni adattative che avvengono attraverso la selezione naturale. Gli ultradarwinisti giungono a sostenere che la dinamica fondamentale della natura è il bisogno competitivo, da parte di ogni organismo, di trasmettere copie dei propri geni. A mio parere, far competere fra loro frammenti di informazione come i geni rende la biologia evuzionistica più simile alla fisica; quindi la peggiore accusa che posso muovere agli ultradarwinisti è di soffrire di invidia della fisica.

L'adattazionismo di Maynard Smith, Williams e Dawkins può essere spiegato così: nel progetto della natura, gli organismi appaiono ben adattati all'ambiente in cui si trovano e ben funzionanti. L'unica spiegazione sensata di questo fenomeno, che non sia il ricorso a un dio creatore, è il processo dell'evoluzione. Esso si manifesta attraverso il meccanismo della selezione naturale, dove le varianti più adattate della popolazione tendono, in media, a lasciare più copie dei propri geni rispetto a quelle meno dotate. Nel corso di generazioni e generazioni, la natura fa una cernita e dà impulso a certe particolari variazioni.

Noi naturalisti non vogliamo contraddire queste regole di base. Con l'idea degli equilibri punteggiati sosteniamo piuttosto che la selezione naturale produce cambiamenti adattativi principalmente nelle fasi di speciazione, cioè nel momento in cui una comunità riproduttiva ancestrale si divide in due o più specie discendenti.

Gli equilibri punteggiati riportano al centro del dibattito sull'evoluzione l'importanza della discontinuità. Anche se di solito sono gli ultradarwinisti che interpretano il ruolo di *defensores fidei*, sono stati proprio Ernst Mayr e Theodosius Dobzhansky, i fondatori della sintesi moderna, a cercare di inserire un elemento di discontinuità nell'evuzionismo. Quindi anche noi naturalisti stiamo difendendo un

angolo di ortodossia.

Come sostiene Dobzhansky, Darwin ha stabilito la validità della selezione naturale, la quale è in grado di generare uno spettro di variazione continua. Ma la natura è discontinua: sia a livello del gene (Dobzhansky l'ha affermato nel 1937), sia della specie. Questa discontinuità fra le varie specie - intese come comunità riproduttive separate - non viene però colta dalla maggior parte dei biologi evolucionisti che si occupano di genetica delle popolazioni. È un concetto che esula dal loro universo di discorso.

Non c'è niente di male nel concentrarsi sulle modificazioni generazionali delle frequenze geniche all'interno di una popolazione, su cui peraltro c'è ancora molto da scoprire. Tuttavia restringere il campo ignorando le specie, come fanno gli ultradarwinisti, significa assumersi il rischio di una visione incompleta e semplicistica dell'organizzazione biologica. Dispiace quindi che George Williams, nel suo recente libro *Natural Selection*, insista nel sottolineare che le specie non rappresentano affatto una categoria speciale fra le entità biologiche.

Di solito gli ultradarwinisti negano di essere riduzionisti, ma a parere di tutti lo sono, eccome. La struttura e la storia dei sistemi di grande scala - come quelli sociali ed economici e gli ecosistemi - sono interpretate puramente in termini di frequenze geniche relative: tutto dipende da questa ipotetica competizione fra organismi, o peggio ancora, fra geni. Con la loro visione tendenziosa, questi studiosi ignorano irresponsabilmente una gran quantità di ricerche sulle specie effettuate negli ultimi cinquant'anni.

Io comunque non li accuso di disonestà scientifica, solo di incompletezza. Credo anche che per criticare qualcuno occorra conoscere bene le sue idee, un'attività a cui io dedico molto tempo. Ma non mi sembra che gli ultradarwinisti siano altrettanto disponibili a esaminare attentamente i lavori di Steve, Elisabeth Vrba, Steven Stanley e miei, legati come sono a una visione del mondo incentrata sul gene.

George Williams è stato il primo a dare una descrizione dell'evoluzione come di un processo attivo: ha chiarito che gli organismi in natura competono fra loro non per il cibo, come potrebbe sembrare, ma per trasmettere copie dei propri geni. Sul piano della biologia riproduttiva si tratta certamente di una buona descrizione della natura. Ma quando si considerano i sistemi biologici su grande scala, e ci si interessa a fenomeni economici invece che riproduttivi, questo tipo di interpretazione fallisce.

Nel *Gene egoista* Dawkins sostiene che un giorno arriveremo a capire anche i meccanismi interni degli ecosistemi basandoci esclusivamente sul principio della competizione genica. Questo è un vero e proprio appello al riduzionismo, che cambia le carte in tavola della stessa prospettiva darwiniana.

Qui il terreno diventa scivoloso, poiché il riduzionismo degli ultradarwinisti arriva in realtà solo dove vogliono loro, cioè ai geni all'interno delle popolazioni. Guai a chi cerca di scendere più in basso, come ha fatto il ricercatore Gabriel Dover, che osa parlare di evoluzione nella biologia molecolare! Io sono convinto che esistano sia livelli più bassi sia più alti di quelli compresi nel campo tradizionale della genetica delle popolazioni. Le cose sono un po' più complesse di quanto le vedono gli ultradarwinisti, e oggi possiamo in parte spiegare in cosa consiste questa complessità.

Nell'*Orologiaio cieco* Dawkins spiega in modo apparentemente convincente perché gli organismi si adattano così bene al loro ambiente e in che modo la selezione naturale modella l'adattamento degli organismi. A un esame più attento, però, non si trova nulla che spieghi l'esistenza del cambiamento adattativo nell'evoluzione. La questione viene data per scontata, come se si trattasse di un fatto ormai acclarato, mentre il meccanismo viene descritto nei più affascinanti dettagli. E si presuppone che, avviando questo motore, ne possa emergere tutto ciò che osserviamo: una storia di tre

miliardi e mezzo di anni e i dieci milioni di specie che popolano la Terra.

Come ho già detto, tutti accettiamo le basi stabilite da Darwin, ed è assurdo dunque affibbiare a Steve Gould l'etichetta di antiadattazionista. L'equivoco risale al convegno della Royal Society del 1978, il cui risultato più importante, per ammissione dello stesso organizzatore Maynard Smith, è stato l'articolo scritto da Steve con Dick Lewontin intitolato *The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm*, dove si argomentava che gli adattazionisti considerano qualsiasi struttura biologica un prodotto esclusivo della selezione naturale. Gould faceva notare che questa era solamente una possibile via per spiegare i fenomeni - una via difficile da dimostrare in modo rigoroso - e che si poteva ricorrere anche ad altre spiegazioni. Tanto bastò per bollare Steve di antiadattazionismo. Gran parte del dibattito fra Dawkins e Gould si riduce a una gara per dimostrare chi dei due è più intelligente e brillante. Nella loro battaglia di parole per informare il pubblico colto su quale sia la migliore interpretazione della natura, mi sembra spesso che equivochino deliberatamente l'uno sulle parole dell'altro.

Steve è sempre stato pronto a gettarsi nella mischia per giostrare con tutti i Dawkins e i Maynard Smith di questo mondo. Io invece ho avuto bisogno di più tempo. All'inizio della mia carriera cercavo di conciliare i modelli di stasi e cambiamento registrati nei fossili con i punti di vista dei miei immediati predecessori, come il paleontologo Simpson, ma anche con i biologi Mayr e Dobzhansky. Solo correggendo il loro lavoro sarei riuscito a liberarmi dal peso edipico di quelle figure paterne. Allora ho capito che l'idea degli equilibri punteggiati risolveva qualche seria contraddizione fra Simpson da una parte, e Mayr e Dobzhansky dall'altra. Portato a termine questo compito, le implicazioni radicali degli equilibri punteggiati mi sono saltate all'occhio, così ho potuto dedicarmi con più attenzione agli ultradarwinisti. Solo oggi sono pronto ad affrontare Richard Dawkins, Maynard Smith e George Williams.

In *Natural Selection*, George Williams sostiene che molti problemi dell'evoluzionismo non sono ancora stati risolti nel modo soddisfacente in cui credono molti scienziati; dice anche che è sempre più diffusa la tendenza a lasciar cadere le grandi questioni anziché cercare di sviscerarle. È una constatazione deprimente, ma profondamente vera.

I tempi che stiamo vivendo non sono i più adatti per discutere serenamente su questi argomenti. I drammi millenari della sovrappopolazione umana, della distruzione ambientale del pianeta, dell'impoverimento delle specie sono probabilmente destinati a distrarci dalle controversie meno urgenti sulla teoria dell'evoluzione. Prima o dopo il dibattito tornerà in auge, ma io sarò già "estinto".

stephen jay gould Niles Eldredge è il mio collega più caro. Quando due persone collaborano così da vicino, come gli equilibri punteggiati, è inevitabile che qualcuno cerchi di mettere zizzania. Ma nonostante tutti i tentativi, nessuno è mai riuscito a creare attrito fra noi.

Le mie idee sono attaccate più di frequente, perché sono più conosciuto dal pubblico. Ma io e Niles non andiamo d'accordo su tutto. Per esempio lui è un cladista e io no. Inoltre non la pensiamo allo stesso modo su alcuni particolari tecnici della teoria gerarchica della selezione: lui ritiene che vi siano due gerarchie parallele, una genealogica e un'altra cosiddetta economica, che riguarda più espressamente le competizioni palesi in natura. Io credo invece che ci si debba concentrare solo sulle gerarchie genealogiche, dove risiede la causalità.

Siamo amici da tempo. Abbiamo lavorato insieme su questi argomenti per ventun anni, e oggi siamo più vicini di quanto non lo siamo mai stati. Abbiamo fatto anche l'università insieme. Ah, tra l'altro Niles ha una delle migliori collezioni di

cornette vittoriane. Suona sia la cornetta jazz sia la tromba.

daniel c. dennett Con il classico articolo del 1972 sugli equilibri punteggiati, Niles Eldredge, insieme a Stephen Jay Gould, è riuscito a provare che i suoi colleghi paleontologi hanno torto quando pensano che i fossili registrano graduali cambiamenti lungo qualsiasi scala temporale. Era un punto molto importante da chiarire. La cosa ancora più importante è che si trattava di una spiegazione diversa da quella data da Darwin. Anche il padre dell'evoluzionismo aveva notato che i fossili non portavano traccia di molti casi intermedi di cambiamento e spiegava questa lacuna con l'incompletezza dei reperti raccolti. Con il procedere delle ricerche si sarebbero senz'altro trovati i casi intermedi e tutto sarebbe tornato al proprio posto.

Eldredge e Gould invece hanno dimostrato, forse per la prima volta, che anche i fossili più perfetti raccontano una storia evolutiva fatta di cambiamenti discontinui. Come ha sottolineato lo stesso Darwin, la maggior parte delle specie dovrebbero trovarsi solitamente in una fase di stasi. Il cambiamento infatti non avviene continuamente, ma si accumula durante periodi brevi, che punteggiano, appunto, l'equilibrio. Vi sono anche periodi in cui le popolazioni migrano, lasciando i loro territori ancestrali per invaderne di nuovi. Raggiunto un nuovo equilibrio, inizia un'altra lunga fase di stasi. In molti reperti fossili, che rappresentano una sezione sia spaziale sia temporale della natura, i cambiamenti appaiono come l'arrivo improvviso di nuove specie.

Parecchi hanno voluto leggere nella teoria dell'equilibrio punteggiato una confutazione del gradualismo darwinista. È un'interpretazione scorretta: Eldredge lo sa e non lo nega. Gould invece ha forzato la mano, cercando di leggere i vari eventi dell'equilibrio punteggiato in senso antidarwinista. Io penso di poter provare che queste due interpretazioni sono sbagliate. A un'analisi dettagliata, infatti, nessuna ipotesi dell'equilibrio punteggiato risulta veramente rivoluzionaria.

George c. williams Eldredge è un grande paleontologo a cui dobbiamo il fondamentale concetto di stasi: è la stabilità di caratteri che osserviamo di frequente in natura e che pensiamo possa condurre a una rapida evoluzione. Non sono invece colpito dai suoi lavori recenti, scritti in collaborazione con Marjorie Grene, perché mi sembra stia confondendo i concetti della selezione sessuale e dei livelli di selezione.

Gould ed Eldredge, i padri degli equilibri punteggiati, sono spesso considerati insieme. Dei due, Gould è quello che tende a occuparsi dei grandi problemi concettuali, per i quali è certamente più dotato.

lynn margulis Niles Eldredge è un grande interprete dei fossili. Il suo *Fossils*, notevole anche per le illustrazioni, è un'ottima introduzione alla paleontologia dei vertebrati e degli animali marini. Inoltre Eldredge è molto abile nel mostrare come la biologia moderna metta in crisi molti ragionamenti e luoghi comuni tipici della nostra vita quotidiana. Fra le verità scientifiche della biologia e il senso comune si sta aprendo una frattura sempre più profonda, che Eldredge ha saputo indagare con molta lucidità. È uno scrittore che riesce davvero a comunicare, e vorrei che continuasse a scrivere.

w. daniel hillis Anche l'evoluzione dei computer procede per salti. Per molto tempo non è accaduto nulla, poi si è verificato un grosso cambiamento, come se quel mondo avesse improvvisamente preso coscienza di se stesso. Naturalmente mi sto riferendo agli equilibri punteggiati, l'ipotesi formulata dal gruppo di biologi di cui Eldredge è uno dei principali esponenti. Ma osservando con più attenzione, credo che

questa teoria, anziché applicarsi solo ai fenomeni evolutivi su grande scala, possa essere estesa anche alle singole specie. In termini generali, comunque, non vedo come si possa contestare la teoria degli equilibri punteggiati; chiunque abbia qualche dimestichezza con la storia dell'evoluzione dovrebbe considerarla ovvia.

7. Lynn Margulis Gaia è un osso duro

lynn margulis, bioioga, insegna al Dipartimento di biologia dell'Università del Massachusetts. Ha scritto *The Origin of Eukaryotic Cells* (1970), *Early Life* (1981) e *Symbiosis in Cell Evolution* (1993²). È anche coautrice, con Karlene V. Schwartz, di *PFve Kingdoms: An Illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth* (1988²), e con Dorion Sagan di *Microcosmo* (1986, tr. it. 1989), *Origins of Sex* (1986), e *Danza misteriosa* (1991, tr. it. 1992).

In ogni buon museo di storia naturale, come quelli di New York, Cleveland o Parigi, c'è un padiglione di storia dell'evoluzione che comincia dai fossili trilobiti, continua con i nautilidi giganti, i dinosauri, gli orsi delle caverne e tutti gli altri animali estinti che piacciono tanto ai bambini. Ma fino agli anni Sessanta gli evoluzionisti hanno ignorato i fossili nello studio dell'evoluzione, perché non erano in grado di interpretarli, e si sono limitati a studiare la storia della vita sulla Terra degli ultimi cinquecento milioni di anni. Oggi invece sappiamo che la vita è apparsa molto prima, dato che i primi fossili risalgono a quasi quattro miliardi di anni fa.

Anch'io mi occupo di biologia evoluzionistica, ma lavoro sulle cellule e i microrganismi. Scienziati come Richard Dawkins, John Maynard Smith, George Williams, Richard Lewontin, Niles Eldredge e Stephen Jay Gould provengono tutti dalla tradizione zoologica, il che mi fa pensare, come ha detto il nostro collega Simon Robson, che stiano tutti lavorando con dati scaduti da tre miliardi di anni. Eldredge e Gould, e tutti i loro colleghi, tendono a perpetuare un'incredibile ignoranza sui meccanismi d'azione dell'evoluzione, limitando il loro campo di interesse agli animali, incluso ovviamente l'uomo. Con questo non voglio dire che gli animali non siano interessanti; essi però compaiono piuttosto in ritardo sul palcoscenico dell'evoluzione e non ci offrono che una prospettiva superficiale sulle sue maggiori forze creative. Sarebbe come scrivere un'enciclopedia di storia mondiale in quattro volumi facendola iniziare nel 1800 con la fondazione della città di Chicago. Anche se si trattasse di un lavoro ben fatto, non la si potrebbe certo definire una "storia mondiale".

Quando dico "perpetuare l'ignoranza" faccio riferimento all'esclusione di quattro dei cinque regni della vita: l'unico considerato è quello degli animali, mentre vengono ignorati le piante, i batteri, i funghi e i protisti. Ma da un piccolo, seppur interessante capitolo, non si può estrapolare l'intera enciclopedia della vita. Questi evoluzionisti non sono nel torto, quanto grossolanamente disinformati.

Che cosa ignorano? Principalmente la chimica, che è il linguaggio principale della biologia evoluzionistica. Tuttavia non voglio fare di ogni erba un fascio: Gould ed

Eldredge, per esempio, hanno chiaramente dimostrato che i cambiamenti evuzionistici che Darwin si aspettava di verificare nei fossili, in realtà non sono graduali. Le morfologie dei fossili persistono invece per lunghi periodi, e dopo le stasi si notano improvvise discontinuità. Le conclusioni dei due naturalisti sono ormai assodate. John Maynard Smith, invece, ha una formazione ingegneristica e conosce la biologia solo superficialmente: si occupa di rado di organismi viventi, mentre si dedica alla lettura e ai calcoli. Ho il sospetto che sia molto difficile per lui formulare ipotesi su gruppi di organismi di cui non ha mai avuto esperienza diretta. Tutti i biologi hanno infatti bisogno di una comunicazione sensoriale con gli esseri viventi che stanno studiando.

Secondo me, la paleontologia è un approccio utile per ricostruire la storia dell'evoluzione, ma i paleontologi dovrebbero lavorare simultaneamente con i corrispondenti moderni dei fossili: cioè collaborare con i "neontologi", ovvero i biologi. Sia Gould che Eldredge e Lewontin hanno dato contributi molto significativi alla storia naturale, mentre il lavoro di Dawkins, Williams e Maynard Smith emerge dal contesto di una tradizione culturale anglosassone di cui dubito siano loro stessi consapevoli. Alla base di questa tradizione c'è da una parte l'idea fondamentale di Darwin dell'evoluzione per selezione naturale, secondo la quale le popolazioni di organismi cambiano gradualmente nel tempo via via che i suoi membri vengono eliminati. Dall'altra troviamo Mendel che, individuando le leggi della trasmissione dei caratteri genetici da una generazione all'altra, spiega che essi, pur ricombinandosi ogni volta in modo diverso, non cambiano con il passare del tempo. Quando un fiore rosa, nato dall'incrocio di un fiore rosso con un fiore bianco, viene incrociato con un altro fiore rosa, si ottengono fiori o rossi, o bianchi, o rosa, esattamente nelle stesse gradazioni di colori dei nonni o dei genitori. Per questo le specie degli organismi non cambiano nel tempo: i geni semplicemente si mescolano e riemergono in diverse combinazioni, ma a combinazioni genetiche uguali corrispondono fenotipi uguali. Queste affermazioni mendeliane sono vangelo.

Per conciliare le due visioni opposte - l'evoluzionismo di Darwin e la visione pragmatica antievoluzionista di Mendel - John B.S. Haldane e il matematico Ronald A. Fisher hanno creato il neodarwinismo; da essi discende un'intera scuola di evolucionisti di lingua inglese. Fra gli anni Venti e Cinquanta, il linguaggio neodarwinista della genetica delle popolazioni è stato affinato e tradotto in formule matematiche. Alcuni anni dopo ha cominciato a espandersi in Gran Bretagna, Stati Uniti e perfino Giappone.

Sia Dawkins sia Lewontin, che si considerano molto lontani fra loro per vari aspetti, appartengono a questa tradizione. Qualche anno fa, durante una lezione agli studenti di economia dell'Università del Massachusetts, Lewontin spiegò che i cambiamenti dell'evoluzione sono dovuti ai meccanismi identificati da Fisher e Haldane: mutazione, emigrazione, immigrazione e così via. Verso la fine della lezione, aggiunse che nessuna delle conseguenze della sua analisi era mai stata dimostrata empiricamente. Nella sua raffinata trattazione matematica dell'evoluzione non c'era traccia né di biologia né di chimica. Gli chiesi perché, se nulla di quanto aveva detto poteva essere provato sperimentalmente, proponeva un'interpretazione derivante da una falsa teoria socioeconomica. Perché, in altre parole, continuava a insegnare quelle assurdità di cui lui stesso metteva in luce i punti deboli? Per due motivi, mi rispose. Il primo consiste nella cosiddetta invidia della fisica. Vedendomi perplessa, Lewontin mi spiegò che si tratta di una sindrome per la quale i ricercatori di altre discipline anelano alla precisione matematica tipica della fisica. La seconda ragione, ancora più pericolosa, è che, se non avesse presentato i suoi studi dietro una facciata neodarwinista (un linguaggio a mio parere arcaico e totalmente inappropriato), non avrebbe potuto ottenere i finanziamenti necessari per questo tipo di lavoro.

La tradizione neodarwinista di genetica delle popolazioni mi ricorda la frenologia

e credo che sia destinata a fare la stessa fine. Ai posteri sembrerà ridicola, perché in effetti lo è. Io ne sono sempre stata convinta anche quando ero studentessa - e con un rendimento superiore alla media - di genetica delle popolazioni all'Università del Wisconsin, con un ottimo insegnante, James F. Crow. Alla fine del semestre abbiamo dedicato l'ultima settimana a discutere i modelli sperimentali e le osservazioni empiriche, ma nessuno degli esperimenti riusciva a confermare la teoria.

Ho criticato per anni il neodarwinismo matematico, perché per me non ha mai avuto molto senso. Ci dicevano che le mutazioni casuali, la maggior parte delle quali sono notoriamente deleterie, rappresentano la causa principale del cambiamento evolutivo. Mi ricordo che un giorno mi svegliai con questa rivelazione: non sono neodarwinista! Prima di allora avevo avuto un'esperienza simile scoprendo di non essere un'ebrea umanista. Nonostante ammiri il contributo di Darwin e sia d'accordo con la maggior parte delle sue analisi, non sono affatto neodarwinista. Una delle intuizioni più importanti di Darwin è che tutti gli organismi discendono da antenati comuni. Questa asserzione è corroborata da prove schiaccianti, sia genetiche sia chimiche. Le popolazioni di organismi crescono e si riproducono a tassi insostenibili per il mondo, quindi molti di essi muoiono o non riescono a riprodursi prima di aver completato il loro ciclo di vita. La selezione naturale consiste proprio nel fatto che non tutti gli organismi che nascono, si liberano dal guscio, sbocciano, o vengono generati per divisione, possono sopravvivere. Fra essi si possono osservare variazioni ereditarie, di cui alcune prevalgono negli individui che crescono e si riproducono a svantaggio di altri. Queste sono le basi fondamentali dell'evoluzione darwiniana e della selezione naturale, su cui concordano tutti gli scienziati che si possono definire tali.

Abbiamo detto che il neodarwinismo è il tentativo di accordare la genetica di Mendel con il darwinismo. Si tratta di una razionalizzazione che fonde due tradizioni, ciascuna in parte difettosa, in un modello matematico. Qui sta la sua fondamentale debolezza. Infatti il neodarwinismo impiega formalmente un'aritmetica e un'algebra che sono inappropriate per la biologia, la quale si esprime attraverso il linguaggio della chimica. Normalmente ai neodarwinisti manca una solida conoscenza di microbiologia, biologia cellulare, biochimica, biologia molecolare e genetica del citoplasma. Spesso ignorano anche la citologia e l'ecologia dei microbi. Sarebbe come cercare di compiere un'analisi critica delle espressioni idiomatiche e della fraseologia elisabettiana di Shakespeare senza conoscere l'inglese!

Secondo i neodarwinisti la variazione emerge da una mutazione casuale, dove per mutazione si intende qualsiasi cambiamento genetico e per casualità il fatto che i caratteri appaiono nella prole in modo accidentale, ossia senza essere determinati dalla selezione. In altre parole, se un animale ha bisogno di una coda, non la sviluppa per questo motivo; dà luogo piuttosto a una serie di mutazioni, di cui solo quelle dotate di coda sopravviveranno per generare più prole. Negli anni Venti Hermann J. Muller scoprì che, se è vero che i raggi X aumentano il tasso di mutazione dei moscerini della frutta, un certo tasso spontaneo di mutazione si verifica anche fra gli insetti completamente isolati da raggi X, radiazioni solari, e qualsiasi altra perturbazione ambientale. Pertanto le varianti ereditarie appaiono spontaneamente e non hanno nulla a che vedere con il fatto di essere vantaggiose per l'organismo in cui appaiono. Allora la mutazione fu acclamata come la fonte di variazione che rende possibile la selezione naturale, e così si chiuse il cerchio della teoria neodarwinista.

Da molti esperimenti si sa però che esponendo i moscerini della frutta a mutageni come i raggi X o certe sostanze chimiche, si ottengono insetti malati o morti, non l'apparizione di una nuova specie: questa è la vera difficoltà. Ciononostante tutti concordano sul fatto che, in seguito all'intervento di mutageni, si osserva una variazione ereditaria che rappresenta la materia prima della selezione naturale. Da dove proviene questa variazione utile? La questione non è ancora stata risolta. Io sostengo che la più significativa variazione ereditaria proviene da fusioni, da ciò che i

russi, in particolare Konstantin S. Mereschkovsky, hanno chiamato simbiogenesi, e l'americano Ivan Emanuel Wallin *symbiointicism*. Con questo termine, Wallin intendeva l'incorporazione dei sistemi genetici di microbi nelle cellule progenitrici di animali o piante. Il nuovo sistema genetico, una fusione fra il microbo e la cellula animale o vegetale, è molto diverso dalla cellula ancestrale priva del microbo. Qualcosa di simile avviene nella tecnologia dei computer, dove anziché ricominciare ogni volta da capo costruendo da zero nuovi moduli, si interfacciano i moduli preesistenti in modo simbiotico. Dalle fusioni possono emergere esseri nuovi e più complessi. Dubito che le nuove specie possano sorgere semplicemente da mutazioni casuali.

La simbiosi è un'associazione fisica fra organismi di specie diverse, che vivono insieme nello stesso luogo e allo stesso tempo. Il mio lavoro sulla simbiosi deriva dall'osservazione dei sistemi genetici del citoplasma. È noto che i geni stanno nel nucleo, dove risiede il sistema di controllo centrale della cellula. Ma fin dai miei primi studi di genetica sono stata incuriosita dagli altri sistemi genetici che non stanno nel nucleo e che seguono diversi modelli di ereditarietà: il più famoso era un gene citoplasmatico detto killer, che nel protista *Paramecium aurelia* segue particolari leggi ereditarie. Dopo vent'anni di intenso lavoro, e una girandola di ipotesi diverse, si è scoperto che il gene killer è contenuto in un virus all'interno di un batterio simbiotico. Quasi tutti i geni extranucleari sono infatti derivati da batteri o da altri microbi. Andando alla ricerca della vera natura dei geni al di fuori del nucleo, mi sono sempre più convinta che si tratta di entità coabitanti, di altri esseri viventi, come di piccole cellule vive che stanno all'interno di cellule più grandi. Questa scoperta ha portato me e altri scienziati a studiare la simbiosi moderna.

La simbiosi non ha niente a che vedere con il rapporto costi-benefici, con le analogie di tipo economico che hanno corrotto la scienza. Non sto parlando della simbiosi moderna, che presuppone la coabitazione di due organismi diversi, ma della simbiogenesi, cioè la simbiosi di lungo periodo che ha originato nuove forme di vita. Ci si chiede se essa sia avvenuta e stia ancora avvenendo, soprattutto se essa possa costituire una delle principali fonti di cambiamento evolutivo. Io ne sono convinta: la simbiogenesi è il risultato di lunghe convivenze specialmente fra microbi, ed è il motore di tutte le discendenze dei più grandi organismi non batterici.

Nel 1966 scrissi un articolo sulla simbiogenesi (*The Origin of Mitosing Eukaryotic Cells*) che prendeva in considerazione l'origine di tutte le cellule eccetto i batteri, giacché l'origine delle cellule batteriche rappresenta l'origine della vita stessa. IL lavoro fu rifiutato da circa quindici riviste scientifiche, perché presentava lacune teoriche, e anche perché era una materia troppo nuova che nessuno era in grado di valutare. Finalmente James F. Danielli, il direttore di "The Journal of Theoretical Biology", l'accettò e mi incoraggiò. A quei tempi ero una sconosciuta ma, cosa inaspettata, l'articolo ricevette ottocento richieste di ristampa.

Più tardi, alla Boston University, il lavoro vinse un premio come miglior pubblicazione dell'anno della facoltà dove lavoravo, e i miei colleghi del Dipartimento di biologia reagirono al colpo organizzando un ricevimento in mio onore. Molti però tendevano a sottovalutare l'importanza del lavoro o a tacciarlo di astrusità. Ancora oggi la maggior parte degli scienziati non prende in seria considerazione la simbiosi come un meccanismo evolutivo; se lo facesse, dovrebbero cambiare le proprie idee. Nella scienza, di solito, queste rivoluzioni avvengono solo perché certi scienziati muoiono e altri prendono il loro posto.

Tempo dopo, in sei intense settimane di scrittura sviluppai i contenuti dell'articolo nel libro *The Origin of Eukaryotic Cells*. Ma la casa editrice che l'aveva commissionato lo rifiutò. Finalmente, nel 1970, uscì presso la Yale University Press una versione riveduta e migliorata. Nel 1993, con il titolo *Symbiosis in Cell Evolution*,

ne è stata pubblicata una terza edizione.

Questo libro contiene il lavoro di tutta una vita: descrive il ruolo della simbiosi nell'evoluzione delle cellule, che porta direttamente all'origine della divisione mitotica della cellula e della sessualità meiotica. Il mio contributo più importante è la spiegazione di come le diverse forme batteriche, in presenza di pressioni ecologiche, si associano fra loro; e di come grandi cambiamenti metabolici e genetici possono trasformare queste comunità strettamente integrate in individui, ossia in un livello organizzativo più complesso. In questione c'è dunque l'origine batterica delle cellule nucleate di animali, piante, funghi e protisti.

Mentre Gould e gli altri tendono a enfatizzare le differenze fra una specie e l'altra, io affermo che le specie formano nuove entità composite attraverso meccanismi di fusione. A mio avviso la simbiogenesi è un meccanismo evolutivo che esercita un'influenza determinante sulla biologia dello sviluppo, la tassonomia, la sistematica, la biologia cellulare e perfino la geologia. Se la simbiogenesi è tanto controversa, è proprio per le sue numerose implicazioni: gli scienziati non amano sentirsi dire che hanno coltivato per anni l'orticello sbagliato.

Il radicalismo delle mie argomentazioni non ha altro scopo che quello di spingere altri scienziati a scardinare l'ortodossia scientifica. Se le idee contenute nel mio libro *Five Kingdoms* venissero prese sul serio, le scuole dovrebbero cambiare i programmi d'insegnamento; le case editrici i loro cataloghi; i librai modificare le etichette su scaffali e cassette; i dipartimenti delle università riorganizzarsi; la nasa, la National Science Foundation e i vari musei dovrebbero cambiare le qualifiche ai loro ricercatori e ai comitati di programmazione. Passare dalla concezione "piante contro animali" ai cinque regni di animali, piante, batteri, funghi e protisti, ha implicazioni talmente profonde per tutti gli aspetti della biologia intesa come attività sociale che si possono facilmente comprendere le attuali resistenze. Gli scienziati, e coloro che li finanziano, devono rifiutare o ignorare questa potenziale riorganizzazione, perché spostare i confini e stringere nuove alleanze è inconsueto e costa caro. È molto più comodo affidarsi a categorie intellettuali obsolete.

Per più di un miliardo di anni l'unica vita su questo pianeta è consistita di cellule batteriche prive di nucleo: i cosiddetti procarioti. Sono cellule molto simili fra loro, diciamo pure un po' noiose dal punto di vista dell'uomo. Tuttavia i batteri sono all'origine della riproduzione, della fotosintesi, del movimento, di tutte le manifestazioni interessanti della vita, eccetto, forse, quella del linguaggio. Noi viviamo letteralmente in mezzo ai batteri: sono ancora loro i padroni della Terra.

A un certo punto però è apparso sulla scena un nuovo tipo di cellula più complessa, la cellula eucariotica, quella di cui sono composti piante e animali. Questa cellula contiene un nucleo e vari organelli: com'è avvenuta dunque la sua straordinaria evoluzione? Com'è apparsa sul pianeta?

Probabilmente, all'inizio si è verificata un'invasione di predatori. Tutto può essere iniziato con un tipo di batteri molto aggressivi che cercavano di invaderne altri, alla ricerca di cibo, naturalmente. Ma certe invasioni danno luogo a tregue, con relativi trattati di pace. Quando i batteri invasori, nuotando, si sono installati all'interno dei loro ospiti più lenti, la loro unione di forze ha creato un nuovo intero che si è rivelato molto più grande della somma delle sue parti. Si sono così evoluti nuotatori molto più veloci e capaci di trasportare grandi quantità di geni, pronti a buttarsi a capofitto nella lotta dell'evoluzione. Con la nascita della cellula moderna, si sono via via aggiunte altre associazioni batteriche.

Una prova della simbiogenesi nell'origine della cellula è rappresentata dai mitocondri, gli organelli contenuti nella gran parte delle cellule eucariotiche e dotati di un loro dna. Tutti noi abbiamo, in aggiunta al dna del nucleo (il genoma umano), un dna mitocondriale che ereditiamo solo dalle nostre madri, mai dai padri. Pertanto in

qualsiasi fungo, animale o pianta (e nella maggior parte dei protisti) convivono fianco a fianco due distinte genealogie. In una certa fase dell'evoluzione questi organelli costituivano probabilmente microrganismi distinti.

Recentemente David Luck e John Hall, genetisti della Rockefeller University, hanno fatto una scoperta straordinaria, che io avevo previsto più o meno venticinque anni fa. Hanno dimostrato, con tecniche oggi molto affidabili, una cosa che non stavano nemmeno cercando: l'esistenza di un dna particolare al di fuori del nucleo della cellula, del cloroplasto e perfino dei mitocondri. Questi geni extranucleari possono essere interpretati come ciò che rimane degli antichi batteri, il cui comportamento aggressivo diede origine a una successiva fusione.

Se questa scoperta verrà confermata - è stata infatti confutata da almeno tre gruppi di altri ricercatori - il sistema genetico non nucleare scoperto da Hall e Luck nelle alghe può rappresentare il "fossile" dei batteri rimasti al nostro interno. La crescita, la riproduzione, la comunicazione di questi batteri mobili, in cerca di alleanze, sono diventate tutt'uno con il nostro pensiero, la nostra felicità, le nostre sensazioni e stimoli. Le implicazioni di questo mio punto di vista sono notevoli: anche l'uomo sarebbe letteralmente abitato da residui mobili di antichi batteri diventati una parte di noi stessi.

Questi esseri parziali, che prosperano dentro di noi, rappresentano la parte fisica dell'anima, cioè della vita e del movimento. Da questo potrebbe discendere addirittura una conferma del materialismo, nel senso più grossolano del termine. Mettiamola così: un elemento chimico purificato, preparato dal cervello, viene aggiunto a un altro elemento chimico purificato. Le due entità, che costituiscono due diversi tipi di proteine della motilità, nuotano insieme e sono in grado di muoversi da sole: così i biochimici e i biologi cellulari ci possono mostrare il minimo comun denominatore del movimento e della locomozione. Dell'*Anima*. Ebbene, io interpreto queste proteine della motilità come il residuo dei batteri nuotatori incorporati dai nostri antenati.

Il sistema di movimento primario è ben caratterizzabile dal punto di vista fisico e chimico: tutti i biologi e i biochimici concordano sul fatto che le proteine della motilità sono composte dai tipici legami fra carbonio e idrogeno. Credo però che sia giunto il momento di spingersi oltre queste evidenze e chiedersi prima di tutto fino a che punto l'origine dell'evoluzione implichi la simbiogenesi. Ciò consentirà di acquisire una nuova consapevolezza delle basi fisiche del pensiero. Il pensiero e il comportamento umano diventano molto meno misteriosi se ci si rende conto che sensibilità e capacità di scelta sono già sviluppate nelle cellule microbiche nostre antenate. Perfino i filosofi trarrebbero vantaggio da una maggiore conoscenza delle proteine della motilità. Scienziati e non scienziati saranno motivati a imparare la chimica, la microbiologia, la biologia evuzionistica e la paleontologia per gettare nuova luce sulle grandi questioni ancora aperte.

Sebbene abbia lavorato principalmente sull'evoluzione cellulare, il mio nome ricorre spesso insieme a quello di James Lovelock e alla sua ipotesi Gaia. Nei primi anni Settanta stavo cercando di collegare i batteri ai loro percorsi metabolici. Tutti i tipi di batteri di cui volevo ricostruire l'evoluzione producono gas di almeno trenta tipi diversi, fra cui ossigeno, anidride carbonica, azoto, ammoniaca e acido solfidrico. Tuttavia, mentre l'ossigeno atmosferico veniva ritenuto da tutti un prodotto biologico, nessuno degli scienziati da me interpellati attribuiva un'origine biologica agli altri gas atmosferici come azoto, metano e zolfo. Che fare, allora? "Vai a parlare con Lovelock", mi dissero.

Lovelock riteneva che questi gas fossero troppo abbondanti nell'atmosfera per essere originati solo da processi chimici e fisici. A quell'epoca aveva già formulato un'ipotesi su quali organismi potessero averli esalati, arrivando alla conclusione che l'atmosfera è un sistema fisiologico e non meramente chimico.

L'ipotesi Gaia stabilisce che la temperatura del pianeta, lo stato ossidativo e la composizione chimica di tutti i gas della bassa atmosfera (con l'eccezione di elio, argon e altri gas non reattivi) sono prodotti e mantenuti costanti dalla somma dei processi vitali. Con Lovelock affrontammo argomenti come la regolazione della temperatura del pianeta da parte degli organismi, e di come la materia vivente riesce a mantenere stabile la composizione dei gas atmosferici (per esempio il 20 per cento di ossigeno e una o due parti per milione di metano).

Solo dopo giorni e giorni di conversazione riuscii a comprendere le idee di Lovelock. La mia prima reazione fu di associare le sue idee a quelle, ben note, dei neodarwinisti, perché pensavo volesse sostenere anche lui che gli organismi si adattano al loro ambiente. Mi era difficile capire ciò che Lovelock tentava di spiegarmi, giacché, trattandosi di idee nuove, gli mancava il vocabolario adatto. Ascoltandolo e rivolgendogli domande, forse l'ho aiutato a sviluppare le sue teorie; il mio contributo non è mai andato oltre a questo.

L'ipotesi Gaia è biologica, ma non è incentrata sull'uomo. Coloro che vorrebbero far diventare Gaia una dea della Terra che mantiene miracolisticamente le condizioni di vita dell'uomo restano delusi da Lovelock. Gli ambientalisti temono invece che Gaia - in virtù delle sue capacità autoregolative - assolva qualsiasi forma di inquinamento ambientale. Perché dovremmo preoccuparci, se i sistemi naturali possono risolvere autonomamente tutti i problemi? Certo, Gaia sa prendersi cura di sé e difendersi dalle aggressioni chimiche. Ma è anche probabile che questo autorestauro del pianeta avvenga solo dopo l'estinzione dell'uomo.

Lovelock sostiene che la Terra è un organismo. Io non sono d'accordo, perché nessun organismo si ciba dei propri scarti. Preferisco dire che la Terra è un enorme ecosistema composto da ecosistemi più piccoli. Lovelock pensa che presentando la Terra come qualcosa di più complesso di una semplice massa di rocce, la gente imparerà finalmente a rispettarla. L'intento è nobile ma assai poco scientifico, e so già che Lovelock ribatterebbe che gran parte della scienza attuale ha ben poco di scientifico. Come dargli torto? Mi rendo conto che il suo modo di comunicare Gaia dà migliori risultati del mio.

Se la scienza non si adatta all'ortodossia culturale viene rigettata, poiché quasi nessuno ha voglia di cambiare le proprie convinzioni, soprattutto quelle biologiche. Nonostante cerchi di riconoscere questi pregiudizi anche in me stessa, non sono sicura di poterli evitare del tutto. L'unico rimedio è di attenersi alle osservazioni dirette dei fenomeni.

Gaia è un osso duro, un sistema che ha funzionato per più di tre miliardi di anni senza gli uomini. La superficie di questo pianeta, la sua atmosfera e il suo ambiente continueranno a evolversi per molto tempo dopo la scomparsa degli uomini e dei loro pregiudizi.

daniel c. dennett Una delle migliori idee che abbia mai incontrato è quella di Lynn Margulis sulla nascita della cellula eucariotica attraverso una trasformazione cominciata con l'invasione parassitaria di una cellula da parte di un'altra. Quando l'ha proposta per la prima volta, è stata schernita da tutti, e mi fa molto piacere che adesso sia accettata come una teoria fondamentale. Penso alla Margulis come a uno degli eroi della biologia del nostro secolo.

Alcuni dei suoi scritti divulgativi più recenti invece mi disturbano, perché mi sembra che vogliano far trionfare sempre e comunque la cooperazione sulla competizione. Certo, nella rivoluzione eucariotica è successo proprio questo; ma non è detto che la cooperazione sia la norma, che sia sempre una cosa buona e possibile. È stato un evento raro che ha consentito la nascita dei sistemi di vita multicellulari. Non

può essere però interpretato come una prova che la natura sia sempre cooperativa, perché non è vero.

George williams Probabilmente sono ingeneroso, ma mi sembra che Lynn Margulis sia afflitta dalla sindrome "Dio è buono", secondo la quale la natura deve essere sempre giusta e benevola. Io invece non vedo altro che esseri crudeli dotati di denti e artigli. Attenzione! In realtà là fuori c'è un mondo sanguinario.

La Margulis vede cooperazione ovunque, come se gli organismi passassero il loro tempo a scambiarsi un sacco di gentilezze. Questa idea porta diritto all'ipotesi Gaia. Si tratta di una metafora, ma c'è chi la interpreta come una dea e credo che anche Lynn Margulis, nel suo intimo, la pensi così. Di me dirà la stessa cosa: che io penso che Dio sia cattivo e che tutte le Sue creazioni non sono altro che il male. Il tempo deciderà chi di noi due ha ragione, e dimostrerà che il mio approccio ha consentito di fare previsioni migliori.

lee smolin Lynn.Margulis è stata per molti anni uno dei miei eroi. Per me è uno dei più grandi scienziati americani viventi, dotata com'è della capacità di generare un pensiero originale e significativo pur rimanendo ancorata alla realtà. Anche Richard Feynman era così: non si poteva parlare di fisica senza parlare anche della natura. Non posso giudicare l'influenza della Margulis sugli altri biologi, benché sia convinto che molti di loro abbiano da fare ancora molta strada per raggiungerla. Come fisico posso dire che ha avuto un'enorme influenza sul nostro modo di intendere la biologia. Tre aspetti del suo pensiero - l'importanza della simbiosi nell'evoluzione, l'ipotesi Gaia, e il concetto che tutto il mondo vivente è un'elaborazione della vita microbica - sono a mio parere determinanti per capire la relazione fra la vita e i fenomeni fisici.

Per molti anni ho potuto apprezzarla solo attraverso i suoi scritti e per ciò che sentivo dire di lei. Due anni fa l'ho conosciuta a un pranzo, durante il quale ha difeso l'ipotesi Gaia contro un biologo lì presente, che aveva osato criticarla su un giornale. L'ha letteralmente chiuso in un angolo smontando pezzo dopo pezzo il suo articolo, che aveva mandato a memoria. Devo dire che assistendo a questa scena ho pensato a Galileo che difendeva la tesi copernicana durante le feste organizzate dai nobili romani. In lei ho visto la stessa fiducia, insieme all'insofferenza nei confronti di coloro che fraintendono volutamente le nuove idee. Per molti anni ho pensato che fossimo appena in grado di intravedere le implicazioni della teoria darwiniana della selezione naturale. Sono sicuro che Lynn Margulis ha saputo cogliere meglio di chiunque altro il significato che il darwinismo ha per il mondo naturale e per la nostra relazione con esso.

Ciò che non riesco a capire è l'animosità che regna fra i vari teorici dell'evoluzione, come Lynn Margulis, Richard Dawkins e gli altri. Secondo me, l'idea che il mondo si sia evoluto per variazione e selezione può convivere sia con il concetto della simbiogenesi, sia con l'ipotesi Gaia. Poiché esiste, il mondo vivente deve essere una singola entità che si organizza autonomamente. E l'unico modo in cui una tale complessa e sconvolgente innovazione può manifestarsi, è attraverso la variazione casuale e la selezione naturale. I biologi si dilungano in discussioni riguardo alla scala sulla quale opera la selezione naturale. Agisce sull'ecosistema, sulla specie, sull'individuo o sul gene? I fisici sanno che i sistemi autorganizzati sono sistemi cosiddetti critici, in cui le correlazioni esistono e si evolvono a tutti i livelli possibili. Quindi io credo che l'evoluzione avvenga contemporaneamente su tutte le scale. Naturalmente l'informazione è codificata a un solo livello, quello del gene. Ma dato che essa si esprime a partire dalla singola cellula fino alla biosfera, la probabilità che un gene si riproduca viene influenzata dal suo effetto su tutti i domini.

Certo, sarebbe bello avere una teoria generale dei sistemi autorganizzati, in modo da sviluppare una comprensione generale del mondo biologico e della sua evoluzione: è stato il sogno mio e di tanti altri fisici, per molto tempo. Proprio di recente abbiamo cominciato a scoprire alcuni concetti - come quello dell'autorganizzazione - che potrebbero avere un ruolo in questa teoria.

Marvin Minsky Gli animali che conosciamo oggi non si sono evoluti dal nulla ma, con l'eccezione dei batteri, derivano praticamente tutti dalla fusione di tre o quattro animali primitivi. Così siamo arrivati fino a oggi.

Niles Eldredge Lynn è straordinaria. La sua scoperta dell'origine simbiotica della cellula eucariotica è probabilmente la più importante della biologia moderna. All'inizio Lynn fu criticata come se avesse avuto un'idea folle, mentre adesso il concetto viene presentato da tutti i libri di testo come un'ovvietà.

Il suo coinvolgimento con Gaia è stato invece piuttosto confusionario: si tratta dell'idea di James Lovelock che la Terra è un organismo vivente. I commenti della Margulis sulla biologia evoluzionistica qualche volta mancano il bersaglio. Come me e molti altri, anche lei pensa che la metafora della competizione per il successo riproduttivo sia troppo enfatizzata nel paradigma ultradarwiniano. D'altra parte, non c'è dubbio che esista competizione in natura, mentre lei cerca di mettere in risalto solo la cooperazione.

Richard Dawkins Ammiro molto il coraggio e l'energia di Lynn Margulis nel sostenere la teoria dell'endosimbiosi, portandola dall'eresia al cuore dell'ortodossia. Mi riferisco alla teoria secondo cui la cellula eucariotica deriva dall'unione simbiotica di cellule procariotiche primitive. Si tratta di una delle grandi conquiste della biologia evoluzionista del xx secolo.

Ho incontrato Lynn per la prima volta a un congresso nel sud della Francia, e mi è sembrato di poter andare abbastanza d'accordo con lei. In seguito, ogni volta che ci siamo incontrati, l'ho trovata estremamente ostinata. Ho il sospetto che sia una di quelle persone che sanno di avere ragione e che non ascoltano gli altri, mentre a me sembra di ascoltare e anche di cambiare idea se qualcuno mi presenta un argomento convincente. Forse mi sbaglio. Il fatto che abbia avuto ragione sull'origine della cellula eucariotica non significa che tutto quello che dice sia oro colato.

Un buon esempio è l'ipotesi Gaia. In primo luogo non credo che Lovelock abbia espresso chiaramente, almeno nel suo primo libro, quale sia il tipo di selezione naturale che definisce l'unità adattativa, che nel suo caso era il mondo intero. Se parli di un'unità a qualsiasi livello della gerarchia della vita, allora ci deve essere un qualche tipo di selezione che avviene nell'informazione che si autoreplica. Quindi occorre chiedersi: qual è l'equivalente del dna? Quali sono le unità del codice? Quali di queste unità vengono replicate?

Lovelock non si è mai posto queste domande. Guardo con scetticismo i suoi tentativi di spiegare perché c'è proprio quella quantità di metano nell'atmosfera. Mi convince ancora meno quando afferma che ci sono gas benefici per il mondo intero prodotti dai batteri per puro spirito cooperativo. È un'ipotesi assurda in un mondo darwiniano, almeno fino a quando ammettiamo che esiste selezione naturale sul piano dei geni dei singoli batteri. Quei batteri infatti non si prendono la briga di produrre i gas solo perché sono benefici per il resto del mondo. Naturalmente la cosa mi sta bene, invece, se i batteri individuali che producono il gas traggono da esso qualche beneficio. Ma in questo caso non c'è bisogno di ricorrere all'ipotesi Gaia: basta prendere in

considerazione ciò che conviene individualmente ai singoli batteri e ai loro geni.

francisco varela Considero Lynn Margulis uno dei biologi più brillanti e importanti vissuti dopo gli anni Venti, quando Thomas H. Morgan e John B.S. Haldane hanno stabilito le basi della biologia evoluzionistica su basi cellulari. Da allora il singolo contributo significativo che ha riunito la biologia a tutti i livelli, dalla geologia, alla biologia molecolare, all'evoluzione, l'ha dato Lynn.

La sua idea fondamentale, introdotta negli anni Settanta, è quella dell'evoluzione attraverso la simbiosi. Allora nessuno le voleva credere, mentre oggi il concetto è largamente accettato e ha aperto una nuova interpretazione dei rapporti fra microrganismi.

Devo però rivolgerle qualche critica. Negli anni più recenti si è spostata verso una sfera più culturale, più tipica della cultura umanistica. Trovo che sia uno sviluppo negativo. Per esempio il suo libro sulle origini del sesso, *Danza misteriosa*, scritto con Dorion Sagan, è ingenuo, pieno di stereotipi e privo di prospettiva storica. Ho letto su "Nature" la famosa recensione fatta da Richard Dawkins, veramente tagliente, e devo ammettere che per una volta mi sono trovato completamente d'accordo con lui. È un peccato che Lynn Margulis abbia imboccato questa strada.

L'ho conosciuta anche perché è stata una dei primi biologi che hanno apprezzato il lavoro che ho svolto con Humberto Maturana negli anni Settanta, sull'organizzazione biologica cellulare in un sistema autopoietico. L'ha subito notata e incorporata nel suo lavoro. E per me è stato molto importante, perché mi ha fatto capire che non ero completamente "fuori dal giro".

w. daniel hillis Gran parte del lavoro scientifico viene effettuato rispettando una serie di regole molto rigide, in cui sai esattamente chi sono i tuoi pari, e i risultati vengono valutati secondo criteri molto ristretti. Questo sistema funziona bene all'interno in quel tipo di scienza che Gould definisce addizionale. Ma se cerchi di cambiare la struttura, se cerchi di dimostrare qualcosa che non trova spazio all'interno di una disciplina o una teoria consolidata, non fai altro che crearti dei nemici. A Lynn Margulis è successo proprio questo.

La sua visione della simbiosi non si adattava all'ortodossia scientifica. Allora ha cercato di aggirare le regole e di parlare direttamente al pubblico. La cosa ha dato particolarmente fastidio, perché alla fine aveva ragione lei.

Parte seconda

La mente è un bricolage

La metafora dell'elaborazione di dati, intesa come attività del computer e della

mente umana, è fondamentale nella terza cultura. Pensiamo al volo degli uccelli: per capirlo si possono anche osservare gli aeroplani, dato che i principi generali del volo e dell'aerodinamica valgono per le macchine come per gli animali. Allo stesso modo l'analogia fra l'elaborazione di dati operata dal computer e dal cervello serve agli scienziati per formulare nuove interpretazioni dei sistemi complessi.

I primi studi scientifici sulla mente andavano in cerca di principi fondamentali, come quelli della fisica. Non a caso la prima psicologia cognitiva era zeppa di matematica, quando addirittura non andava alla ricerca di un improbabile "atomo", il mattone costitutivo della mente. Come si poteva prevedere, questi tentativi hanno fatto fiasco. Perché la mente, ossia il cervello, è il risultato estremamente complesso della selezione naturale, e le sue numerose proprietà emergenti possono essere comprese solo attraverso un'ottica ingegneristica.

Con il procedere delle ricerche si è scoperto che il mondo della mente è pieno di curiosi marchingegni alla Rube Goldberg, complicati e poco pratici. La cosa ovviamente non va a genio alle persone dotate di un forte senso estetico, che vorrebbero una scienza sempre precisa e cristallina, come la matematica pura di Newton. Fin dai tempi di Platone, infatti, l'estetica ha ispirato un'idea di scienza in cui tutto è bello, simmetrico e deducibile da pochi principi fondamentali.

Del tutto diversa è l'estetica che emerge da questo libro, in cui le bellezze della natura derivano da complessità formidabili, riscontrabili dai livelli più elementari. La prospettiva computazionale, di macchine fatte di macchine fatte a loro volta di macchine, va in senso ascendente. Pur trattando di fenomeni naturali, questo libro è letteralmente infarcito di ragionamenti e teorie basati su metafore macchinistiche.

Il leader dell'intelligenza artificiale è Marvin Minsky. Secondo il cibernetico del mit il cervello è composto da una miriade di strutture diverse. Gli scienziati che, come lui, accreditano l'interpretazione più spinta dell'intelligenza artificiale sono convinti che il modello computerizzato di un cervello riuscirà un giorno a spiegare tutte le capacità cognitive di cui siamo oggi a conoscenza. Minsky identifica la coscienza con la fase più alta del pensiero astratto, e ritiene che, in linea di principio, le macchine possano riprodurre l'attività del cervello umano.

Roger Schank è un cibernetico e psicologo cognitivo che si occupa da vent'anni di intelligenza artificiale. Anche lui la pensa come Minsky; tuttavia, invece di cercare di costruire una macchina intelligente, i suoi sforzi teorici sono rivolti alla decostruzione del cervello umano. In particolare, gli interessa scoprire i meccanismi di elaborazione della lingua madre, di memorizzazione e di apprendimento. Per Schank il cervello è uno strumento per imparare, ma a cui di solito si insegna nel modo sbagliato. Gli piace andare controcorrente: per esempio deplora i metodi scolastici odierni, con programmi di studio troppo specializzati e controintuitivi. I suoi contributi più recenti sono di natura pedagogica e riguardano l'impiego dei computer per facilitare il processo di apprendimento.

Daniel Dennett studia la coscienza, e come Minsky la considera un genere particolare di pensiero astratto. Il filosofo della Tufts University è noto per essere il maggior sostenitore del modello computazionale della mente. E come tale ha incrociato spesso la spada con filosofi come John Searle, che è invece convinto dell'impossibilità di far derivare dalla metafora informatica gli aspetti più importanti della coscienza, come l'intenzionalità e la qualità soggettiva. Ovviamente Dennett è diventato il teorico prediletto dell'intelligenza artificiale. Negli ultimi anni si è dedicato a quella che definisce "la pericolosa idea di Darwin", schierandosi dalla parte di ultradarwinisti come George Williams e Richard Dawkins e criticando energicamente le idee di Stephen Jay Gould.

Nicholas Humphrey è uno psicologo sperimentale che vent'anni fa ha dato il primo impulso al nuovo campo della psicologia evoluzionistica con la sua teoria della

funzione sociale dell'intelletto. Ma nel capitolo a lui dedicato parla delle sue idee più recenti sulla natura della coscienza fenomenologica. Mentre Dennett crede che la funzione dei filosofi sia quella di diradare gli equivoci del senso comune a proposito della natura della coscienza, Humphrey ritiene che proprio queste intuizioni primitive debbano essere rivalutate: in particolare la sensazione istintiva dell'essere coscienti. Humphrey è opposto e complementare a Dennett: c'è chi lo giudica uno scienziato romantico, molto più vicino a uno stile di razionalità narrativa che alla ricerca pura. Ma probabilmente Humphrey non sarebbe d'accordo nemmeno nel tracciare una divisione così netta tra fatti e racconti.

Francisco Varela, biologo sperimentale e teorico, studia i cosiddetti "sé emergenti" o "identità virtuali". Ha una visione immanente della realtà, basata sul concetto di autorganizzazione e un'epistemologia derivata dal buddhismo più che dall'ingegneria e dall'informatica. La sua è una sfida all'interpretazione tradizionale dell'intelligenza artificiale, secondo cui il mondo esiste indipendentemente dall'organismo, il quale deve cercare di costruire un modello adeguato del mondo, da "consultare" prima di intraprendere qualsiasi azione. Il mondo non rappresentativo di Varela, invece, non ha una sua esistenza assoluta, ma è il prodotto delle interazioni fra gli organismi e l'ambiente.

Varela ha lavorato anche in altri campi: il suo primo contributo è stata la teoria dell'autopoiesi dei sistemi viventi, che riescono a mantenere costante la propria identità a dispetto del continuo cambiamento dei loro componenti. Questo studioso cileno sfugge a facili definizioni. È un neuroscienziato convertitosi all'immunologia, un esperto di scienze cognitive, alle quali riserva frecciate velenose. Il suo concetto di "emergenza" testimonia tutta la complessità teorica del personaggio: lungi dal richiamare l'idea vitalistica - in voga negli anni Venti - di una proprietà scaturente in modo inesplicabile da operazioni meccaniche di livello più basso, tale concetto indica l'apparire della totalità dalla dinamica delle parti che lo compongono. In definitiva, per Varela la classica visione delle scienze cognitive basata sul modello informatico pecca di meccanicismo.

Nello psicologo sperimentale Steven Pinker troviamo l'artefice delle grandi sintesi fra evolucionismo, cognitivismo e linguistica. Pinker ha svolto interessanti ricerche di laboratorio sul processo visivo e sulle dinamiche dell'acquisizione del linguaggio; è stato inoltre uno dei primi psicologi a sviluppare un modello computazionale dell'apprendimento infantile delle parole e della grammatica della lingua madre, conciliando l'innatismo linguistico di Noam Chomsky con i concetti darwiniani di adattamento e selezione naturale.

Dobbiamo a Pinker una delle critiche più efficaci del modello della mente basato sulle reti neurali. Secondo lui, infatti, perfino le azioni più semplici compiute dall'uomo, come raccogliere una matita, riconoscere un colore o il viso di una persona amica, rimandano a una complessità irriducibile ai processi logici di un calcolatore, per quanto raffinato. Le attività cerebrali non possono pertanto essere espresse attraverso algoritmi.

Il nome di Roger Penrose è collegato al tentativo di accordare fisica classica e quantistica. Anche per il fisico e matematico di Oxford il fatto della coscienza non può trovare una formulazione soddisfacente nei computer attualmente esistenti. Per spiegare la capacità del cervello di riconoscere la verità matematica, infatti, Penrose ritiene che la fisica debba far entrare in gioco elementi non computazionali derivati dalla teoria della gravità quantistica. Molti suoi colleghi lo considerano una pecora nera della fisica, e pensano che abbia messo su delle arie dopo il successo del suo libro *La mente nuova dell'imperatore*, che sul "New York Times" ha ottenuto inespugnabilmente il settimo posto nella classifica dei best seller. Il libro è una gimcana indavolata attraverso i concetti della fisica, zeppa di formule e di equazioni. Probabilmente piace perché, affermando che la mente umana non può essere sostituita

da una macchina, Penrose dice ciò che il pubblico vuole sentirsi dire. È come se acquistando il libro si entrasse in possesso di un talismano a difesa delle proprie credenze.

Fra i suoi colleghi scienziati c'è invece meno sostegno per quella che viene considerata una teoria troppo radicale. Ma Penrose viene comunque rispettato, per la sua onestà e la sua lucidità intellettuale. Nell'ultimo libro *Shadows of the Mind* affronta in modo rigoroso gli argomenti scientifici che riguardano la sua teoria della mente.

8. Marvin Minsky

Macchine intelligenti

marvin minsky è un matematico e un informatico. Insegna Media Arts and Science al Massachusetts Institute of Technology. È tra i fondatori dell'Artificial Intelligence Laboratory del mit, della Logo Computer Systems Inc. e della Thinking Machine Inc. Nel 1986 ha scritto *La società della mente* (tr. it. 1989) e nel 1990 ha vinto il Japan Prize, la più alta onorificenza scientifica del Giappone.

Come chiunque altro, passo la maggior parte del tempo a pensare. Ma soprattutto penso al pensiero. Mi chiedo cose del tipo: Come facciamo a riconoscere gli oggetti? Come prendiamo le decisioni e come elaboriamo nuove idee? In che modo impariamo dall'esperienza? I miei interessi non si limitano però alla psicologia. Mi affanno anche intorno a problemi di tipo matematico, fisico, biologico e ingegneristico. Ogni qual volta un quesito sembra troppo difficile, cerco di capire perché, ed ecco che ritorno daccapo alla psicologia. Ciascuno di noi, di fronte a un rompicapo, ha le sue tecniche di difesa. Una delle più usate è chiedersi se stiamo affrontando il problema per il verso giusto. Un'altra tecnica utile consiste nel domandarsi quali caratteristiche dovrebbe avere una macchina per poterlo risolvere.

Un secolo fa non ci si poteva nemmeno immaginare di costruire macchine intelligenti. Oggi invece di idee ce ne sono molte, sebbene non si sia ancora capito come metterle insieme in un unico progetto. Io mi occupo essenzialmente di questo.

Lo studio delle macchine intelligenti prese il via negli anni Quaranta con la cosiddetta cibernetica, per poi estendersi ad altre discipline come l'informatica, la neuropsicologia, la linguistica computazionale, la teoria del controllo, la psicologia cognitiva e l'intelligenza artificiale. Recentemente, a queste si sono aggiunte le nuove scienze del connessionismo, della realtà virtuale, degli agenti intelligenti e della vita artificiale.

Da dove nasce, oggi, questo interesse verso le macchine capaci di apprendere e di pensare? È evidente che questi aggeggi servono e già oggi sono in grado di risolvere molti grattacapi. Tuttavia, credo che questo fiorire di ricerche abbia anche una motivazione negativa, derivante dalla inadeguatezza dei concetti della psicologia tradizionale. Nei primi anni del secolo, la psicologia ha compiuto grandi progressi, elaborando teorie interessanti in settori tutto sommato marginali come quelli

dell'apprendimento, della percezione e del linguaggio. Poco ha saputo dire invece sui temi centrali: ossia il pensiero, il significato, la coscienza e le emozioni.

Ai primordi della psicologia moderna non sono mancati contributi molto promettenti, fra i quali vanno annoverate le teorie di Freud, Piaget e degli psicologi della Gestalt. Purtroppo erano idee troppo complesse per poter essere verificate su soggetti in laboratorio. Non potendo essere confermate o confutate, tali teorie sono state escluse dal campo della scienza. Oggi, in realtà, i nostri computer sono sufficientemente potenti per simulare menti artificiali dotate di queste caratteristiche, sempre che se ne possano dare descrizioni abbastanza chiare a uso dei programmatori.

Benché i primi calcolatori moderni risalgano agli anni Cinquanta, solo nel decennio successivo, con macchine più veloci e memorie più potenti, il campo dell'intelligenza artificiale cominciò a registrare i primi veri progressi. Nuovi sistemi furono elaborati a ritmo sempre più serrato, e verso la fine degli anni Settanta cominciarono a esserci le prime applicazioni utili. Paradossalmente, proprio quando la creatività tecnica era al suo massimo, i progressi teorici rallentarono fino quasi a fermarsi. Cercai di capire perché e arrivai alla conclusione che i nostri cosiddetti "sistemi esperti" potevano servire solo per applicazioni molto limitate. Nessuno adombrava nemmeno lontanamente quella che si potrebbe definire un'intelligenza completa, o un senso comune.

Alcuni avevano creato, per esempio, ottimi programmi per giocare a scacchi. Altri programmi erano in grado di dimostrare ardui teoremi matematici, o di riconoscere configurazioni visive come i caratteri di stampa. Guai però a chiedere allo scacchista di dimostrare un teorema, o al matematico di fare una partita a scacchi: andava tutto a rotoli. Vi fu allora chi sostenne che bisognava fondere insieme questi programmi parziali, in modo da avere macchine più versatili. Già, ma come? Ancora oggi è pressoché impossibile far lavorare insieme due programmi di intelligenza artificiale.

È questo il nodo che ho tentato di sciogliere con il mio libro *La società della mente*. Mi ero già imbattuto in questa difficoltà quando, negli anni Sessanta, io e Seymour Papert cominciammo a metter mano alla costruzione di un "manipolatore a guida visiva": in parole semplici, un robot dotato di occhi e mani. Perché un automa sia in grado di "vedere", è necessario che riconosca l'apparenza degli oggetti e le relazioni che intercorrono fra loro. Semplice a dirsi, ma non a farsi. Sulle prime, ciascuno dei nostri ricercatori cercò di sviluppare una parte del compito. Uno dei progetti, per esempio, prevedeva di riconoscere i margini di un oggetto per poi comporli in un'unica immagine. Disgraziatamente, però, accadeva spesso che un margine non fosse visibile, oppure che non ci fosse abbastanza contrasto, o ancora che non di un margine si trattasse ma di una decorazione presente sulla superficie dell'oggetto. Insomma, per un verso o per l'altro il sistema non faceva il suo dovere. Un altro ricercatore cercò di etichettare la superficie degli oggetti in base alla sfumatura e alla conformazione al tatto. Niente da fare: anche questo programma funzionava solo in certi casi. Provando e riprovando, concludemmo che dovevamo cambiare strada.

Perché era così difficile combinare metodi differenti all'interno di uno stesso automa? Credo che la ragione vada cercata nell'impreparazione culturale della comunità scientifica, che considerava poco serio, quasi immorale e contrario allo spirito della "buona programmazione" procedere in questo modo empirico. Allora, come adesso, il paradigma accettato era di trovare un buon metodo per svolgere un compito, dopodiché non restava che lavorare su di esso fino all'eliminazione dell'ultima imperfezione. Sembra un modo di procedere sensato, e invece è completamente sbagliato. Ammesso di riuscire a emendare da qualsiasi difetto un programma studiato per una specifica applicazione, basta usarlo per qualcos'altro, in un nuovo

ambiente, perché vada in tilt.

Chi ha a che fare con programmi informatici sa bene di cosa parlo. I programmatori ci scherzano su e parlano spesso di "marcio nel software" (*software rot*) quando un programma che ha girato bene per anni improvvisamente comincia a compiere errori, senza che apparentemente nulla sia cambiato. Ancora oggi chi lavora nell'informatica passa la maggior parte del tempo a rendere i programmi più precisi e affidabili, sicché quella che un tempo era un'arte adesso viene presentata come una scienza esatta. A mio avviso si tratta di una tendenza da non assecondare; perché mai, infatti, qualcosa dovrebbe funzionare perfettamente? Ciò ha senso solo in un mondo chiuso, rigido e immutabile, ma un mondo siffatto esiste solo nella mente dei teorici. L'unico modo perché i calcolatori non compiano errori è farli lavorare su modelli matematici astratti, in cui tutte le regole vengono date una volta per tutte. Nel mondo reale, invece, nulla può essere dato per definitivo, anche perché il genere umano ha il vizio di cambiare continuamente le carte in tavola.

Ma torniamo ai nostri primi tentativi informatici. I nostri fallimenti ci condussero a diventare più eclettici e a dotare il nostro robot di una pluralità di sistemi; ma né lui né i suoi discendenti diedero grandi prove di perspicacia. Concludemmo che per rendere questi automi più elastici e affidabili - in una parola, più vivi - avremmo dovuto studiare la mente umana, specialmente la sua meravigliosa capacità di trarsi d'impiccio in quasi ogni situazione. Qual è la differenza fra il pensiero umano e il modo di procedere dei computer? Secondo me, la differenza fondamentale è che davanti a qualsiasi errore un programma di computer s'incepta, mentre il cervello sa superare la difficoltà. Questo perché raramente noi abbiamo a disposizione un solo metodo. Una cosa la possiamo fare in molti modi diversi, così se uno fallisce ce n'è sempre un altro a disposizione. Per riconoscere un amico, per esempio, possiamo guardarlo in faccia, oppure ascoltarne la voce, guardare come cammina, osservare il colore dei capelli eccetera. Disponendo di una tale varietà di approcci, non è poi così importante perfezionarli oltre un certo limite. È molto meglio imparare a riconoscere le situazioni in cui ognuno di questi metodi funziona o è a rischio di errore. Nel caso in cui tutti falliscano, nulla ci vieta d'inventare una nuova via.

Già un secolo fa Sigmund Freud poneva l'accento sulla censura e sugli altri meccanismi che ci impediscono di fare ciò che abbiamo imparato a evitare. Ho il sospetto che sistemi simili si siano evoluti all'interno del nostro cervello, e che la nostra centralina cerebrale sia dotata fin dalla nascita di svariati meccanismi di apprendimento, alcuni dei quali accumulano conoscenze negative di questo tipo. Sicché, mentre una parte immagazzina conoscenze relative a quando attivare un metodo particolare, un'altra impara a costruire specifici "soppressori" o "censori" in grado di opporsi all'uso di ciascuno di questi metodi. Altri meccanismi ancora imparano come ci si deve comportare quando due o più metodi entrano in conflitto fra loro.

L'idea è davvero semplice: la nostra mente dispone di una collezione di modi differenti per svolgere ciascuno dei compiti che si prefigge. Eppure questa idea disturba la visione che nel corso dei secoli ci siamo formati della mente. In particolare, noi tutti crediamo che all'interno di ogni persona vi sia rintanata un'altra persona - il cosiddetto Sé - capace di pensare e provare emozioni al posto nostro. È il Sé che elabora i nostri progetti, che ci fa prendere decisioni che poi approva o delle quali si pente. Il più importante filosofo della mente, Daniel Dennett, dà a questa entità il nome di teatro cartesiano: ossia la convinzione fantasiosa che nella mente vi sia un luogo speciale dove confluiscono tutti gli eventi mentali allo scopo di essere conosciuti. Per questa concezione, tutte le altre attività cerebrali - la percezione, la memoria, l'elaborazione linguistica, il controllo dei movimenti - non sarebbero che meri accessori che il Sé utilizza per i propri scopi.

Si tratta ovviamente di un'idea assurda, che non spiega nulla. Perché allora è così

diffusa? Semplice: proprio perché non spiega alcunché. Essa è una qualità estremamente utile alla nostra vita quotidiana, poiché ci solleva dall'incombenza di chiederci ogni volta per quale motivo ci siamo comportati nel tal modo o abbiamo provato la tale sensazione. Avere le spalle coperte da un Sé è come avere una bacchetta magica capace di cancellare non solo il desiderio ma anche la responsabilità di capire le nostre decisioni. Basta dire "ho deciso così" e, oplà, tutto il peso delle scelte passa sulle spalle di questo fantomatico padrino. Probabilmente, questa idea nasce durante l'infanzia, quando ognuno di noi guardando dentro se stesso per la prima volta prova la sensazione di essere una persona fra le altre, del tutto simile a coloro che lo circondano. Il lato positivo di questa intuizione è che ci aiuta a prevedere come ci comporteremo in certi frangenti sulla base del comportamento altrui.

Alla lunga, tuttavia, il concetto del Sé si rivela un ostacolo a una comprensione più profonda di noi stessi. E quando i nostri modelli interni non ci sono più di aiuto, siamo costretti a rivolgerci altrove per chiedere lumi su come condurre la nostra vita. Ecco allora che chiediamo una mano ai genitori, agli amici, allo psicoanalista, o in mancanza di meglio a un manualetto di autoaiuto o a uno di quei tipi che si attribuiscono poteri psichici. Siamo letteralmente scaraventati fuori da noi stessi, perché la mitologia del Sé non è più in grado di spiegarci cosa succede quando affrontiamo nuove esperienze come i conflitti, la confusione, i sentimenti ambigui, o quando proviamo gioia, dolore, amore e odio, sicurezza o incertezza. Il Sé non sa spiegare perché certe volte sappiamo ragionare così brillantemente e altre facciamo fiasco in modo così clamoroso, e non sa distinguere la sfera dell'intelletto da quella delle emozioni.

Quello delle emozioni è un problema affascinante: che cosa sono in realtà? Sto cercando di elaborare alcune teorie generali sulla loro natura e su come potremmo imparare a controllarle e a farne tesoro. Gli psicologi hanno proposto molte teorie sui vari aspetti della mente, ma nessuno dopo Freud ha più tentato un'interpretazione complessiva delle loro interazioni.

Ci si potrebbe chiedere perché dovrebbe aver successo una nuova teoria delle emozioni se tutte quelle precedenti hanno fallito. Credo di poter rispondere che tutti i tentativi precedenti hanno percorso un vicolo cieco. Gli psicologi soffrono di una forma assai grave di invidia della fisica: sono sempre andati alla ricerca di un numero ristretto di principi elementari in base ai quali spiegare la complessa vita della mente. Hanno voluto imitare Isaac Newton, che ha saputo ridurre la meccanica a tre semplici leggi del movimento. Io seguo il metodo opposto.

Le funzioni del cervello non sono riconducibili a pochi principi basilari; al contrario, le regole in gioco sono centinaia, forse migliaia. Si potrebbe dire che ogni parte del cervello è frutto di un bricolage selvaggio, che consiste nell'aggiungere di volta in volta nuovi ingranaggi a un meccanismo, fino a che questo non è in grado di funzionare a dovere. È un modo di costruire basato sulle circostanze e le opportunità, non certo su un progetto organico. Questa verità è facile da verificare: sfogliando l'indice di qualsiasi testo di neuroscienze ci si accorge che il cervello è caratterizzato da centinaia di parti diverse - paragonabili a tanti sottocomputer -, ognuna deputata a una funzione specifica. Ma se la mente fosse informata da pochi principi elementari, il cervello non sarebbe certo così complicato.

In realtà i nostri cervelli non si sono evoluti a partire da poche regole auree, bensì in modo opportunistico, selezionando mutazioni che ci hanno consentito di sopravvivere in ambienti diversi nel corso di milioni di anni. Solo ora stiamo cominciando a capire quali sono le funzioni delle singole parti dell'organo del pensiero, e temo che la ricerca durerà a lungo. Quando l'avremo terminata, scopriremo probabilmente che molte di queste strutture mentali si sono evolute per colmare le lacune di quelle precedenti, lacune che ci appaiono evidenti solo a cose fatte. È tipico dell'evoluzione sviluppare nuove strutture e solo allora accorgersi che è troppo tardi

per tornare indietro a correggere i vecchi sistemi dai quali in parte dipendiamo ancora.

In base a queste considerazioni credo sia sbagliato ostinarsi nella ricerca di leggi generali. Se mi si chiedesse una definizione di cervello, direi che è una collezione di gadget che fanno certe cose, più altri gadget che correggono le imperfezioni dei primi, più altri accessori ancora che intercettano gli errori e le loro interazioni negative. Insomma, un assortimento piuttosto incasinato di meccanismi che consentono al cervello di fare il suo mestiere.

Quando ero ragazzino passavo il tempo a smontare aggeggi di ogni genere per capire come funzionavano. Sono cresciuto a New York. Mio padre era oftalmologo e casa nostra era sempre piena di gente interessante, fra cui molti musicisti, scrittori e scienziati. Leggevo ogni sorta di libri, ma in genere ero più interessato a quelli di matematica, chimica, fisica e biologia. Io e i miei amici non abbiamo mai perso tempo nello sport, la politica, le chiacchiere e la narrativa tradizionale. Adoravo solo la fantascienza, soprattutto quella di Jules Verne, H.G. Wells e Hugo Gernsback. Più tardi ho scoperto la rivista "Astounding Science Fiction" e mi sono deliziato con la lettura dei grandi pionieri del genere, come Isaac Asimov, Robert Heinlein, Lester del Rey, Arthur C. Clarke, Harry Harrison, Frederick Pohl, Theodore Sturgeon, così come dei romanzi del loro grande editore-scrittore John Campbell. Per me erano eroi intellettuali paragonabili a Galileo, Darwin, Pasteur e Freud. Con la differenza che molti di essi erano ancora vivi e che anni dopo avrei avuto il piacere di conoscerli e diventarne amico, insieme ai loro eredi Gregory Benford, David Brin e Vernon Vinge. Collaborare con uomini dotati di un'immaginazione così sviluppata è stata per me un'esperienza profonda e importante.

Ovviamente ho letto anche un sacco di testi tecnico-scientifici; ma a parte la fantascienza, il resto della narrativa mi annoiava mortalmente, con quelle storie così ordinarie e ripetitive. Secondo me gli scrittori di fantascienza sono i nostri pensatori più originali, mentre gli altri non fanno che rifriggere le stesse trame prese da Sofocle e da Aristofane. Sempre le stesse osservazioni sulla natura umana; gli stessi conflitti, gli stessi amori e tradimenti. Che barba! Trovo assai più stimolante immaginare - come fanno gli scrittori di fantascienza - che cosa accadrebbe se le nostre tecnologie e le nostre società fossero diverse da quello che sono.

Oltre che a leggere, ho passato i miei anni giovanili a costruire oggetti, a comporre musica e a progettare nuove macchine. Quando mi sono iscritto ad Harvard nel 1946, i calcolatori non esistevano ancora, con l'eccezione del Mark I, a cui peraltro non prestai la minima attenzione. A esso s'interessò invece il mio compagno di scuola media Anthony Oettinger, che in seguito divenne il primo professore d'informatica di Harvard. Nel 1952 Anthony elaborò uno dei primi programmi per consentire al calcolatore d'imparare.

Ad Harvard i miei primi amori furono per la fisica - in special modo la meccanica e l'ottica - e la matematica; ma dopo poco tempo cominciai a interessarmi anche di neurofisiologia e psicologia dell'apprendimento. In quegli anni ebbi la fortuna di lavorare con il grande B.F. Skinner e con alcuni giovani professori, fra i quali George Müller e Joseph Licklider, che si occupavano di cibernetica, una disciplina che nasceva dalla tremenda collisione fra la psicologia tradizionale e l'ingegneria dei sistemi sviluppatasi durante la seconda guerra mondiale.

La cosa più importante che mi successe a quell'epoca fu d'imbattermi nel libro di Nicholas Rashevsky *Mathematical Biophysics* mentre bighellonavo fra gli scaffali della Widener Library. Quel libro m'insegnò come ricavare modelli astratti da cose concrete. In seguito, nel giornale diretto da Rashevsky, il "Bulletin of Mathematical Biophysics", ebbi modo di leggere i lavori di Warren McCulloch e Walter Pitts. Il primo articolo risaliva al 1943 e riguardava i neuroni-soglia e le macchine a stati, una teoria che suggeriva la possibilità di costruire calcolatori connettendo fra loro neuroni logici. A

questo seguì lo straordinario saggio del 1947 dedicato alla visione e alla teoria del gruppo, da cui nacque il teorema dell'invarianza di gruppo che io e Seymour Papert presentammo nel libro del 1969 *Perceptrons*.

Fu proprio leggendo quei lavori e i primi volumi della Macy Conference che iniziai a pensare alla costruzione di macchine capaci di apprendere. E quando nel 1949 venne pubblicato il rivoluzionario *Cybernetics* di Norbert Wiener, importantissimo soprattutto sotto il profilo matematico, l'argomento mi era già abbastanza familiare.

Mentre ero intento a pensare a possibili macchine dotate di reti neurali e capaci di imparare a risolvere problemi, mi imbattei nel concetto che passò alla storia con il nome di "sinapsi di Hebb", dallo psicologo di Montreal Donald Hebb. Questo mi spinse a progettare una macchina in cui una rete di sinapsi connesse in modo casuale potesse calcolare in modo approssimativo le correlazioni fra stimoli e risposte. Per la costruzione di questa macchina, che chiamai snarc - per esteso Stochastic Neural Analog Reinforcement Calculator - George Miller riuscì a ottenere un finanziamento dall'Office of Scientific Research dell'aeronautica militare.

snarc era composta da circa quattrocento valvole e una quarantina di ingranaggi a innesto magnetico, ai quali era demandata la regolazione automatica di alcuni potenziometri. A loro volta, questi dovevano controllare le probabilità che ciascuna sinapsi trasmettesse un segnale da un "neurone" all'altro. La macchina ottenne il non disprezzabile risultato di simulare il comportamento di un topolino che impara a uscire da un labirinto. Descritta nella mia tesi di dottorato del 1954, la macchina snarc cadde nel dimenticatoio e nessun ricercatore sviluppò le considerazioni che avevo delineato in quel lavoro.

In effetti si trattava di un computer molto rudimentale; se da una parte riusciva ad apprendere determinate cose, dall'altra mostrava la tendenza a inciampare quando si presentavano problemi più complessi. In alcuni casi, anzi, non riusciva a imparare proprio nulla. Lo scacco m'indusse a pensare alle questioni relative all'euristica della risoluzione dei problemi, e a come questi potevano essere risolti nel senso opposto, cioè procedendo dall'alto al basso.

A quel tempo erano pochi coloro che si occupavano di reti neurali, un campo in cui per la verità non successe nulla di particolarmente significativo fino ai lavori di John Hopfield del Caltech nei primi anni Ottanta. Tuttavia, già verso la fine degli anni Cinquanta, un'altra teoria, quella delle reti "loop-free" o "feed-forward", aveva compiuto importanti progressi. Il principale fu indubbiamente l'invenzione da parte di Frank Rosenblatt delle macchine "Perceptrons", basate su un ottimo algoritmo di apprendimento. L'aspetto interessante di queste macchine era la loro capacità di apprendere solo quando correggevano errori; anche perché quando procedevano correttamente non ricevevano nessuna ricompensa. Sfortunatamente questa idea non ebbe il seguito che avrebbe meritato.

Un'altra importante direzione di ricerca nel campo della risoluzione automatica dei problemi era quella seguita da Allen Newell, J.C. Shaw ed Herbert Simon. Nel 1956 i tre informatici riuscirono a elaborare un sistema in grado di dimostrare quasi tutti i teoremi di calcolo proposizionale di Russell e Whitehead. Io stesso avevo stabilito alcune semplici regole logiche per dimostrare un buon numero di teoremi di Euclide, mentre il mio amico John McCarthy lavorava con successo alla formalizzazione logica di alcuni ragionamenti del senso comune.

Ben presto il campo dell'intelligenza artificiale esplose con i lavori sulla visione del computer di Larry Roberts e sul calcolo simbolico di Jim Slagle. Tanto che intorno al 1963 Tarpa - cioè l'Advanced Research Projects Agency del Ministero della Difesa - cominciò a finanziare generosamente una serie di laboratori di ricerca. I seguaci delle reti neurali di Rosenblatt presentarono progetti un po' megalomani e questo creò una

certa polarizzazione nell'ambiente dell'intelligenza artificiale. Il contrasto fra noi e loro verteva soprattutto su un aspetto: i sostenitori più estremisti delle reti neurali sembravano quasi compiacersi dell'idea che le loro macchine eseguissero certe operazioni in modo inspiegabile a loro stessi. E quando io e Seymour cercammo di chiarire perché esse erano in grado di risolvere certi problemi ma non altri, questi neovitalisti lo interpretarono come un attacco politico nei loro confronti. Dal fattaccio cominciarono a girare certe malignità su di noi, sulle quali è meglio sorvolare. Riprendiamo piuttosto il filo del ragionamento sull'intelligenza artificiale.

Come ci si deve comportare quando non si riesce a risolvere un problema in un unico passo? Bisogna spezzarlo in tanti sottoproblemi da affrontare separatamente. Cominciai a occuparmi dell'argomento nei primi anni Sessanta, quando riepilogai le conoscenze allora disponibili in un lungo saggio intitolato *Steps Toward Artificial Intelligence*. Sebbene non si trattasse di una vera e propria sintesi, il lavoro contribuì a stabilire una terminologia uniforme e i principali obiettivi della nuova scienza. Credo di poter affermare che alcune tecniche passate in rassegna in quel saggio non sono ancora state indagate in modo adeguato.

Dopo aver tentato vari approcci alla questione dell'intelligenza artificiale, mi accorsi che erano tutti insufficienti. Ciascun metodo andava bene per un certo tipo di situazione, ma si rivelava inappropriato per altri. Fu evidente allora che per realizzare una macchina realmente intelligente bisognava trovare il modo di far lavorare insieme più sistemi; io e Seymour definimmo questa nuova impostazione "società della mente".

Osservando il funzionamento del cervello, notiamo che è costituito da centinaia di reti neurali differenti. Infatti, quando provochiamo lesioni a parti diverse del cervello, anche i sintomi cambiano radicalmente. Da ciò deducemmo che l'organo del pensiero è in grado di conoscere solo a patto di utilizzare più metodi contemporaneamente. Qual è il rischio a utilizzarne uno solo per volta? È evidente: basta che le cose cambino anche di poco per bloccare il nostro pensiero. Se invece abbiamo tre o quattro modi diversi di rappresentarci un evento, è molto improbabile che l'ambiente circostante cambi al punto da metterli tutti fuori gioco.

Le persone si trovano continuamente a dover affrontare situazioni appena leggermente difformi da quelle precedenti, sicché è sempre necessario accumulare nuovi punti di vista e nuovi meccanismi di reazione. Volendo ottenere un processo di apprendimento con le reti neurali, sarà dunque necessario progettarne diverse: una servirà a raccontare storie, una a rappresentare strutture geometriche, un'altra a stabilire nessi causali, un'altra ancora a organizzare la visione tridimensionale e così via. Il segreto dell'intelligenza è che non ha segreti. Il mistero e la magia non abitano qui.

roger schank Marvin Minsky è la persona più brillante che abbia mai conosciuto. È pieno di idee fenomenali e non ha perduto un colpo. E poi è incredibile come non invecchi mai, come in fondo resti sempre un bambino avido di nuove scoperte: è una dote dei grandi pensatori e che vorrei possedere anch'io. Molti scienziati, invece, perdono la capacità di pensare in modo originale quando diventano troppo importanti e potenti. Questo a Marvin non potrà mai succedere.

Marvin avrebbe dovuto essere il relatore della mia tesi. Benché non sia stato un suo allievo, lo considero di fatto un maestro. Il suo punto di vista è anche il mio e sull'intelligenza artificiale abbiamo idee molto simili. Anche per me la mente non è altro che una collezione di gadget da bricolage.

steven pinker A Minsky si deve la nascita e il successo delle scienze cognitive e l'idea geniale di considerare la psicologia come una sorta d'ingegneria rovesciata. Mi

convince di meno quando pontifica sulla struttura della mente a partire dalle sue intuizioni. Sta diventando sempre più un guru e sempre meno un ricercatore impegnato in ricerche empiriche su aspetti specifici dell'attività mentale, quali la visione, il linguaggio, la logica. Buona parte del suo lavoro è fatto di elucubrazioni da salotto più che da seri studi in laboratorio o sul campo.

francisco varela Non si può negare che Minsky abbia avuto intuizioni davvero brillanti, come quella della società della mente. In questo va associato ai molti altri scienziati che hanno sottolineato la presenza di una molteplicità di agenti nei sistemi cognitivi.

Come uomo devo confessare che lo trovo un rompicoglioni e un arrogante figlio di puttana. Minsky è uno di quegli individui pronti a sparare giudizi sugli altri senza nemmeno conoscerli. Lo dico per esperienza diretta. Durante una conferenza a cui eravamo presenti entrambi, mi ha apostrofato così prima ancora che io avessi aperto bocca: "Sai benissimo perché sono incazzato con te; è per lo stessa ragione per cui ce l'ho con Fernando Flores e Terry Winograd". In realtà lui adora Winograd. Io gli sto sulle scatole in quanto cileno e in quanto amico di Flores, che secondo Minsky ha distolto Winograd dalla retta via dell'intelligenza artificiale per convertirlo a quello che Minsky considera un mucchio di stronzate. Che io c'entri qualcosa o meno in questa storia, lui mi ha comunque messo in quella combriccola di rinnegati. Bel tipo, eh?

daniel c. dennett Su molte cose io e Minsky la pensiamo allo stesso modo; solo che a me sembrano un po' più complicate che a lui. Marvin crede di aver risolto tutti i problemi e pretende che gli si riconosca questo merito. In cuor suo pensa che molti ricercatori fanno i problemi più difficili di quanto siano in realtà e che ciò non succederebbe se prestassero più attenzione a ciò che va ripetendo da tempo. Lui ha le soluzioni giuste in tasca; nei momenti di debolezza ammette che non sono ancora perfette, ma è solo questione di dettagli. Anche se avesse ragione - e con qualche sforzo d'immaginazione lo si potrebbe persino credere - Minsky ha comunque torto nell'avanzare queste pretese. I suoi libri sono importanti, ma non sono sufficienti a esaurire le questioni delle scienze cognitive. Forse mi odierà per ciò che sto per dire, ma la prosa di Minsky assomiglia a quella di certi filosofi che pensano alle teorie correnti come a semplici note a margine di Platone e Aristotele. Se non si scende mai sotto certi livelli di astrazione, ciò può essere tanto vero quanto sterile. Basta avere un buon fiuto teoretico ed evitare di impantanarsi nei dettagli per non sbagliare mai; non per questo, però, si fanno compiere grandi progressi alla conoscenza.

Marvin ha fatto cose egregie. Uno dei suoi contributi più significativi è stato di mostrare più volte quante cose si possano costruire partendo dai mattoncini dell'intelligenza artificiale. Se si è dotati di sufficiente immaginazione e si ha l'abitudine di non nascondere sotto il tappeto le difficoltà nelle quali ci s'imbatte, leggere Minsky fa bene, perché fa capire come idee semplici possano generare conseguenze molto interessanti. L'intelligenza artificiale non è altro che questo: il suo limite è che talvolta non porta da nessuna parte. Non tutte le idee di Minsky sono buone, ma molte lo sono.

9. Roger Schank

Informazione uguale sorpresa

roger schank, informatico e cognitivista, dirige l'Institute for the Learning Sciences, alla Northwestern University. È docente di ingegneria elettrotecnica e informatica, nonché di psicologia, pedagogia e politica sociale. Ha scritto quattordici libri sulla creatività, l'apprendimento e l'intelligenza artificiale, fra i quali ricordiamo *The Creative Attitude: Learning to Ask and Answer the Right Questions*, con Peter Childers (1988), *Dynamic Memory* (1982), *Tell Me a Story* (1990) e *The Connoisseur's Guide to the Mind* (1991).

Il mio lavoro consiste nel cercare di capire la natura della mente umana. Sono interessato in particolare a costruire modelli informatici della mente, soprattutto per quanto riguarda l'apprendimento, la memoria e l'elaborazione del linguaggio naturale. Mi interessa il modo in cui comprendiamo le frasi, in cui esercitiamo la facoltà del ricordo; cerco di capire come un evento ce ne fa ricordare un altro e come riusciamo a trarre insegnamenti dall'esperienza. Sono noto nel campo del cognitivismo per aver affermato che esistono strutture mentali - dette "script" -, le quali aiutano a comprendere una sequenza di eventi e a ricavarne inferenze utili al nostro comportamento razionale.

Secondo me, l'informazione nasce con la sorpresa. Noi confidiamo sul fatto che il mondo va avanti sui soliti binari; tuttavia quando ciò accade ci annoiamo. La molla della conoscenza scatta quando un'attesa viene delusa, e paradossalmente i nostri schemi mentali - gli "script" - sono interessanti non quando funzionano ma quando falliscono. Se il cameriere non arriva con il piatto che abbiamo ordinato, siamo costretti a chiederci perché; se il cibo fa schifo o è eccellente, la curiosità si risveglia. La voglia d'imparare nasce dagli imprevisti.

La prima cosa che si deve sapere sulla mente è che si tratta di un formidabile strumento di apprendimento. Noi siamo spesso impegnati a imparare qualcosa di nuovo. Quando la gente si dice annoiata, è perché non ha nulla da imparare; ma appena c'è qualcosa di nuovo da apprendere, ecco che la noia svanisce in un batter d'occhio. Attenzione, però: si può imparare solo ciò che sta a un livello leggermente superiore a quello in cui ci troviamo. L'apprendimento va per gradi ed esige preparazione.

Mi sono dedicato anche all'analisi della memoria, una facoltà strettamente connessa a quella dell'apprendimento. Essa mi sembra organizzata intorno a un indice di concetti desunti dall'esperienza; sulla base di questi punti salienti, la memoria riorganizza continuamente le informazioni in ingresso, ed è per questo che ho costruito programmi chiamati memorie dinamiche. Il mio tentativo più ambizioso è di mettere i computer in grado di ricordare allo stesso modo della mente umana.

Infine mi sono occupato del linguaggio naturale, battendo una strada diversa da quella dei linguisti: mentre costoro si concentrano sulla sintassi, io preferisco scandagliare la semantica, ovvero capire in che modo si può estrarre il significato da una frase indipendentemente dalla sua forma grammaticale.

Su questo punto ho avuto molti contrasti con i linguisti, i quali ritengono che l'essenza del linguaggio stia nella sua struttura sintattica. Nell'ambiente sono noto come "arruffone", probabilmente perché la mia visione della mente umana è quanto di più lontano si possa immaginare dal nitore cartesiano della linguistica moderna. A me piace sguazzare nei fenomeni mentali più contorti e spuri, dai quali emerge la realtà di una mente che riesce a essere intelligente mescolando fra loro le cose più bizzarre.

Nel mio libro *Dynamic Memory* ho fatto un esempio che mi pare renda bene ciò che voglio dire: è la storia del barbiere e della bistecca. Una volta mi stavo lamentando con un amico del fatto che mia moglie cuoce sempre troppo la bistecca. "Anch'io, trent'anni fa, quando vivevo in Gran Bretagna, andavo da un barbiere che non mi tagliava mai abbastanza corti i capelli", disse il mio amico. Dopo un primo momento di sconcerto, mi sono chiesto come diavolo gli fosse venuto in mente una cosa simile, e soprattutto perché. Il "come" è evidente: in quel contesto la bistecca e il taglio dei capelli facevano parte di uno stesso indice concettuale: io e il mio amico abbiamo chiesto a qualcuno di eseguire un compito che non ha saputo svolgere in modo soddisfacente. Ci si chiederà ora come abbiamo costruito questi indici. Semplice: il mio amico ha elaborato un indice in modo da pescare nella sua mente una storia che avesse la stessa etichetta della mia. La seconda domanda è perché costruiamo questi indici. La ragione è che per comprendere la realtà abbiamo bisogno di accordare continuamente i nuovi eventi alle esperienze passate.

Grazie a questo genere di ragionamenti basati su casi, noi possiamo imparare dalle nuove esperienze. Per poterle elaborare, infatti, associamo a esse delle etichette caratterizzate da un alto grado di astrazione. L'insieme di queste voci costituisce una sorta di lemmario all'interno della nostra memoria, grazie al quale è possibile condurre complessi ragionamenti analogici che fanno progredire la conoscenza. Paragonando il caso della bistecca a quello del barbiere, il mio amico ha sviluppato un ragionamento che si potrebbe esprimere in questi termini: "In effetti l'esperienza che ho avuto in Gran Bretagna non è così rara; succede molto spesso che le persone si astengano dal portare a termine un compito perché lo reputano eccessivo". Davanti a questo ragionamento, la mia mente torna alla voce "moglie" e scopre che probabilmente cuoce troppo la bistecca perché pensa che io la voglia troppo al sangue.

Negli anni Sessanta e Settanta gli studiosi di intelligenza artificiale erano tutti protesi a elaborare programmi capaci di capire o di tradurre frasi. Oggi questo risultato appare scontato e non c'è più entusiasmo per ricerche siffatte. La nuova frontiera consiste nell'affrontare problemi reali costruendo macchine in grado di sviluppare un tipo d'intelligenza più vicina a quella dell'uomo in carne e ossa. Ma per fare ciò è necessario comprendere, per esempio, come si possa imparare raccontandosi storie, come avviene realmente un ragionamento, oppure in quale modo un pensiero si articola in un enunciato. Questo è il genere di questioni che mi affascina.

Vent'anni di lavoro in questo settore mi hanno insegnato, però, che quello dell'intelligenza artificiale è un compito immane. Per costruire una macchina veramente intelligente ci vorrà moltissimo tempo, sicuramente più di quanto me ne resta da vivere. Le future generazioni di automi dovranno avere una quantità enorme di conoscenze e di memoria, nonché essere dotati di programmi molto sofisticati. I giornalisti, ma non solo loro, si aspettano che da un giorno all'altro qualcuno inventi una brillante scorciatoia per realizzare subito automi intelligenti. Poveri illusi! In realtà l'evoluzione umana dovrebbe essere un chiaro esempio di come l'intelligenza sia un processo lungo e faticoso. Per un bambino di dieci anni, imparare a destreggiarsi nel mondo è un compito tutt'altro che semplice, che richiede diligenza e applicazione. Lo stesso vale per le macchine: l'unica via per diventare intelligenti è di accumulare lentamente nuove informazioni, ognuna delle quali va delicatamente modellata su quelle già acquisite. Le scale dell'apprendimento vanno fatte un gradino alla volta, di modo che ogni elemento possa collocarsi nella casella giusta.

Ci si chiede spesso attraverso quali esperienze deve passare una macchina per poter imparare. Le stesse dell'uomo: deve leggere il "New York Times" tutti i santi giorni, deve fare domande, conversare e così via. Credere che una macchina possa acquisire l'intelligenza in altro modo è totalmente sbagliato.

Uno degli argomenti che oggi mi interessano maggiormente è l'educazione. Secondo me il sistema scolastico andrebbe rifatto di sana pianta: me ne sono convinto

confrontando il modo in cui gli individui imparano e il modo in cui la scuola insegna. Ebbene, lungi dal convergere, le due attività mi sembrano inconciliabili. Oggi a scuola gli studenti devono leggere un sacco di roba, ed è su queste letture che vertono le lezioni. Poi gli si fa vedere un filmato, mentre l'ora dopo devono risolvere un problema e magari barrare le caselle di un lunghissimo test. Andare a scuola significa mandare a mente nuove nozioni, fare esercizi e rispondere a terribili questionari.

Immaginiamo di adottare questo sistema per imparare a gustare il cibo e il vino. Alla prima ora ci fanno leggere delle pubblicazioni sull'alimentazione; alla seconda ora ci fanno vedere un documentario sul Bordeaux e la cucina del cinghiale e dell'orata; alla terza ora veniamo sottoposti a un'interrogazione sui principi della culinaria e della vinificazione del Merlot. La mattina si conclude con un bel questionario.

Abbiamo imparato qualcosa sul vino e sul cibo? Siamo in grado di distinguere un Borgogna da un Dolcetto? Neanche per sogno. Se non si mangia e non si beve, la teoria è del tutto inutile. Per imparare bisogna seguire la via opposta: prima di tutto bisogna amare il buon vino e la cucina e solo allora saremo interessati ad approfondire la conoscenza su questi argomenti.

Il sistema scolastico ignora il dato fondamentale, e cioè che s'impara solo ciò che si ha voglia d'imparare. Se una cosa piace la si fa il più possibile, e più la si fa più si vorrebbe imparare a farla meglio. Non si può insegnare a guidare a una ragazzo dandogli da leggere il manuale della scuola guida, bensì mettendolo al volante di un'automobile.

Molte scuole fanno di tutto per evitare agli allievi le vere esperienze della vita. A un ragazzo che vuole conoscere come gira veramente il mondo, non resta che andarsene là fuori, fare qualcosa e imparare dall'esperienza e dagli errori.

Alle scuole medie e alle superiori si sudano sette camicie per allontanarsi dalla conoscenza. Leggendo Dickens in terza media ho imparato a detestarlo. Dieci anni dopo ho ripreso in mano *David Copperfield* e l'ho trovato interessante, perché evidentemente ero pronto per leggerlo. Ogni tanto chiedo provocatoriamente perché un ragazzo di dodici anni deve leggere Dickens; mi rispondono che così prevede il curriculum.

Ecco un altro punto importante: secondo me non dovrebbe esserci nessun curriculum. Gli studenti dovrebbero limitarsi a seguire i loro interessi, assecondati in questo da insegnanti in grado di rispondere alle loro domande e di guidarli verso nuovi argomenti che sorgono spontaneamente nel corso degli studi. Ci si accorgerebbe così che, partendo dalle raccolte di figurine, si può arrivare del tutto naturalmente a studiare Hegel o il calcolo differenziale. In realtà la scuola vuole fare avanzare tutti con lo stesso passo; in fondo si tratta di un'ottima baby-sitter, che consente ai genitori di andare a lavorare tranquilli senza che i loro figlioli si ammazzino appena escono di casa.

Molti insegnanti hanno il sacro terrore delle domande degli studenti. Ovviamente, quelli più in gamba le apprezzano, ma è comunque difficile che abbiano il tempo di rispondere a tutte le curiosità e alle richieste di chiarimento di una o più classi. L'ideale sarebbe che ogni studente avesse un precettore, come usava un tempo nelle famiglie benestanti. Oggi al posto dei precettori potrebbero subentrare i computer: solo loro possono rendere possibile un insegnamento individuale. Purtroppo i software educazionali oggi in circolazione sono di una stupidità senza pari, poiché sono stati concepiti sulla falsariga dei vecchi programmi scolastici.

All'Institute for the Learning Sciences abbiamo realizzato un nuovo programma informatico per insegnare la biologia in quinta elementare, nel quale ognuno deve disegnare il suo animale. Il National Science Foundation ci ha fatto sapere che il programma è incompatibile con il curriculum scolastico, perché in quinta non c'è

biologia. Inoltre, visto che ogni ragazzino ha un dialogo personalizzato con il computer, hanno detto che non sarebbe possibile verificare le conoscenze acquisite con un unico questionario!

Queste scempiaggini dipendono dall'inveterata abitudine di considerare la conoscenza come un insieme di fatti. Ciò che importa, invece, non sono i fatti, ma il modo in cui si acquisisce la loro conoscenza e le altre abilità che si apprendono in questo processo. La conoscenza è un fenomeno altamente integrato: ogni frammento di sapere è correlato a un altro, e la scuola deve essere ripensata a partire da questa constatazione.

Non molto tempo fa, per preparare una conferenza, ho letto Darwin. È stata un'esperienza intellettuale molto intensa, giacché molte sue affermazioni hanno illuminato alcuni punti critici del mio pensiero. Sono sicuro che se l'avessi letto vent'anni fa, non lo avrei compreso. Ciò rafforza la mia convinzione secondo cui bisogna leggere solo quando si è preparati a farlo. Purtroppo, però, c'è sempre qualche intellettuale pronto a trasecolare: «Ma come! Non hai ancora letto tal dei tali?». La saccenteria e lo snobismo accademico sono diseducativi quasi quanto la scuola.

Un concentrato vivente di tutti i difetti del mondo accademico è il linguista del Massachusetts Institute of Technology Noam Chomsky. Il suo atteggiamento mi irrita a tal punto che fino a qualche anno fa non potevo andare sull'argomento senza perdere le staffe. Detesto la sua intolleranza intellettuale e i suoi sporchi trucchetti da mandarino. Chomsky è l'eroe della linguistica contemporanea. Secondo lui, l'essenza del linguaggio è la sintassi. A dire il vero lui parla furbescamente di "struttura profonda", senza peraltro significare con questa espressione ciò che qualsiasi persona razionante si aspetterebbe. Per Chomsky non bisogna guardare alla struttura superficiale, grammaticale del linguaggio, ossia ai sostantivi, ai verbi e via dicendo. Chiunque penserebbe, a questo punto, che l'oggetto della linguistica sia il significato, le idee soggiacenti alle frasi. Assolutamente no: Chomsky non vuole che ci si interessi al significato. E il bello è che c'è un sacco di gente che si beve tutto quello che dice.

Alla fine degli anni Sessanta avrei potuto litigare mille volte con lui su questioni del tipo: Che cosa significa la frase "A John piacciono i libri"? Per me vuole dire che a John piace leggere. Chomsky avrebbe sicuramente ribattuto: "Ma no! John intrattiene una relazione di piacere con i libri, ma potrebbe non essere interessato alla lettura".

Secondo il mio punto di vista, la linguistica deve avere a che fare con la comprensione del significato. Gli atti del linguaggio presuppongono un rapporto con la verità degli enunciati, una verità che può essere assoluta, parziale o probabile. Chiamo questo inferenza. Ma sento già Chomsky che strepita: "Non ci siamo proprio. L'inferenza non ha nulla a che spartire con il linguaggio. Essa riguarda piuttosto la memoria, che è una dimensione totalmente extralinguistica".

La sua posizione è assurda, perché non considera la rilevanza della psicolinguistica. In realtà il significato, le inferenze, la memoria sono parti integranti del linguaggio. Nel suo libro più importante, *Le strutture della sintassi*, Chomsky sostiene che lo studio del linguaggio deve essere di tipo matematico. Posso capire che uno sia interessato a studiare la comunicazione verbale solo dal punto di vista formale, ma non se costui è tra i fondatori e fa parte del comitato di redazione di una rivista che si chiama "Cognitive Psychology". Tanto meno se una schiera di psicologi compie esperimenti e scrive articoli basati sulle sue teorie. Mi sembra che l'esimio linguista tiri avanti dando un colpo al cerchio e uno alla botte.

Chomsky è disposto a studiare la mente solo se si comporta secondo principi ben formulati. Questo proprio non lo capisco: a me interessa studiare la mente qualunque cosa essa sia: fosse anche fango, mi andrebbe bene lo stesso. Molti scienziati vorrebbero che la mente fosse in tutto e per tutto un dispositivo razionale. Se non lo è, se le sue strutture non sono chiare e matematiche, non ne vogliono nemmeno sentir

parlare. Chomsky ha sempre adottato la filosofia della scienza dei fisici, secondo cui bisogna procedere per ipotesi e verifiche. L'epistemologia dell'Intelligenza Artificiale, invece, è più vicina alle scienze biologiche. I biologi partono dal presupposto che gli organismi sono così come appaiono e vanno studiati per quello che sono. Se un modello non va d'accordo con la realtà, va aggiustato e corretto. L'intelligenza artificiale condivide con la biologia uno sguardo empirico sul mondo e l'amore per l'esplorazione e la scoperta. Ecco perché non potremo mai andare d'accordo con i linguisti, schiavi della fisica.

murray gell-mann Condivido l'idea di Roger Schank di utilizzare i computer per scopi educativi. D'altronde che cos'è l'educazione? Nient'altro che aiutare qualcuno a imparare, cioè a incorrere in errori e correggersi, a giocherellare nei vari campi del sapere, a entrare in contatto con la realtà e con la verità, e così via. Tutto questo può essere fatto con un computer, evitando di esporsi al ridicolo dell'interrogazione in una classe vocante. Inoltre una macchina può registrare il percorso dei pensieri dello studente, mostrando i passi falsi e aiutandolo a correggerli. In tal modo, gli insegnanti possono venir sollevati da incarichi ripetitivi e dedicarsi più efficacemente alle parti dell'insegnamento in cui è indispensabile la loro presenza.

A cinquecento anni dall'invenzione della stampa, nelle università si tengono ancora corsi su argomenti come l'elettromagnetismo, quando basterebbe leggersi uno dei tanti libri a disposizione per sapere tutto il necessario. Ovviamente non sono contrario alle lezioni, ma ritengo che i docenti dovrebbero svolgere una funzione di stimolo verso gli studenti, assistendoli attivamente nel loro processo di apprendimento, rispondendo ai dubbi e provocandoli con argomenti nuovi e vivi.

Marvin mtnsky Roger Schank è stato il pioniere di molte idee importanti sulla rappresentazione della conoscenza nella mente umana. Nei primi anni Settanta ha sviluppato la teoria semantica della "dipendenza concettuale", che ha giocato un ruolo fondamentale nel mio libro *La società della mente*. Ha poi elaborato altri interessanti paradigmi sul modo in cui la conoscenza viene rappresentata in vari tipi di reti concettuali, "script" e storie. Ciascuna di queste idee stimola, a sua volta, una nuova teoria della memoria. In questo senso, credo che Schank abbia dato un impulso formidabile agli studi sull'intelligenza artificiale. Ha fatto esercitare generazioni intere di studenti su teorie di volta in volta diverse, spingendoli a costruire applicazioni informatiche per ciascuna di esse. Sicché noi abbiamo avuto il privilegio di verificare che cosa si poteva fare con quei modelli, la maggior parte dei quali consisteva in rappresentazioni diverse del significato delle espressioni verbali.

Paradossalmente Schank si è duramente scontrato ed è stato quasi perseguitato dal linguista Noam Chomsky, anch'egli un fertile produttore di idee nuove. Chomsky ha tentato in tutti i modi di ridicolizzarlo e non si è mai degnato di prendere in seria considerazione le teorie dell'avversario. Tutto questo è, come dicevo, paradossale, perché i lavori di Schank e Chomsky sono in realtà complementari. Chomsky si occupa in modo pressoché esclusivo della sintassi formale degli enunciati. Il suo sistema non contempla il modo in cui le parole vengono effettivamente utilizzate dai soggetti per rappresentare e comunicare le idee. Egli non ammetterebbe mai un modello per il quale la sintassi è un semplice accessorio del linguaggio. Eppure, nessuno ha difficoltà ad associare un significato alla serie verbale "ladro, disattento, prigioniero", dove la sintassi è assente. Schank e i suoi studenti hanno mostrato molti modi in cui possono essere trattati questi significati intricati, ma è raro che i suoi colleghi siano disposti a considerare queste teorie. Talvolta sembra che l'unico modo per catturare la loro attenzione sia di scioccarli, e in questo Roger è un maestro. Per illustrare la nozione di "dipendenza concettuale", mi ricordo che ha fatto il seguente esempio: "Jack minacciò

di strozzare Mary se non gli avesse dato il suo libro". Tradotto in termini tecnici, ciò sta a significare che Jack trasferisce nella mente di Mary la concettualizzazione che se non trasferisce il possesso del libro a lui, le spezzerà la trachea procurandole così la morte per mancanza d'aria nei polmoni. Una volta ho chiesto a Schank perché i suoi esempi sono così sanguinari. Mi ha risposto: "Se no li avresti già dimenticati".

steven pinker Roger Schank è più un ingegnere che uno scienziato. Non si preoccupa di possedere una teoria sulle capacità di apprendimento e di comunicazione linguistica del cervello umano. Il suo scopo è piuttosto di costruire programmi informatici in grado di comprendere, il che è tutto un altro paio di maniche. Durante gli anni Settanta si è svolto un dibattito velenoso fra lui e i discepoli di Chomsky, che non ha portato a niente. È stato un esemplare dialogo fra sordi.

A quei tempi Chomsky stava applicandosi a un settore molto circoscritto della linguistica; precisamente, al modo in cui il bambino acquisisce la grammatica della lingua madre. La sua risposta mi sembra convincente: il cervello ha alcune parti dedicate all'apprendimento della grammatica, e alcune di queste strutture sono innate. Sebbene Chomsky la ritenga una delle questioni centrali della linguistica, ha sempre ammesso che essa costituisce solo una piccola parte della materia. Roger ha uno scopo molto più ambizioso, almeno in termini ingegneristici: costruire un software in grado di comprendere la narrazione di storie. E visto che la teoria di Chomsky non gli serve per realizzare il suo progetto, ha concluso che essa è sbagliata.

A me pare che i due ricercatori si muovano su due livelli completamente diversi. Chomsky ha ragione nel sostenere che un bambino può apprendere la grammatica della sua lingua solo se esiste una sorta di grammatica universale innata. Roger ha ragione a dire che l'uso effettivo del linguaggio - nella conversazione, per esempio - presuppone una serie di altre conoscenze psicologiche e sociali che vanno ben oltre la grammatica.

w. daniel hillis Il Roger Schank che ho conosciuto è un tipo molto spigoloso e aggressivo. Non si accontenta di dire: "Ecco qui la mia teoria". Dice: "Ora vi dimostro perché ho ragione io e tutti gli altri sono dei poveri idioti". E in effetti ha spesso ragione lui. Una caratteristica che ha in comune con Minsky è la quantità incredibile di discepoli che ha saputo formare nel corso degli anni. E chiunque abbia la capacità di creare una scuola simile, un po' rompicoglioni (in senso buono) deve pur esserlo.

daniel c. dennett Mi è sempre piaciuto il piglio da guerrigliero delle scienze cognitive di Roger Schank, sempre intento a stroncare gli altri, a porsi le questioni fondamentali, a lasciarsi dietro le spalle le sue vecchie teorie in quanto completamente superate da tutta una serie di nuovi fatti del massimo interesse. Roger pensa che la mente sia una collezione di gadget, tenuti insieme da una sorta di interessantissimo scotch da imballaggi. Ovviamente, partendo da questi presupposti non si può avere un programma di ricerca organico, e infatti lui non c'è l'ha e non gli interessa averlo. È un provocatore intellettuale, un guastatore, un trascinatore, un impietoso censore delle sue stesse idee.

Il suo concetto più conosciuto è quello di "script": stereotipi o frammenti narrativi a partire dai quali costruiamo buona parte della nostra vita cognitiva. Probabilmente Schank ora è disposto ad ammettere che tutti gli sforzi fatti per sostenere questa idea alla fine ne hanno dimostrato l'inconsistenza. In origine c'era qualcosa di buono nel concetto di "script", ma più se ne parlava e lo si metteva alla prova e più ci si accorgeva che era inadeguato per svolgere il compito che gli era stato affidato. Roger è stato forse il critico più feroce di se stesso. Ed è stato un gran bene!

Poiché in tutto ciò abbiamo imparato qualcosa che non era affatto scontato E chi dice che le cose erano chiare fin dall'inizio in realtà non ha pensato seriamente alla questione. Non era affatto chiaro ciò che gli "script" potevano fare fino a quando Roger non ci ha costretto ad andare a fondo nella faccenda.

10. Daniel C. Dennett

Le pompe dell'intuizione

daniel c. dennett è un filosofo; direttore dei Center for Cognitive Studies e Distinguished Professor di Arts and Sciences alla Tufts University. Ha scritto *Contenuto e coscienza* (1969, tr. it. 1992), *Brainstorms* (1978, tr. it. 1991), *Elbow Room: The Varieties of Free Will Worth Wanting* (1984), *The Intentional Stance* (1987), *Coscienza. Che cosa è* (1991, tr. it. 1993). Ha scritto insieme a Douglas R. Hofstadter *L'Io della mente* (1981, tr. it. 1985).

Quella della filosofia è una storia che fa acqua da tutte le parti, ma è anche costellata di metafore che non dimenticheremo mai. Io le chiamo, rubando un termine all'idraulica, "pompe di intuizione", ossia bellissimi esperimenti del pensiero: come il mito della caverna di Platone, il genio maligno di Cartesio, la visione dello stato di natura di Hobbes e perfino l'imperativo categorico di Kant. Non conosco nessun filosofo in grado di sostenere la coerenza logica di queste idee. Eppure esse sono meravigliose calamite dell'immaginazione, capaci di riorganizzare il pensiero e fecondarlo con nuovi spunti speculativi. Molti filosofi sottovalutano la potenza di queste metafore filosofiche.

Mi piace l'idea di tornare alla vecchia e cara filosofia di un tempo, quando buona parte della comunità filosofica degli ultimi decenni ha trasformato questa disciplina in una tecnica arida che scimmietta il rigore logico della matematica. Certo la logica è importante, ed è giusto che occupi un posto negli studi filosofici, ma senza invadere il campo altrui.

La prima volta che ho utilizzato l'espressione "pompe di intuizione", ne ho dato una versione riduttiva applicandola all'esperimento ideale della "stanza cinese" di John Searle, con il quale il filosofo voleva confutare le pretese dell'intelligenza artificiale. In quell'occasione sostenevo che l'esempio addotto da Searle, per quanto suggestivo, non confutava un bel niente: si trattava appunto dell'uso improprio di una "pompa dell'intuizione", di una di quelle narrazioni accattivanti che ti fanno esclamare: "Ahi Ho capito cosa vuoi dire!".

L'immagine della coscienza come macchina virtuale è una efficace "pompa intuitiva". Ci vuole un po' per comprenderla correttamente, perché buona parte del gergo dell'intelligenza artificiale e dell'informatica non è familiare ai filosofi. Tuttavia, la metafora può essere presentata in termini accessibili dicendo: "Ehi! Prova a pensare di avere un software al posto del cervello. Una macchina virtuale è paragonabile a uno di quei processori che vendono nei negozi d'informatica".

Improvvisamente, comincia a suonare un campanello nella testa delle persone e una nuova prospettiva si spalanca davanti ai loro occhi.

Una delle idee più brillanti dell'intelligenza artificiale è il Pandemonio di Oliver Selfridge. Nella preistoria della cibernetica, egli inventò un programma che consisteva in un'allegria brigata di demoni: un Pan-demonio, appunto. Nel suo sistema c'erano parecchi diavoletti semindipendenti che quando sorgeva un problema saltavano tutti su e giù dicendo: "Io! Io! Io! Lascialo fare a me! Posso risolverlo io!". A quel punto seguiva una piccola battaglia e il vincitore si metteva a esaminare il problema. Se non ce l'avesse fatta, sarebbero subentrati altri demoni per assumere il comando del calcolatore.

In un certo senso quello fu il primo programma connessionista. Fin da allora, l'intelligenza artificiale cominciò ad essere percorsa da ondate ricorrenti di entusiasmo per questo genere di programmi di tipo evolutivo. In essi succedono contemporaneamente un sacco di cose in conflitto fra loro. Da un punto di vista calvinista, tutto ciò pare un modo di procedere assurdo, un vero e proprio spreco di energie. Ognuno di quei diavoletti lavora al suo piccolo progetto, iniziando a costruire procedure che a metà strada butta via. Si può immaginare qualcosa di più insensato? Eppure il metodo funziona, poiché il conflitto fra progetti antagonisti opera automaticamente una selezione del più adatto.

La colossale architettura logica messa a punto dal ricercatore di intelligenza artificiale Douglas Hofstadter è un modello che può vantare questo tipo di caratteristiche. Anche il fisico Stephen Wolfram ha inventato modelli simili, sebbene non rientrino nel novero dell'intelligenza artificiale. Queste architetture sono molto diverse dai vecchi sistemi cibernetici, con tutta la loro burocrazia di capi, capetti e scagnozzi, ognuno dei quali fornito di compiti e responsabilità ben definite e assolutamente antispreco. Una volta Hofstadter disse che il vero guaio di questi modelli è che non lasciano spazio all'intraprendenza e alla fantasia. Non c'è eccesso di manodopera e tantomeno monelli che scorrazzano in giro schiamazzando e dando grattacapi di ogni genere. Quando madre natura progetta un sistema, fa in modo che sia il più ridondante possibile. Come quando si organizza una festa e si dice agli amici: "Portate più gente possibile e del vino, che questa volta ci divertiamo davvero". Il compito che mi prefiggo è di vedere anche il cervello come una pletora di agenti semindipendenti che agiscono in modo diseconomico e solo parzialmente organizzato; solo così, infatti, ci si può fare un'idea realistica e coerente dei fenomeni della coscienza.

Noi cambiamo insieme alla tecnologia, tanto è vero che la nostra filosofia della mente sta importando numerosi concetti dall'informatica. Nella storia del pensiero ogni nuovo progresso tecnologico è stato adottato quale metafora dell'attività cerebrale: Cartesio e i suoi contemporanei hanno saccheggiano l'universo tecnico dell'orologeria, delle carrucole e delle pulegge; successivamente si è passati alle macchine a vapore, le dinamo e l'elettricità e più recentemente al telefono.

Potremmo andare anche più indietro. La più potente di tutte le metafore tecnologiche che sia mai stata utilizzata per spiegare cosa succede nel cervello è proprio la scrittura: l'idea che gli eventi mentali siano segnali, messaggi che transitano. Non c'è bisogno di pensare al telegrafo o al telefono, basta pensare ai messaggi scritti.

L'idea che la memoria sia un deposito di cose scritte è anch'essa una metafora, e direi una pessima metafora. Esiziale è poi la teoria secondo la quale il pensiero non possa essere concepito che in termini di linguaggio scritto. Uno dei temi più affascinanti consiste nel chiedersi cosa succede quando si comincia a parlare prima di esserne consapevoli, prima che si sappia che cosa significhi parlare. Succede a tutti e in particolare modo ai bambini. C'è una grande differenza fra l'atto linguistico e la

consapevolezza di tale atto; una differenza che, una volta chiarita, può dare molte indicazioni alla teoria del linguaggio.

La gente non avrebbe potuto pensare alla mente come a un deposito prima di possedere un linguaggio scritto. Ai primordi della scrittura non esisteva un problema mente/corpo; anche ai tempi di Platone e Aristotele le teorie sulla natura della mente erano praticamente assenti, e le poche in circolazione erano piuttosto scadenti.

Il concetto di calcolo, così come è stato formulato dai matematici John von Neumann e Alan Turing, rappresenta un grande progresso per le scienze cognitive, giacché elimina la necessità di un intermediario nei processi di pensiero. Ai tempi in cui la coscienza veniva interpretata come una sorta di centralina telefonica, il punto debole era la presenza dei fili che connettono il mondo esterno con il pannello di controllo, vale a dire il cervello. In questo caso dobbiamo comunque prevedere l'esistenza di un homunculus intelligente - un centralinista - che se ne sta seduto al pannello di controllo a "smistare le telefonate".

Prima ancora, un altro tentativo di spiegare l'attività della mente risale al filosofo David Hume. Per lui, le impressioni erano come diapositive in un proiettore, mentre le idee erano le deboli copie - fotocopie di bassa qualità - delle immagini originali. Il filosofo scozzese cercò di escogitare una teoria chimica, una teoria fasulla delle valenze che avrebbe dovuto spiegare i meccanismi di concatenazione delle idee. Secondo un mio studente, Hume stava cercando di far sì che le idee pensassero per conto loro. È vero, questo è esattamente ciò che Hume stava tentando di fare. Cercava disperatamente di sbarazzarsi del soggetto pensante, perché si rendeva conto che quella era una strada senza uscita. Se in una teoria della mente sbuca fuori un intermediario, si ritorna al punto di partenza. Per questo motivo Hume cercò di connettere le idee per mezzo di una sorta di legame chimico, in modo che ognuna potesse pensare se stessa e trascinare quella successiva a pensare se stessa e così via, sbarazzandosi una volta per tutte dell'intermediario. Ma il trucchetto non funzionò.

Gli unici che sono riusciti a togliere di mezzo il maledetto homunculus sono stati i teorici dei calcolatori, poiché hanno frazionato l'intermediario in tanti sottointermediari, ciascuno dei quali è sostituibile da una macchina. Così facendo abbiamo aperto uno smisurato spazio di progettazione informatica: non solo per gli antiquati computer seriali "neumanniani", ma anche per i nuovi computer ad architettura fortemente parallela, su cui girano i programmi di vita artificiale.

Proprio in questo periodo sto lavorando sul modo di eliminare dalle teorie cognitive l'Autore Centrale, che è uno degli omuncoli più insidiosi perché è colui che determina i significati delle frasi. Supponiamo di fare la seguente affermazione: "Per favore ripeti la frase seguente con voce forte e chiara: 'La vita non ha senso, e sto pensando di uccidermi' ". Potremmo dirlo, ma non credo che lo penseremmo realmente. Qualcuno sarebbe tentato di dire che, benché la nostra bocca abbia emesso quei suoni, di certo il nostro Autore Centrale non ne sottoscriverebbe la sostanza. In altri termini, ben difficilmente direbbe: "Questo è un atto linguistico reale. Intendo dire proprio questo!".

Dando una scorsa agli studi di psicolinguistica, mi sono accorto che hanno ben poco da dire sulla produzione del discorso. Gran parte di queste teorie vertono su come le persone capiscono il linguaggio, come lo comprendono, come lo accolgono; ma non c'è molto su come le persone generano gli atti linguistici. Se consideriamo il modello dello psicolinguista olandese Willem Levelt - il migliore oggi in circolazione - troviamo che il Parlante viene raffigurato come una sorta di progetto d'ingegneria. Su di esso, in un angolino in alto a sinistra, c'è qualcosa che potremmo definire il Concettualizzatore, che fa un po' le veci del geometra. Il Concettualizzatore elabora ciò che il sistema deve dire e delega il lavoro agli operai del cantiere, i quali mettono insieme le parole e producono le relazioni grammaticali. Levelt ha scritto un libro intero mostrando come

ogni atto linguistico prende origine dal Concettualizzatore che fornisce al resto del sistema il messaggio preverbale. Il Concettualizzatore dice: "ok, quello che dobbiamo fare è insultare quel tipo. Di' a quello zoticone che ha la faccia da idiota". Così assegna il lavoro alla squadra di operai, i quali tirano su un bel ponteggio di parole, avvitate fra loro dalle regolette della grammatica. Ed ecco cosa ne sortisce: "Ehi, tu. Hai una faccia da idiota".

A questo punto si pone il seguente problema: come fa il Concettualizzatore a immaginare cosa dire per far parlare il sistema linguistico? Nell'affrontare la questione, i linguisti si sono ingarbugliati con le loro mani. Hanno lasciato al suo posto l'Autore Centrale, e tutto quello che sono riusciti a escogitare è una misteriosa entità che traduce il messaggio dal mentalese all'italiano.

Mi sembra che come teoria non sia una gran cosa. Ancora una volta, il modo per evitare questa palude è di scomporre l'Autore in tanti piccoli frammenti di linguaggio, che dicono: "Fallo fare a me, fallo fare a me!". Molti di loro soccombono perché vorrebbero dire cose tipo: "Tu, pezzo di cialtrone!" oppure: "Hai letto almeno un libro negli ultimi tre anni?", o: "Stupidino che non sei altro". È come se nella mente si svolgesse una battaglia fra processori paralleli, fino a che uno di essi ha la meglio. In questo caso chi dice: "Hai la faccia da idiota" vince, e in quanto tale viene articolato dal Parlante.

Ma ecco affacciarsi il dubbio: la persona intendeva dire veramente questo? Beh, chiedeteglielo. La persona che ha pronunciato questa frase vi risponderà, un poco stupito dalla domanda: "Certo che volevo dirlo! L'ho detto e non ho intenzione di ritrattarlo. Non sto arrossendo dalla vergogna; perché avrei dovuto esprimermi diversamente?". Egli non ha altro modo di verificare ciò che voleva dire se non le parole che ha usato. Una volta lo scrittore inglese Edward Morgan Forster disse: "Come faccio a sapere quello che penso finché non sento quello che dico?". Questa asserzione presuppone ancora l'esistenza di un'Autore Centrale, poiché ascoltiamo noi stessi e sottoscriviamo ciò che stiamo per dire. In questo preciso momento sta uscendo dalla mia bocca ogni tipo di parole e io sono discretamente felice di come sta andando. Di tanto in tanto mi correggo un poco, e se mi domandate se intendo davvero dire ciò che dico, non posso che rispondere di sì. Non certo perché c'è una sottoparte di me, un piccolo sottosistema, che da l'ordine di partenza a un susseguirsi di movimenti labiali. Quella dell'Autore Centrale è un'illusione nefasta per intendere l'attività linguistica.

Il modello Pandemonio spiega molto meglio la faccenda: in questo esatto momento tutti i miei piccoli demoni stanno cospirando, hanno formato una coalizione e stanno strillando: "Sì, sì, sostanzialmente il ragazzo sta dicendo la verità!".

Fin dalla pubblicazione di *Coscienza. Che cosa è*, mi sono occupato del pensiero darwiniano. Se si potesse dare l'oscar alla migliore idea mai avuta, lo darei a Darwin, più che a Newton o a Einstein. La sua è più che una meravigliosa idea scientifica. È un'idea pericolosa. Rovescia, o almeno sconvolge, alcune delle convinzioni più profonde e radicate della psiche umana. Ogni volta che si parla in pubblico di darwinismo, la temperatura sale e la gente cerca di distogliere l'attenzione dalla questione reale, bisticciando diligentemente su controversie marginali. Chiunque si sente in dovere di prendere posizione ogni qual volta sente avvicinarsi l'uragano dell'evoluzione.

L'idea di Darwin è pericolosa perché sfilta il tappeto da sotto il migliore ragionamento filosofico mai concepito per dimostrare l'esistenza di Dio: l'argomento del progetto. Come altro potrebbe spiegarsi il formidabile progetto che sta alla base dell'ordine naturale, se non con la creazione di un Dio infinitamente sapiente e potente? Come la maggior parte delle argomentazioni che si fondano su una domanda retorica, anche questa non risulta del tutto convincente. Tuttavia, essa ha persuaso miliardi di persone, almeno fino a quando Darwin non ha proposto una risposta alternativa: la selezione naturale. Da allora la religione non è più stata la stessa.

Almeno agli occhi degli accademici, la scienza ha avuto la meglio sulla religione. L'idea di Darwin ha relegato il libro della Genesi nel limbo della mitologia pittoresca, anche se i credenti più accorti sono riusciti ad adattarsi al nuovo contesto culturale inventandosi un Dio meno antropomorfo e più astratto: una sorgente ineffabile di significati e divinità. I credenti più ingenui hanno tentato disperatamente di mantenere le loro posizioni rabberciando una scienza creazionista che è una patetica imitazione della scienza vera, una comica parata di autoinganni e pie insensatezze. Stephen Jay Gould e molti altri scienziati hanno giustamente mostrato e condannato gli errori del creazionismo. L'idea di Darwin è trionfante, e se lo merita.

Eppure, in casa darwinista non si fa che litigare sulla corretta interpretazione del suo pensiero. Quando Stephen Jay Gould esorta i vecchi evoluzionisti ad abbandonare l'adattazionismo e il gradualismo a favore dell'ex-attamento e degli equilibri punteggiati, la questione non è chiaramente solo scientifica ma politica, morale e filosofica. Gould sta lavorando vigorosamente, e perfino disperatamente, per proteggere una certa visione dell'idea di Darwin. Ma perché?

I sociobiologi pretendono di avere dedotto proprio dalla teoria di Darwin alcune generalizzazioni importanti sulla cultura umana, in particolare intorno all'origine e lo statuto dei nostri principi etici più radicati. Quando Gould e gli altri attaccano lo "spettro della sociobiologia", il loro intento è prevalentemente politico: è il tipico caso in cui scienziati di sinistra attaccano i cosiddetti pseudoscienziati di destra. I creazionisti sono ovviamente pseudoscienziati, ma i sociobiologi sarebbero per Gould ben più pericolosi, giacché le loro teorie sembrano decisamente più credibili. Forse Gould ha una parte di ragione. Tuttavia non capisco perché abbia bisogno di credere così appassionatamente nella infondatezza della sociobiologia.

Alcune persone detestano l'evoluzionismo, ma spesso sembra che anche i suoi seguaci vogliano sottrarsi al suo dominio. Mi è capitato di sentir dire: "La teoria di Darwin è valida per ogni cosa vivente dell'universo; eccetto noi, naturalmente". Darwin stesso si accorse che finché non avesse affrontato di petto la questione della discendenza dell'uomo, e in particolare della mente umana, la sua spiegazione dell'origine delle specie sarebbe stata in pericolo. Fin dagli esordi, gli allievi di Darwin si sono scontrati fra loro più o meno sugli stessi temi sui quali ci si accapiglia oggi, e se la teoria ha progredito nonostante questo lo si deve alla sua straordinaria profondità.

Marvin Minsky Dan Dennett è il nostro miglior filosofo; sarei tentato di affermare che è il nuovo Bertrand Russell. Diversamente dai filosofi tradizionali, Dan è uno studioso di neuroscienze, linguistica, intelligenza artificiale, informatica e psicologia. Sta ridefinendo e riformando il ruolo del filosofo. Naturalmente, Dan non capisce la mia teoria della società della mente, ma nessuno è perfetto.

Roger Penrose Conoscendolo come una persona aperta alle critiche, vorrei fare a Dennett qualche osservazione. Il titolo del suo libro *Coscienza. Che cosa è* mi pare pretenzioso, perché, con tutta la buona volontà, non mi pare che la sua teoria spieghi come funziona la coscienza. Lui sta semplicemente esplorando quello che io chiamo "punto di vista A", nella lista dei quattro punti di vista che ho discusso in *Shadows of the Mind*. A è il punto di vista più decisamente schierato dalla parte dell'intelligenza artificiale: è l'idea che l'intelligenza possa essere compresa in termini di calcolo. Non importa chi o che cosa sta eseguendo il calcolo: un computer o una struttura biologica vanno ugualmente bene.

Il punto di vista B - che è il più vicino al punto di vista del filosofo John Searle, come l'ho capito io - è che per quanto il calcolatore possa simulare il comportamento

del cervello, esso non potrà mai avere attributi mentali del tutto simili a quelli del pensiero cosciente. Ciò differisce dal mio punto di vista - il punto C - per il quale il calcolatore non può nemmeno simulare l'attività cosciente. Il punto di vista D sostiene che la sfera mentale non è comprensibile in termini scientifici, posizione estrema che non condivido.

Dennett è l'esponente più importante del punto di vista A, nel quale annovero anche Hans Moravec. Nel suo ultimo libro egli sostiene addirittura che entro trentaquarant'anni il computer surclasserà il cervello umano.

Ci sono almeno due generi di argomenti che possono essere utilizzati contro A. Uno è quello di John Searle: solo perché una macchina esegue calcoli non significa che possa essere consapevole. Il mio argomento è diverso, in quanto mette in discussione sia A sia B, asserendo che non si può nemmeno simulare correttamente l'attività cosciente. Infatti, se qualcosa si comporta come se fosse cosciente, si può dire per questo che lo è? È un tipo di domanda su cui si potrebbe andare avanti a discutere per anni. Qualcuno direbbe: "Bene, nel considerare la coscienza dobbiamo adottare una prospettiva pragmatica. Come facciamo a giudicare se una persona è consapevole o no? Solamente attraverso i suoi atti. Perché allora non applicare lo stesso criterio a un computer o a un robot comandato da un computer?". Altri replicherebbero: "No, non puoi dire che un robot è sensibile solamente perché si comporta come se fosse dotato di sensibilità". La mia posizione si differenzia da entrambe: il robot non può nemmeno comportarsi come se fosse cosciente, almeno fino a quando verrà controllato da procedure strettamente computazionali.

roger schank Daniel Dennett è il filosofo ideale per i teorici dell'intelligenza artificiale. Abbiamo dovuto sopportare per tutti questi anni filosofi come Hubert Dreyfus, che sentivano il bisogno di attaccare l'intelligenza artificiale senza conoscerla. Dan ha fatto almeno lo sforzo di capire la nostra disciplina e la scienza cognitiva, ed è il filosofo più aggiornato che io conosca. Mi fa sempre piacere ascoltarlo: è spiritoso e non dice fesserie.

Il compito dei filosofi è di vedere in prospettiva ciò che hanno pensato altre persone. Dan pensa anche di testa sua, ma quello che almanaccano i filosofi, per quanto interessante, non serve un granché a noi che costruiamo programmi.

nicholas humphrey Dan ha imparato a pensare a Oxford con Gilbert Ryle e non ha più abbandonato lo stile di pensiero dell'empirismo logico e del comportamentismo. Queste scuole di pensiero hanno trovato un criterio per decidere di cosa ci si può occupare e di cosa no: gli enunciati hanno un senso solo se puoi verificarli attraverso l'osservazione. Se invece non puoi verificarli è meglio che li dimentichi. Dan è rimasto intrappolato nella sobria eleganza di questo approccio. E se questo significa negare la realtà delle cose che noi sappiamo essere importanti - come le sensazioni elementari e tutti gli aspetti qualitativi della coscienza, i cosiddetti "qualia" - poco male. Il filosofo deve essere tetragono e rispondere solo al tribunale della ragione, spingendosi fino a dove glielo consentono i suoi ragionamenti. E siccome nessuno ha ancora provato che Dan sbaglia, lui è ancora lassù, nell'empireo neopositivista. Naturalmente, una parte di Dan è turbata dalle sue teorie.

È troppo sensibile per non esserlo e confusamente si accorge che buona parte della realtà non viene trattenuta dalle maglie dei suoi ragionamenti. Tuttavia, quando i suoi critici mettono in evidenza le sue presunte debolezze teoriche, lui non lo sopporta ed esige che spieghino bene che cosa intendono. Il più delle volte sono ridotti al silenzio, perché è realmente molto difficile sconfiggere Dan con le sue stesse armi. Egli non concede tregua a chi lo sfida sul terreno accidentato della metafisica. Il libro di Dan

Coscienza- Che cosa è è molto originale e sta già avendo una influenza enorme sulla psicologia cognitiva. Il suo modo di descrivere i processi che sottendono il pensiero è davvero brillante e financo divertente, ma quando passa a trattare della sensibilità è deludente.

Per spiegare che cos'è la coscienza bisognerebbe prima di tutto sapere che cosa la gente intende con questo termine. Ecco le domande più comuni sulla coscienza: "I bambini sono coscienti?", "Sarò cosciente durante l'operazione?", "Come fai a paragonare la mia coscienza alla tua?". È chiaro che per il senso comune la questione centrale non è il pensare ma il sentire. A interessare le persone non è tanto il flusso dei loro pensieri, quanto la sensazione che hanno di essere vivi. Vivi, ossia essere fatti di carne e ossa, sentire il mondo esterno con la pelle, ma anche gustare i sapori con la bocca, vedere i colori con gli occhi e sentire male ai piedi dopo una lunga camminata.

L'aspetto più importante è la qualità soggettiva di tali esperienze: la peculiarità del dolore provocato da una puntura, il salato di un'acciuga, il rosso di una mela, il chiedersi "a che cosa assomiglia" quando gli stimoli provenienti da questi oggetti esterni incontrano i nostri corpi. Una persona può essere cosciente senza pensare a nulla, ma deve per forza sentire qualcosa.

In *Coscienza. Che cosa è* si fa appena qualche cenno alla fenomenologia sensoriale. Dopo una mia recensione negativa Dan mi ha accusato senza mezzi termini di avere ignorato gli svariati passaggi del libro dove si parla di sensazioni. È vero, se li cerchi ci sono. In alcuni punti parla delle sensazioni e dei sentimenti come complesse disposizioni comportamentali. Ma sono note marginali, che tradiscono il suo mentalismo esasperato.

francisco varela Mentre Daniel Dennett concentra l'attenzione sul lato cognitivo, il mio interesse si rivolge a tutti i piani della conoscenza, forse perché per me la conoscenza si sviluppa insieme al soggetto e non è riconducibile a una rappresentazione oggettiva del mondo esterno.

Dan non vuole sottoporre l'esperienza soggettiva al vaglio della scienza e non capisco da dove abbia origine questa sua resistenza, questo suo terrore. Ne ho discusso spesso con lui, visto che al contrario di Minsky accetta la discussione, ma non siamo arrivati a capo di nulla.

Per Dennett la mente umana va analizzata solo nei suoi comportamenti manifesti e consapevoli, così come fa l'antropologo quando studia una cultura straniera. Bisogna prendere per buono quello che ti dicono. Se tu mi dici che soffri, io ci credo e me lo appunto diligentemente sul mio quaderno. Questa è la cosiddetta eterofenomenologia o, detta più classicamente, atteggiamento intenzionale. Dennett considera le persone come soggetti dotati di intenzionalità.

Trovo che tutto ciò sia davvero troppo debole per reggere un'intera teoria della coscienza, giacché rappresenta solo un lato della medaglia. L'altro lato è la fenomenologia reale: il "com'è" di prima mano, il resoconto diretto della qualità dell'esperienza irriducibile del soggetto.

Bisogna però riconoscere che Dennett ha portato chiarezza nel campo delle scienze cognitive, eliminando quelli che lui chiama i fantasmi del teatro cartesiano. Egli sostiene che i fenomeni delle proprietà emergenti del cervello vanno considerati separatamente in vista di una descrizione accurata della coscienza. In questo senso, il suo è un contributo importante.

Bisogna anche dargli atto di avere introdotto nella filosofia della mente uno stile di discussione molto eclettico: i suoi argomenti sono da filosofo, ma è pronto ad accogliere anche i risultati provenienti dalle altre discipline. Questo non si può dire di

persone come John Searle che continuano a parlare della filosofia della mente in modo molto arido, astratto, scolastico. Mi piace il modo di Dennett di tirarsi su le maniche e scendere in laboratorio, a lavorare con gli altri.

w. daniel hillis Daniel Dennett è il mio filosofo preferito perché, al contrario dei suoi colleghi, si dà la briga di capire ciò di cui parla. Le sue idee filosofiche sono molto ben documentate; a volte sono sbagliate, ma almeno sbaglia con cognizione di causa.

Qualche volta Dennett sembra andare a rimorchio del riduzionismo, forse perché ha l'aria di riuscire sempre a spiegare i fenomeni. Secondo me è stato contagiato da biologi come Richard Dawkins, che fanno risalire tutto ai geni; e forse qualcuno potrebbe insinuare che si sia innamorato dell'intelligenza artificiale perché dà l'impressione di spiegare per filo e per segno che cos'è la mente. Non mi sento di criticarlo per questo, perché anch'io mi trovo bene con il riduzionismo, che riporta i fenomeni più complessi a pochi principi elementari. Capisco che questo stile di pensiero piaccia più agli scienziati che ai filosofi. Infatti se i riduzionisti avessero ragione, la storia del pensiero si ridurrebbe alla cronistoria delle scoperte scientifiche.

Come la maggioranza degli scienziati, Dennett ritiene che la realtà esiste, che è comprensibile e riconducibile a poche leggi semplici. A noi non resta che scoprire queste leggi e come da esse possono essere derivati i fenomeni che percepiamo. I filosofi hanno sempre cercato di sfuggire a questo paradigma, dicendo, di volta in volta: "Va bene, le leggi possono essere applicate alla Terra ma non sono valide per i corpi celesti". Dopo Galileo, hanno aggiornato così il loro scetticismo: "Va bene, questo può essere vero per i corpi fisici ma non è vero per gli organismi biologici". Dopo Darwin hanno detto: "D'accordo, questo può essere vero per i nostri corpi, ma non lo è per le nostre menti" e così via. Non c'è che dire: stiamo spingendo i filosofi in un angolo, sfilando loro di mano, ad uno ad uno, gli argomenti di cui possono parlare. In un certo senso Dennett sta collaborando con i nemici dei filosofi, e questo mi diverte.

brian goodwin Trovo molto interessante il concetto di Dennett dell'ordine relazionale proprio del cervello: esso suggerisce che le proprietà della mente non sono materiali, bensì relazionali. Questo conduce ad abbracciare *in toto* la posizione dell'intelligenza artificiale. Io mi spingo ancora più in là, sostenendo che nei computer è possibile riprodurre non solo comportamenti intelligenti, ma anche la vita: essa non è una prerogativa dei sistemi cellulari. Può riguardare anche i sistemi artificiali.

steven pinker Io e Dennett ci poniamo le stesse domande: ci chiediamo come è organizzata la mente; in che modo vengono eseguite dal software mentale attività apparentemente banali quali riconoscere un volto o costruire una frase. Condivido anche la sua idea di psicologia come una sorta di ingegneria al contrario. Normalmente nell'ingegneria si stabilisce prima che cosa si vorrebbe ottenere da una macchina e quindi la si progetta. Nella biologia e nella scienza cognitiva, invece, si parte dalla macchina (ossia l'essere umano) e si cerca di ricostruire il modo in cui è stata progettata. Molti scienziati non percepiscono la complessità ingegneristica della mente perché, come la maggioranza delle persone, considerano le attività cerebrali del tutto naturali; in altre parole, la mente umana funziona così bene che non si fa caso a ciò che fa, così come non si pensa alla raffinata orchestrazione delle attività dell'apparato gastrointestinale quando si digerisce il cibo.

Il suo libro *Coscienza. Che cosa è* mi è piaciuto, ma non mi convince fino in fondo. Concordo sul fatto che l'esperienza qualitativa non sia la chiave giusta per capire l'intelligenza da un punto di vista scientifico. La coscienza può essere trattata scientificamente non perché le persone o gli animali sono dotati di un'esperienza

soggettiva, ma perché alcuni tipi di informazione sono reciprocamente accessibili mentre altri non lo sono. Da ciò si deduce che una parte dell'elaborazione mentale delle informazioni ha uno statuto diverso dal resto delle attività cerebrali.

In una prima approssimazione, la coscienza può essere definita in questo modo: informazione accessibile a un processore d'informazioni in contatto con l'ambiente circostante e che, negli esseri umani, può interfacciarsi con l'apparato verbale. Partendo da questa definizione è possibile comprendere, per esempio, perché un certo tipo d'informazione - come la consumata abilità dell'automobilista ad agire sulla leva del cambio - prescinda dall'attività cosciente, mentre la stessa manovra eseguita da un principiante richieda un ragionamento consapevole, da costruire passo dopo passo. La coscienza interviene nel secondo caso, non nel primo.

La ragione per cui il libro è in qualche modo insoddisfacente è che la coscienza ha anche un'altra dimensione, finora rimasta inesplorata. Proviamo a chiederci perché noi siamo in grado intuitivamente di distinguere fra un organismo che sente dolore e un organismo che agisce come se sentisse dolore senza provarlo realmente; oppure fra un organismo che vede il rosso quando questo colore è effettivamente presente e un altro che ha le stesse reazioni pur non vedendolo. Finché non riusciremo a spiegare da dove proviene questa nostra capacità di discriminazione intuitiva, non potremo spiegare in modo soddisfacente il fenomeno della coscienza.

Secondo Daniel questo è un falso problema. Io credo invece che l'esperienza soggettiva, irriducibile alla comunicazione interpersonale, sia un dato di fatto. E penso abbia ragione Noam Chomsky (che Dan odia) quando dice che probabilmente la nostra mente non è strutturalmente in grado di razionalizzare l'esperienza di queste vivide sensazioni elementari. D'altra parte tutte le nostre intuizioni in ambito etico presuppongono la distinzione fra un essere senziente e uno zombi. Stritolare il pollice di un essere umano con una tenaglia non è etico, mentre è moralmente indifferente eseguire la stessa tortura su un robot. E non si tratta semplicemente di un innocuo esperimento mentale: i dibattiti sui diritti degli animali, sull'eutanasia e sull'uso di anestetici nella chirurgia infantile vertono su questo genere d'intuizioni.

Un altro punto sul quale mi trovo in disaccordo con Dan è la spiegazione dell'intelligenza umana in un contesto evolucionistico. Dennett fa un uso smodato del concetto di meme di Richard Dawkins: secondo tale teoria, le idee si replicano, mutano e si propagano in modo differenziale nel cervello così come fanno i geni nel corpo. Capisco che, se non si vuole far nascere l'intelligenza da un intervento miracoloso, è necessario inserire anch'essa nel processo della selezione naturale darwiniana. Tuttavia mi sembra più plausibile pensare che l'evoluzione abbia progettato un cervello come una sorta di calcolatore in grado di generare idee complesse, senza ricorrere necessariamente agli stessi meccanismi di selezione naturale attivi sui geni.

Esiste una grande differenza fra la selezione del gene nel progetto di un organismo e la selezione del meme nel progetto della mente e della cultura. Per gli organismi, la variazione casuale seguita dalla selezione è l'unica spiegazione ragionevole. Al contrario, siccome il cervello è una macchina complessa, essa stessa progettata dalla selezione, le "mutazioni" (le idee) hanno virtualmente sempre una direzione, uno scopo. I memi (come la teoria della relatività, la filosofia kantiana o la musica di Beethoven) non sono i prodotti cumulativi di milioni di scelte accidentali, mutazioni stocastiche di qualche idea originale, bensì complesse sedimentazioni culturali frutto della collaborazione di molti cervelli.

Dennett ha cercato di stabilire un parallelismo forte fra genetica e cultura per garantire alla mente uno sviluppo di tipo evolucionistico. È un'ipotesi suggestiva che non va esclusa a priori; ma esistono anche altre spiegazioni possibili. Forse, come argomenta l'antropologo Dan Sperber, i meccanismi formali che possono spiegare l'evoluzione culturale sono quelli dell'epidemiologia e non della genetica delle

popolazioni: le idee si propagano come malattie contagiose, non come geni.

Richard dawkins Dan è una grande fontana di idee, un bellissimo spettacolo di fuochi artificiali. Quando leggo un suo libro, riempio ogni pagina di note a margine. Io però non lo definirei un filosofo; mi sembra che faccia le stesse cose che faccio io, anche se in un altro campo, e ammiro molto il modo in cui pensa, la sua straordinaria abilità di ragionare per metafore. La mia unica lamentela è che i suoi libri sono così ricchi di idee che si fa fatica a passare da una pagina all'altra.

11. Nicholas Humphrey

Il momento denso

nicholas humphrly è psicologo e ricercatore al Darwin College di Cambridge ed autore di *Consciousness Regained* (1983), *The Inner Eye* (1986) e *A History of the Mind* (1992).

Come facciamo a sentirci noi stessi? Come può quel pezzo di materia che è l'essere umano diventare la base dell'esperienza che ognuno di noi riconosce come propria? Come fanno il corpo e il cervello a costituire la mente umana?

Queste sono le domande che mi pongo da sempre, e oggi non sono più tanto soddisfatto delle risposte che ho dato in passato. Un tempo ero molto interessato a studiare il fenomeno dell'introspezione, ossia la conoscenza autoriflessiva della mente. Infatti non può esistere la coscienza senza una conoscenza introspettiva degli stati della propria mente: e se questo è vero, la coscienza deve essere una facoltà di livello molto alto, che si è sviluppata probabilmente solo negli uomini e nei primati.

Pertanto ho ipotizzato che tale capacità si sia evoluta per consentire ai soggetti di leggere nella propria mente e in quella dei loro simili. Grazie a essa, gli uomini sarebbero "psicologi naturali". L'idea, contenuta nei miei libri *Consciousness Regained* e *The Inner Eye*, aveva suscitato l'entusiasmo di molti, come del mio collega Richard Dawkins: secondo lui ero finalmente riuscito a sciogliere il nodo dell'evoluzione della coscienza umana.

Anch'io ero convinto di aver fatto un buon lavoro. Ma abbracciando questa particolare interpretazione della coscienza, basata sull'introspezione, si finisce per escludere dal novero degli esseri coscienti la maggior parte degli animali, i bambini piccoli, e tutti gli organismi primitivi. Come si fa ad affermare, davanti a un coniglio che soffre, o a un neonato che piange, che questi esseri sono privi di coscienza? Più cercavo di persuadere me stesso, più mi rendevo conto che l'ipotesi era insostenibile.

Ci deve essere perciò un livello molto più basso in cui esiste la coscienza ancora priva di introspezione, che equivale alla nuda esperienza dell'essere. Mi riferisco all'*hic et nunc* dell'esperienza sensoriale, in cui si percepiscono le sensazioni primitive di luce, freddo, odore, sapore, contatto, dolore. Non c'è bisogno di capacità analitica, né di

consapevolezza introspettiva per vivere questo stato dell'esistenza che accomuna l'adulto al bambino e al cane: oggi, secondo me, essere coscienti significa proprio questo.

Il momento denso della coscienza: l'ho battezzato così. Denso delle sensazioni suscitate dagli impulsi che in questo istante arrivano ai miei occhi, alle mie orecchie, alla mia pelle, che definiscono il mio essere vivo qui e ora. Queste sensazioni hanno un preciso carattere qualitativo.

Tuttavia l'accettazione del binomio mente/corpo impedisce ai filosofi di abbracciare una visione qualitativa dell'esperienza. Ci si chiede infatti come possa avere un carattere qualitativo qualcosa che avviene all'interno del corpo e del cervello umano. E come possano trasformarsi in sensazioni coscienti le attività fisiologiche della vista, dell'udito, del tatto.

Ecco perché la sensazione è diventata il mio pallino e perché oggi considero superate tutte le recenti scoperte della psicologia cognitiva e dell'intelligenza artificiale sui processi del pensiero astratto, sulle credenze di secondo livello e sul discorso proposizionale. Non nego che siano risultati importanti, ma li giudico poco significativi per una teoria generale della coscienza.

Ho studiato fisiologia e psicologia all'Università di Cambridge. Il mio professore, durante il periodo di dottorato, era lo psicologo americano Larry Weiskrantz, che in quegli anni conduceva esperimenti sugli effetti delle lesioni della corteccia visiva nelle scimmie. Il suo obiettivo era di confermare che la distruzione della corteccia visiva provoca una cecità quasi totale, approfondendo i risultati dello psicologo di Chicago Heinrich Kluver.

Io mi occupavo di un altro progetto, e probabilmente avrei fatto bene a badare ai fatti miei. Ma durante un'assenza di Weiskrantz cominciai a trascorrere un po' di tempo con due scimmie cieche del suo laboratorio, giocando con loro e osservandone il comportamento. In un paio di giorni mi resi conto che questi animali non erano affatto ciechi, come tutti pensavano. Potevano infatti seguire con lo sguardo i miei movimenti, e in poco tempo impararono anche a raggiungere la mia mano per prendere un pezzo di mela. In assenza di luce queste capacità scomparivano: quindi era chiaro che le scimmie erano ancora dotate di qualche forma di visione. Quando Weiskrantz tornò dal convegno, gli annunciai che avevo restituito la vista alle sue scimmie cieche.

Seguì un periodo di lavoro molto intenso con le scimmie, che nel giro di pochi mesi furono in grado di afferrare qualsiasi piccolo oggetto in movimento. E in breve pubblicammo un articolo sulla rivista "Nature", firmato da Weiskrantz e da me, dal titolo *Visione in una scimmia priva della corteccia striata*, che provocò molto scalpore nel *milieu* neurologico.

Nei sette anni successivi continuai a lavorare con una scimmia di nome Helen, che mi seguiva come un cane durante lunghe passeggiate in campagna. Alla fine dell'addestramento non ci si accorgeva quasi più della cecità di Helen, che sembrava assolutamente normale: poteva girare correndo intorno a una stanza, evitare ostacoli, trovare noci o frutti deposti sul pavimento. Aveva perfino una visione tridimensionale, perché riusciva a catturare le mosche. Eppure le mancava completamente la corteccia visiva, cioè l'apparato cerebrale considerato necessario per la vista.

Continuando il mio lavoro iniziato con Helen, Weiskrantz fece poi una scoperta molto importante: riuscì a individuare le stesse capacità in pazienti resi ciechi da danni neurologici alla corteccia visiva. Anche se queste persone erano convinte della propria cecità, in realtà riuscivano a elaborare informazioni di tipo visivo, come indicare la fonte di una sorgente luminosa o indovinare la forma di un oggetto. La loro è quindi una forma di visione priva di coscienza, una specie di occhio interno, come l'ha

chiamato Weiskrantz: il fenomeno è molto noto e discusso sia fra i filosofi sia fra gli studiosi di scienze cognitive.

Pur trovando affascinante quel settore, decisi di abbandonarlo, perché mi sentivo sempre meno a mio agio a infliggere dolorose mutilazioni agli animali. Iniziai allora a studiare le preferenze estetiche delle scimmie, cercando di accertare i loro gusti in fatto di ambiente, musica, colori. Scoprii che le scimmie preferiscono il verde e il blu, che hanno il potere di calmarle, rispetto al giallo e al rosso, che le mettono decisamente di malumore: si tratta di reazioni molto nette, più intense di quelle manifestate dagli uomini.

Al contrario, non fu possibile individuare alcuna preferenza da parte delle scimmie per le forme armoniose e simmetriche, o comunque dotate di valore estetico: i Picasso e i Mondrian le lasciano completamente indifferenti, così come i Raffaello. Non sono interessate nemmeno alla musica e, potendo scegliere, preferiscono il silenzio. Quindi non si può dire che abbiano cattivo gusto: semplicemente, non hanno nessun tipo di gusto.

Fu così che, partendo dagli esperimenti con le scimmie, mi trovai a scrivere saggi sull'estetica nell'uomo. Scrisi un articolo intitolato *The illusion of Beauty*, sulla evoluzione del senso della bellezza, che suscitò un grande interesse da parte di giornali e televisioni. Ma devo ammettere che si trattava solo di speculazioni, prive di qualsiasi solida prova.

Negli anni di Cambridge avevo diretto un laboratorio di ricerca e avevo svolto molto lavoro sperimentale anche sulla formazione dei concetti e sulla percezione del tempo. A un certo punto, però, capii che, pur amando la scienza sperimentale, potevo farne a meno, lasciando spazio ad altri bravi ricercatori. Ciò che davvero mi interessava, in quel momento, era concentrarmi sulla teoria.

Lasciai quindi Cambridge, e per alcuni anni mi dedicai a scrivere *Consciousness Regained* e a fare cinema, cosa che mi dava grande soddisfazione ma mi distraeva dalla carriera accademica.

Tutto cambiò ancora nel 1987, quando presi la strana decisione di andare a lavorare negli Stati Uniti con Dan Dennett, nel suo Center for Cognitive Studies della Tufts University. Accettai una posizione di semplice assistente, io che a Cambridge dirigevo un laboratorio. E la cosa all'inizio mi imbarazzava un po'. Ma in breve mi resi conto che mi trovavo benissimo, e nel giro di due anni sia Dan che io cominciammo a lavorare su due nuovi libri: il suo *Coscienza. Che cosa è* e il mio *A History of the Mind*.

All'inizio io e Dan la pensavamo allo stesso modo su molte cose: come l'intenzionalità e la riflessività dell'io, che credevamo determinanti per il problema centrale della coscienza. Ma dopo qualche tempo cominciai a rendermi conto delle sue lacune e anche delle mie. Dan è un filosofo molto più abile di me, e conosce meglio la psicologia cognitiva: grazie a lui sono riuscito a esprimere le mie idee in modo più rigoroso e completo. Tuttavia, quello che mancava nella nostra teoria della coscienza era l'ingrediente della sensibilità.

Da allora i miei sforzi teorici s'indirizzarono verso le cosiddette sensazioni coscienti. Io e Dan trascorrevamo insieme i week end nella sua casa di Blue Hill, nel Maine, discutendo accanitamente sull'esistenza di sensazioni come il colore rosso, il dolore, il sapore del formaggio. Dan diceva: "Senti, ho capito cosa vuoi dire. Ma, ammesso che queste sensazioni elementari di cui parli esistano, esse non lasciano nessun segno durevole nel cervello. In un certo senso è come se non ci fossero mai state". Al che io gli rispondevo: "Sì, Dan, ma ciò non toglie che queste ci siano. Io le ho. Adesso. Io queste esperienze le sto vivendo". Per Dan, se una sensazione non lascia nulla dietro a sé - nel senso di un testo, di una specie di appunto scritto del tipo: "Messaggio per il Sé: arrivata una sensazione" - è come se non fosse avvenuta.

Secondo Dan la coscienza è costituita da idee, giudizi, proposizioni. A lui interessa spiegare come il soggetto elabora i pensieri, prende le decisioni, cerca i ricordi ed esprime tutto ciò verbalmente. Se posso permettermi una parodia, la sua visione della mente assomiglia a un indaffarato ufficio cerebrale dove arrivano in continuazione fax, memo, telefonate, con gli impiegati e le segretarie che fanno i salti mortali per tenere tutto sotto controllo. Il risultato di questa attività frenetica è ciò che Dan chiama testo eterofenomenologico: cioè un "testo consapevole" espresso in parole o in simboli equivalenti, che di fatto corrisponde al flusso della coscienza.

Per me invece sono le sensazioni più elementari che costituiscono la coscienza. Il mio tentativo è di spiegare come vengono vissute e percepite dalle persone: come quest'attività sensoriale possa dare risultati presenti e immediati, dotati di precise qualità e identificati come propri. Nella mia interpretazione, la mente diventa come il pianista di un cinema muto, che cerca di suonare una melodia adatta alle immagini e agli stimoli di un film che viene proiettato sulla superficie del corpo. Non importa che tale attività produca un risultato, e tantomeno un testo; ciò che conta è che l'esperienza della coscienza consiste proprio in quella colonna sonora.

Alla fine il dilemma si riduce al modo in cui interpretiamo il concetto di "significato". Lo si può intendere in senso strumentale, attribuendo ad esso un valore solo se fa riferimento a qualcos'altro. Questa accezione è tipica del positivismo e del comportamentismo, ma in certo qual modo discende anche dall'etica protestante, secondo la quale le azioni vengono valutate solo in relazione ai loro effetti sulle generazioni future. Credo che quest'etica faccia parte del patrimonio culturale di Dan: in ogni caso, pervade la sua teoria della mente, dove il significato e il valore di un evento mentale consistono in ciò che si può ottenere da esso, in un momento successivo.

Benché sia molto difficile da confutare, credo che questo punto di vista sminuisca la realtà della nostra esperienza, poiché cancella la freschezza e l'immediatezza della nostra vita sensoriale. Per Dan, non esiste coscienza se la mente non ha scritto la storia di ciò che è successo, ed è in grado di ripeterla. Per me, invece, la coscienza è la reazione immediata allo stimolo che avviene sulla superficie del corpo: la sensazione cosciente che ne deriva è una sorta di azione provocata dallo stimolo.

Per spiegare la mia teoria ricorro spesso a un esempio tratto dalla storia dell'arte. Prima degli impressionisti francesi, la maggior parte dei pittori si preoccupava della collocazione storica di un soggetto. C'è voluto Monet per riconoscere il valore del presente. Per affermare: "Questa è la cattedrale di Rouen come la vivo io ora. In questo istante essa entra nei miei occhi così". Non c'è passato, non c'è futuro, solo il presente: quello che Monet cattura con un irripetibile impasto di colori è davvero il momento denso della sua esperienza soggettiva, senza un prima o un dopo. Così tutti noi viviamo immersi nel momento denso del nostro tempo. Basta osservare la gente che passa in una strada affollata per sentire che tutti stanno vivendo nell'immediato presente. È una sensazione meravigliosa.

L'intelligenza artificiale sta cercando di spiegare il pensiero invece della sensazione, e ha ottenuto buoni risultati: esistono già macchine pensanti, e ne avremo sempre di migliori. Ma non si sta scoprendo niente di nuovo. Sarebbe molto più sorprendente una macchina in grado di provare sensazioni, anche se non credo che all'IBM interessi.

Forse domani qualcuno tenterà di costruire queste macchine, ma difficilmente esse riusciranno a riprodurre le sensazioni provate dall'uomo, che sono il frutto della sua storia biologica. Pensiamo all'architettura: nelle costruzioni di oggi sopravvivono elementi che derivano dai templi greci o romani, ma che non svolgono più nessuna funzione. Allo stesso modo le nostre sensazioni sono influenzate da abitudini ancestrali che non hanno più alcuna rilevanza nel mondo di oggi, ma che rappresentano ancora

una fonte importante di qualità e varietà.

Ecco una descrizione concisa del mio modello di realtà: io sono me stesso. Io vivo un'esistenza attraverso il mio corpo, nel momento denso del presente della mia coscienza. E sto cercando di scoprire perché.

C'è una poesia di E.E. Cummings che dice:

since feeling is first
who pays any attention
to the syntax of things
will never wholly kiss you.

daniel c. dennett Giudicare romantico uno scienziato sembra una contraddizione, ma non lo è nel caso di Nick Humphrey. Nick ha svolto ricerche pionieristiche sull'attività neuronale di animali vivi, in particolare gatti. Su quella stessa strada hanno poi continuato i neuroscienziati David Hubel e Torsten Wiesel, che nel 1981 hanno ricevuto il premio Nobel per la medicina, proprio per la tecnica che Nick aveva contribuito a sviluppare. Ma anche se rimanevano ancora molti nodi da sciogliere, Nick non aveva intenzione di dedicarsi alle stesse ricerche per tutta la vita. È un suo atteggiamento tipico: una volta raggiunto un risultato, sente subito il bisogno di passare ad altro.

C'è un articolo, scritto da Nick qualche anno fa per il "London Observer", che secondo me spiega molto bene come la pensa. L'occasione era il quattrocentesimo anniversario della nascita di Isaac Newton, che una volta è stato definito da Charles Percy Snow "lo Shakespeare della scienza". Nick prende spunto da questo paragone, e lo contesta così: se Newton non fosse mai esistito, qualcun altro, prima o poi, avrebbe compiuto le medesime scoperte. Invece nessun altro avrebbe mai potuto realizzare l'opera di Shakespeare. Perché Newton faceva le cose alla maniera di Dio, mentre Shakespeare alla maniera di Shakespeare.

Nick allude a due diverse forme di creatività, ed è chiaro che per lui quella di Shakespeare ha più valore di quella di Newton: un punto di vista piuttosto insolito per uno scienziato. L'impresa di risolvere un teorema non lo stimola quanto offrire un contributo unico e originale, riconoscibile da tutti come suo e solo suo. Ma ciò succede nell'arte e non nella scienza, se non in casi rarissimi.

Con la sua teoria della mente, Nick sta tentando di attaccare me, e non è il solo. Ma Nick è molto più in gamba degli altri e si rende conto quanto sia difficile confutare la mia tesi, che è piuttosto solida e per ora regge bene. Per riuscire nel suo scopo deve trovare una teoria radicalmente alternativa e innovativa ed è in effetti ciò che sta facendo. Per questo motivo non si accontenta, come gli altri, di ripiegare su idee reazionarie del passato, che non possono funzionare. Almeno in questo io e Nick la pensiamo allo stesso modo.

niles eldredge Che sia vera o no, mi piace l'idea di Nick che nell'uomo l'autocoscienza e l'autoconsapevolezza abbiano un significato adattativo. In pratica noi siamo dotati di un occhio interno che ci permette di fare riferimento a noi stessi, in modo da immaginare con un buon grado di approssimazione quello che passa per la testa delle altre persone sedute accanto a noi, intorno al fuoco del campeggio. È un concetto che mi ha sempre attratto e che considero come una delle prove più argute dell'esistenza dell'adattamento in natura. Credo che l'evoluzione agisca sempre per qualche buon motivo.

steve jones È come se due squadre di atleti passassero il tempo a discutere sulle regole del loro sport. Questi scienziati che studiano la coscienza se ne stanno a contemplare il proprio ombelico e a cercare di definire quello che dovrebbero studiare. Comincio a chiedermi seriamente se una scienza della coscienza abbia senso, e soprattutto se sia possibile definirne gli scopi con un linguaggio accessibile a tutti. Solo in questo caso si può parlare di scienza, altrimenti non si tratta altro che di una serie di opinioni.

Secondo me costoro troverebbero la vita molto più interessante se si rimettessero a fare quello che molti di loro facevano agli inizi della carriera: sporcarsi le mani con la ricerca sperimentale.

Anche gli scienziati, come certi letterati, vanno incontro a una crisi di mezza età: a un certo punto si dimenticano che la scienza è l'arte di ciò che si può scoprire, e cominciano a divagare su argomenti che esulano dalla sua portata.

Non mi riferisco in particolare ad Humphrey, ma mi sembra che anche lui sia avviato su quella strada. Oggi infatti si occupa di argomenti che mi hanno sempre lasciato molto freddo, come la coscienza e il significato della vita.

francisco varela Nick Humphrey sta cercando di portare l'esperienza fenomenologica all'interno della scienza, grazie alla distinzione fra sensazione e percezione, che è tipica della tradizione analitica britannica. Mi sorprende che qualcuno proveniente da quella scuola stia facendo un tale sforzo, e considero *A History of the Mind* un libro notevole.

Verso la fine del libro, Humphrey sostiene di aver trovato una spiegazione della coscienza: quella parte non mi ha convinto, l'ho trovata troppo letteraria e incomprensibile. La prima parte è invece davvero illuminante: mi riferisco all'idea di utilizzare l'esperienza diretta, quella che lui chiama sensazione, per descrivere i processi razionali del cervello. A mio avviso, il concetto di "momento denso" è un passaggio fondamentale nella relazione fra l'esperienza e il funzionamento del cervello.

12. Francisco Varela

Il Sé emergente

francisco varela biologo, dirige il Centre National de Recherche Scientifique e insegna scienze cognitive ed epistemologia all'École Polytechnique di Parigi. Ha scritto *Principles of Biological Autonomy* (1979). È autore, insieme a Humberto D. Maturana, di *Autopoiesi e cognizione* (1980, tr. it. 1985) e di *L'albero della conoscenza* (sempre con Humberto D. Maturana, 1987, tr. it. 1987); e, insieme a Evan Thompson ed Eleanor Roseli, di *La via di mezzo della conoscenza* (1992, tr. it. 1992).

Credo di essermi posto una sola domanda nella vita. Perché gli individui virtuali, i Sé emergenti, spuntano dappertutto, creando i loro mondi a tutti i livelli, della mente e del corpo, delle cellule e del transorganico? La produzione di queste identità virtuali è

incessante, e da essa nascono sempre nuovi regni organici, mentali, sociali. Eppure tale risultato, estremamente solido e duraturo, sembra in contrasto con la natura effimera e volubile dei processi da cui emergono gli individui. Per me questa è la domanda fondamentale da porsi.

È logico dunque che m'interessi alla neurologia, alle scienze cognitive, all'immunologia, poiché queste discipline cercano di affrontare, da diversi punti di vista, la questione dell'identità biologica. Pensiamo all'identità che consente alle cellule di definire il mondo di loro pertinenza; all'identità che permette al sistema immunitario di distinguere il Sé dal non Sé; infine all'identità in base alla quale il cervello diventa la base della mente e dei processi cognitivi. Ebbene, questi diversi meccanismi hanno un tratto comune.

Questo è anche il motivo unificante dei miei lavori più importanti, che riguardano argomenti solo in apparenza eterogenei: la nozione di autopoiesi (autoproduzione) delle organizzazioni cellulari; un'interpretazione funzionale del sistema nervoso e dei processi cognitivi; una revisione delle teorie attuali del sistema immunitario.

Quando si parla di identità biologica, si intende il processo da cui ha origine un individuo. Nel caso dell'autopoiesi, il Sé virtuale di un insieme di cellule emerge dai rapporti fra le cellule stesse: le interazioni locali danno infatti origine a una proprietà globale, che è il principio dell'individuo. E questa transizione, molto specifica ed esplicita, esiste anche fra non-vita e vita.

Anche il sistema nervoso funziona nello stesso modo. I neuroni, infatti, interagiscono attraverso un circuito di superfici sensoriali e motorie: ed è questa rete dinamica che permette di definire il dominio della percezione cognitiva.

Io propongo di applicare allo studio dei fenomeni cognitivi e anche del sistema immunitario la stessa epistemologia: quella che presuppone un processo circolare sottostante in cui a un certo punto appare una coerenza emergente, che costituisce il Sé. Restando a questo livello, il Sé è in un certo senso visibile, in quanto fornisce la superficie sulla quale avvengono vari processi di interazione. Cessa invece di esserlo quando si cerca di localizzarlo. Esso infatti è completamente delocalizzato.

Gli organismi vanno intesi come reti di Sé virtuali. Io non possiedo una identità forte, bensì un mosaico, un bricolage di identità diverse: una di tipo cellulare, un'altra immunitaria, un'altra ancora cognitiva, e così via, che si manifestano in diverse interazioni. A me interessa approfondire la transizione dalle interazioni locali alla proprietà globale emergente, per capire come tutti questi Sé si uniscono e tornano a separarsi nella danza dell'evoluzione. I miei studi sulla visione cromatica e sull'autoregolazione immunitaria danno luogo a ciò che Dan Dennett definirebbe "pompe di intuizione": essi sono esempi di questa transizione da regole locali a proprietà emergenti nella vita. Oggi possiamo verificare queste ipotesi sia con esperimenti empirici, sia attraverso simulazioni matematiche e informatiche: un buon esempio di questo processo, ma non l'unico, è costituito dal sistema immunitario.

Ho mosso i miei primi passi in questo settore all'inizio degli anni Settanta - quindi molto prima che scoppiasse la rivoluzione della vita artificiale - con i miei studi sull'autopoiesi: cercavo di definire quale fosse la minima organizzazione vivente, e di costruire modelli di automi cellulari. Il mio lavoro fu notato da Lynn Margulis, che lo incorporò subito nelle sue ricerche sulle origini e l'evoluzione della vita cellulare e nell'ipotesi Gaia, nata dalla collaborazione fra la Margulis e James Lovelock.

Diedi vita al concetto di autopoiesi insieme a Humberto Maturana nel 1970, quando lavoravamo insieme a Santiago, negli anni di Allende. Giungemmo a quell'idea affrontando i processi biologici in modo completamente nuovo, immaginandoli cioè come un insieme di mondi che creano se stessi nel corso dell'evoluzione.

L'autopoiesi è un tentativo di definire l'unicità dell'emergenza, che produce la vita

nella sua tipica forma cellulare. La cellula si forma attraverso una circolarità autorganizzata di reazioni biochimiche che producono molecole: queste molecole creano un confine, cioè una membrana, in grado di limitare quel processo che ha prodotto i costituenti della membrana. Qui ci troviamo di fronte a un processo logico di autoalimentazione, un *bootstrap*, un anello: una rete di reazioni produce un'entità, la quale a sua volta delimita un confine all'interno del quale continuano a svolgersi i processi. Tale autolimitazione è tipica della vita cellulare. L'entità capace di autodistinguersi come individuo, cioè la cellula, non può dirsi completa fino a quando non ha creato da sola i propri confini, senza l'aiuto di alcun agente esterno. Con l'autopoiesi, dunque, la cellula si autodefinisce, balzando fuori dal brodo delle reazioni chimico-fisiche.

Ci rendemmo subito conto che il concetto di autopoiesi poteva essere ben simulato con gli automi cellulari: semplici unità in grado di ricevere e trasmettere informazioni alle unità limitrofe, che erano già state usate da John von Neumann. In seguito questi automi divennero molto popolari nelle ricerche sulla vita artificiale, ma in quegli anni nessuno ne aveva ancora sentito parlare.

Per spiegare la natura circolare dell'autopoiesi, ho anche sviluppato un modello matematico che formalizza l'entità capace di generare i propri confini: cioè la situazione in cui qualcosa produce A, che produce B, che a sua volta produce A. Era il 1974. Oggi i miei colleghi considerano questi concetti una parte della teoria della complessità.

Gli studi più recenti sulla complessità confermano questa logica un po' folle del serpente che si morde la coda, in cui è difficile distinguere l'inizio dalla fine. Dimentichiamoci quindi del modello della scatola, con un input e un output definito di informazioni: per definire l'individuo occorre pensare sempre in termini di anelli chiusi. Nelle mie prime riflessioni sull'autopoiesi mi ero ispirato al lavoro di Warren McCulloch e Norbert Wiener: questi pionieri della cibernetica immaginavano circuiti a retroazione, e non riuscivano pertanto a riconoscere l'importanza della circolarità nella costituzione di un'identità. I loro circuiti erano ancora immaginati all'interno di una configurazione per input e output. Viceversa, in molti dei sistemi complessi in uso attualmente questi segnali in uscita ed entrata dipendono dalle loro interazioni con il sistema, e la loro ricchezza dipende proprio da questa interconnessione.

Il mio secondo campo d'indagine consiste nell'applicare la logica circolare delle proprietà emergenti allo studio del sistema nervoso, e ciò significa rivoluzionare il nostro modo di concepire il cervello. Non potendo contare su input precisi, il sistema nervoso non può essere definito un sistema di elaborazione delle informazioni. Occorre allora chiedersi come fa il cervello, sulla base delle sue dinamiche interne, a distinguere ciò che è rilevante da tutte le altre informazioni prive di significato. Le classiche metafore dell'intelligenza artificiale e dei calcolatori non si attagliano alla vita del cervello. Io infatti sono convinto, insieme ad altri, che l'attività cerebrale sia basata sulla rappresentazione simbolica.

Le stesse intuizioni sono utili in altri campi della biologia. Con esse si può confutare l'idea che il cervello elabori informazioni per crearsi una rappresentazione del mondo; si può mettere in dubbio l'interpretazione militarista del sistema immunitario, concepito come un esercito che difende l'organismo contro i microbi invasori; si può fare a pezzi la visione adattazionista dell'evoluzione. Pur non avendo lavorato in prima persona su questo argomento, sono convinto che solo criticando il concetto di adattamento si può dare un colpo mortale al neodarwinismo. Un'interpretazione alternativa dell'evoluzione è stata data da Steve Gould, Stuart Kauffman e Dick Lewontin. In particolare Lewontin ha molto apprezzato il mio lavoro sul sistema nervoso, che considera affine al suo modo d'intendere l'evoluzione.

Recentemente mi sono dedicato allo studio del sistema immunitario. La mia

nuova interpretazione dell'immunologia è molto diversa da quella tradizionale. A mio avviso, la caratteristica del sistema immunitario è di far emergere l'identità del corpo, non un'identità di tipo difensivo. Così tutta l'immunologia si trasforma da negativa in positiva, e il sistema immunitario non è più localizzabile in alcune parti e organi del corpo, ma viene inteso come un circuito emergente.

Ho verificato queste intuizioni con una serie di esperimenti. Per esempio, l'immunologia classica presuppone un sistema di risposte esterne, sempre in allerta per avvistare gli invasori. In mancanza di potenziali invasori, questo sistema dovrebbe azzerarsi : invece i topi cresciuti in ambienti sterili, privi di sfide esterne, continuano ad avere un sistema immunitario del tutto normale.

La medicina rimane sconcertata davanti alle malattie autoimmuni. La cosa è comprensibile, dato che queste patologie contrastano con la logica dominante in immunologia. Di fronte a esse non ha più senso parlare di vaccini, perché non esiste nessun agente infettivo proveniente dall'esterno: è il sistema immunitario che si rivolta contro se stesso. Anche l'aids è un caso drammatico di collasso della coerenza emergente del sistema immunitario, un fenomeno sistemico che può essere paragonato a un cataclisma ecologico. Tutti pensano che l'aids sia un'infezione, cosa senz'altro vera. Ma la distruzione del sistema immunitario non è opera diretta dell'infezione. Il virus hiv semplicemente fa scattare un meccanismo di deregolamentazione in grado di amplificarsi da solo e di provocare la catastrofe. Se si esamina l'urina di un malato di aids, infatti, meno del 5% dei linfociti morti sono infettati dall'hiv.

La situazione è quella tipica di una malattia autoimmune, in cui il sistema divora se stesso. I ricercatori cominciano solo ora a rendersi conto che cercare un vaccino contro l'aids è una perdita di tempo. Io credo infatti che prima valga la pena di cercare di capire i meccanismi globali di regolazione del sistema, per poi ristabilire la loro interconnessione. Si può fare il paragone con la piaga sociale della droga: i drogati rappresentano una sorta di malattia autoimmune della società, che ne scompagina interi segmenti. In questo caso, rinchiudere e punire i drogati è del tutto inutile. Solo reinserendoli nelle famiglie, nella collettività, è possibile avere la meglio su questa "malattia" sociale. Il carcere non serve, i vaccini neppure.

Vorrei riuscire a stabilire un nesso fra il mio lavoro scientifico e l'interesse che coltivo da tempo per il buddhismo. Mentre la tradizione occidentale rifiuta l'idea di un individuo senza Sé, o meglio un Sé virtuale, questa assenza di Ego è centrale per il buddhismo. Nei duemila anni di storia della religione buddhista, l'intuizione è stata sviluppata in modo molto raffinato, dal punto di vista filosofico, fenomenologico ed epistemologico. Oggi possiamo avvalerci di queste riflessioni come nel Rinascimento si faceva ricorso alla filosofia greca per comprendere la scienza di Galileo.

Il buddhismo è una pratica, non una fede. Ogni buddhista è un sacerdote laico, simile allo scienziato totalmente coinvolto nel proprio lavoro o allo scrittore sempre immerso nel suo mondo letterario. Oggi molte persone hanno sufficiente tempo libero e preparazione culturale per riuscire a fare ciò che una volta era accessibile solo ai monaci. Inoltre il buddhismo comincia a permeare anche la cultura occidentale, attraverso un vero e proprio proselitismo. Sebbene in forma mascherata, molti concetti della fisica e della biologia moderna derivano dagli insegnamenti del Buddha.

Questa influenza si manifesta nella mia interpretazione della mente: i buddhisti sono infatti specialisti del Sé virtuale, giacché riescono a viverlo come un'esperienza interiore. Ecco ciò che mi affascina di questa tradizione culturale. Anche Dan Dennett è arrivato alle medesime conclusioni, a modo suo. Ma mentre Dan si concentra sul livello cognitivo, io cerco di abbracciare diversi piani biologici: forse perché ho una visione più ampia del conoscere. Dal mio punto di vista, la conoscenza si coevolve insieme a colui che conosce: essa non può quindi essere intesa come una

rappresentazione oggettiva, esterna.

La conseguenza più importante della mente intesa come proprietà emergente è che il Sé esiste solo nella sua relazione con il mondo. L'Io è tale perché interagisce, e al di fuori di questa relazione non sussiste, in quanto non ha un luogo in cui lo si possa trovare. Questo punto di vista è applicabile anche agli altri Sé biologici, pur con alcune sottili differenze. Una proprietà emergente, prodotta da una rete di relazioni sottostante, permette al sistema di interagire con altri Sé, o identità, dello stesso genere. Tuttavia non è mai possibile dire che quella proprietà coincide con un determinato componente del sistema. Nel caso dell'autopoiesi, per esempio, non si può dire che la vita, cioè la capacità di autoprodursi, risiede in una data molecola, nel dna, nella membrana cellulare, o in una proteina. La vita è infatti l'intero modello dinamico che le dà corpo come proprietà emergente.

Mi affascina applicare lo stesso tipo di analisi cognitiva alla mia mente. Il mio stesso senso del Sé - ciò che mi fa dire "Io" - può essere visto sotto la stessa luce. Per fare questo esperimento devo continuamente restare abbarbicato alla mia identità. Solo così è possibile valutare che cosa significhi avere un'identità, avere una mente. Per potermi porre in relazione con gli altri, la mia mente deve percepire di "essere qui, adesso". Ma quando interagisco, e cerco di afferrare questa identità, essa mi sfugge, perché non sta in nessun luogo. Essa, infatti, è distribuita in tutto il sistema sottostante. Devo precisare, infine, che i concetti di emergenza e di non localizzazione non hanno nulla a che vedere con i recenti tentativi di applicare la meccanica quantistica alla vita cerebrale. L'ipotesi è senz'altro suggestiva, ma non può contare su nessuna prova scientifica. Dalla parte delle mie idee, invece, pesano trent'anni di risultati della scienza cognitiva. Quindi al fisico che sottolinea la composizione atomica della mente rispondo che, anche se ha ragione, la cosa è irrilevante. La mia identità, per una persona che mi sta guardando, non ha lo stesso peso di un'identità a livello cellulare. Esiste una realtà di vita e di morte che riguarda direttamente l'uomo, ed è molto lontana dalle astrazioni. Per questo sono convinto che si debba abbandonare l'ingombrante zavorra del materialismo della tradizione filosofica occidentale per abbracciare un modo di pensare più cosmico.

stuart kauffman Francisco Varela ha una creatività straordinaria. Trovo che ci sia molta profondità nel lavoro che ha compiuto insieme a Humberto Maturana. Ma dal punto di vista della biologia molecolare, bisogna ammettere che sono tutti concetti campati per aria. Quindi il mio giudizio è ambivalente: quella parte di me che aspira al rigore e al senso critico protesta, mentre l'altra parte si è lasciata conquistare dalle sue ultime ricerche sull'autorappresentazione delle reti immunitarie.

Trovo molto stimolante la sua distinzione fra sistema immunitario centrale e sistema periferico, che risponde al mondo esterno. Non so se sia corretta la sua tesi secondo cui il sistema immunitario si sarebbe affermato come rappresentazione di se stesso, dal quale deriverebbe, per via evoluzionistica, la capacità di riconoscere e fermare gli agenti estranei. Ma anche se non si è d'accordo con lui, non si può fare a meno di apprezzare la bellezza, la coerenza e l'immaginazione che riesce a infondere nelle sue teorie.

Varela è una persona affascinante e con una straordinaria conoscenza delle lingue. Mi sono avvicinato a lui indirettamente nel 1983, quando ho conosciuto in India Humberto Maturana. Il lavoro di Varela e Maturana sull'autopoiesi era stato ignorato, se non disprezzato, da gran parte dei biologi ortodossi. Ma proprio ascoltando Maturana fui ispirato a riprendere una ricerca sugli insiemi autocatalitici e polimerici che avevo abbandonato nel 1971. Con quel lavoro penso di essere riuscito a produrre l'unico modello formale che esprime chiaramente ciò che loro intendono per autopoiesi.

Il 99 per cento dei biologi non ha mai sentito parlare di Francisco. Primo, perché viene dal Sudamerica, cioè dalla periferia del mondo scientifico: la biologia molecolare seria infatti viene svolta soprattutto dai britannici e dagli statunitensi, seguiti alla lontana da francesi, svizzeri e tedeschi. Secondo, perché Francisco si occupa di biologia teorica, una disciplina oggi fuori moda. Ciononostante, le sue dettagliate simulazioni dei sistemi immunitari e nervosi, perfettamente simulabili al computer, sono un esempio di buona e solida biologia teorica, e si collegano con le ricerche che facciamo al Santa Fé Institute sui fenomeni collettivi emergenti.

In un certo senso Francisco può essere considerato un filosofo, cosa che certo non l'aiuta, specialmente negli Stati Uniti. Anch'io faccio fatica a farmi ascoltare dai miei colleghi, soprattutto da coloro che accettano come scientifica solo la biologia sperimentale. Come Francisco sono convinto dell'esistenza di principi generali soggiacenti ai sistemi viventi, e credo che valga la pena di continuare a cercarli.

w. daniel hillis Credevo che Francisco Varela fosse un mistico, perché non riuscivo a capire le sue idee. Poi l'ho conosciuto e mi sono reso conto che abbiamo alcuni obiettivi in comune. Certo, è difficile non cadere nel misticismo quando si cerca di esprimere concetti come quello delle proprietà emergenti, che scaturiscono da semplici sistemi interattivi. Francisco peggiora la situazione perché in certe cose è davvero un mistico, che si accompagna pubblicamente con il Dalai Lama. Credo che con la sua teoria del sistema immunitario abbia davvero raggiunto un risultato importante. Occorre vedere cosa riuscirà a dimostrare, ma ha tutto il mio incoraggiamento.

Cisco è il simbolo di ciò che fa tanto arrabbiare Marvin Minsky: la fuga di cervelli, traviati dalla filosofia, dal settore dell'intelligenza artificiale. Uno degli studenti favoriti di Minsky, Terry Winograd, ha infatti smesso di scrivere ottimi programmi per computer per dedicarsi all'ermeneutica. Secondo Minsky, è come se Winograd fosse caduto in un buco nero. Il buco più nero è Cisco.

christopher g. langton Varela ha una dialettica così efficace che riesce a convincerti di tutto ciò che dice. Dopodiché, una volta usciti dalla stanza, e dalla sua influenza carismatica, è difficile ricordarsi i concetti che cercava di esprimere. Da qui il mio scetticismo nei confronti di certe teorie suggestive che sbandiera a destra e a manca. L'autopoiesi, per esempio, impiega termini completamente nuovi per descrivere fatti molto noti in biologia; e talvolta, cambiando linguaggio, le cose assumono anche un aspetto diverso. Chi non avesse mai incontrato quei fenomeni, e ne sente parlare per la prima volta nel linguaggio di Varela e di Humberto Maturana, diventa un entusiasta sostenitore della loro tesi. Ma a chi, come me, li conosce bene spiegati dalle leggi della biologia e dalla fisica, l'autopoiesi non serve a nulla.

Sicuramente Varela è convinto di aver dato un contributo originale alla discussione scientifica, ma questo qualcosa in più mi sfugge ogni volta che cerco di afferrarlo. Un amico una volta mi ha detto che negli articoli di Varela è possibile sostituire l'espressione "sistema autopoietico" con "sistema vivente", e il senso rimane esattamente lo stesso: anzi, molte frasi diventano tautologie.

L'autopoiesi ha esercitato una grande influenza soprattutto in Europa. Ho il sospetto che molti dei più appassionati seguaci di Varela siano anche vitalisti. Secondo loro, infatti, attraverso l'autopoiesi si potrebbero formulare principi organizzativi di livello più alto, che non sono consentiti da quella che definiscono con disprezzo scienza riduzionista. Ma attenzione: così si esce dall'ambito della scienza per entrare nell'epistemologia.

Può darsi che Varela e Maturana siano buoni epistemologi, dato che lo pensano

in molti. E comunque non va addossata a loro la responsabilità delle intemperanze dei loro seguaci.

daniel c. dennett "Post hoc ergo propter hoc!". La tal cosa viene dopo di questa, quindi deriva da essa. Il detto calza a pennello a Francisco Varela, un uomo molto intelligente che, per generosità di spirito, crede che le sue idee derivino dal buddhismo. A me invece piacerebbe che cancellasse dai suoi scritti tutti i riferimenti all'epistemologia buddhista, che non fanno altro che oscurare l'importanza del suo lavoro scientifico.

Ci sono molti punti in comune fra la "mente emergente" di Francisco e le mie "macchine joyceane". Ci sono stati fra noi anche contatti personali: infatti nel 1990 ho trascorso tre mesi con lui, al crea di Parigi, e in quel periodo ho scritto gran parte di *Coscienza. Che cosa è*. Ma pur essendo amici e colleghi, in fondo sono il suo peggior nemico, perché lui è un rivoluzionario e io sono un riformatore. Lui vorrebbe buttare via tutto e ricominciare da zero, mentre io voglio mantenere gran parte delle interpretazioni tradizionali.

niles eldredge Una volta stavo facendo un giro in automobile in Italia con Francisco, e abbiamo cominciato a parlare di uccelli. Io ho l'hobby del birdwatching, e come biologo evoluzionista provengo da una tradizione di ricerca in gran parte svolta su questi animali; Francisco invece è un esperto della loro fisiologia. A un certo punto ho osservato quanto sia straordinario che l'uomo possa riconoscere gli uccelli dal canto e dai colori delle loro penne, proprio come fanno loro. Ma Francisco mi ha bruscamente fatto notare che le capacità di visione e di udito degli uccelli superano di molto quelle umane. Inutile spiegargli che ciò che intendevo era semplicemente la possibilità di riconoscere questi animali attraverso le loro segnalazioni acustiche e visive, da loro stessi utilizzati per gli stessi fini. Francisco diventava sempre più impaziente, non riuscendo a capire come mi potessi accontentare di un ragionamento così approssimativo.

Il suo atteggiamento è tipico di chi prima si è interessato di morfologia e di fisiologia, per poi dedicarsi alle sue trasformazioni in senso evoluzionistico. Era la strada che seguivano tutti; perciò io me ne sono allontanato trent'anni fa per studiare, invece dell'adattamento, il contesto generale in cui avviene il cambiamento adattativo. E oggi ho una mentalità completamente diversa.

brian goodwin Ho sentito parlare per la prima volta di Francisco Varela quando mi mandò dal Cile un articolo sull'autopoiesi. Ma il lavoro mi sembrò troppo astratto, e non lo presi in considerazione. Poi l'ho incontrato di persona.

Francisco è straordinario per la sua chiarezza di pensiero e per come riesce a inserire le idee più astratte in ricerche di buona qualità scientifica. La sua è una perfetta combinazione di pensiero e di immaginazione. Non è universalmente conosciuto perché si occupa soprattutto di biologia teorica, ma tutti quelli che lavorano in immunologia sono al corrente dei suoi importanti contributi.

lynn margulis Conosco parte del lavoro di Francisco Varela, ma spesso non capisco il suo linguaggio. Non so se è colpa mia, o del suo esoterismo. Insieme al suo maestro Humberto Maturana, Varela ha riconosciuto l'importanza dell'autopoiesi. Per comprenderla, occorre una profonda conoscenza dei sistemi viventi e di come i meccanismi di autoformazione definiscono la vita stessa. Non si può privilegiare nessuna parte di un organismo: il dna non può essere più importante delle membrane,

perché sono ambedue indispensabili alla cellula. In definitiva, tutti i sistemi autopoietici, che siano cellule, organismi o comunità, vengono regolati dall'interno.

L'autopoiesi, intesa come una serie di criteri per definire l'identità e l'esistenza, si applica ai batteri come ai prattisti e agli organismi superiori. C'è perfino chi sostiene che si applica anche ai sistemi sociali: ma senza arrivare a questi eccessi, si tratta senz'altro di un principio organizzativo molto utile.

Rispetto Francisco anche per aver riconosciuto la differenza fondamentale che esiste fra sistemi viventi e sistemi artificiali, non viventi: è un peccato che le sue idee non siano mai spiegate con chiarezza. E pensare che Francisco è un prodigioso poliglotta: se siamo soli parliamo in francese o in spagnolo, mentre se è presente qualcun altro torniamo all'inglese. Parla queste tre lingue molto meglio di me. Tuttavia, a un livello più profondo, egli ha una reale difficoltà di comunicazione. Non sono però d'accordo con quelli che lo giudicano un mistificatore: credo piuttosto che abbia difficoltà a esprimere le sue idee senza cadere nelle trappole linguistiche tipiche della biologia.

13. Steven Pinker

Il linguaggio è un istinto umano

Steven Pinker è uno psicologo sperimentale. Insegna al Department of Brain and Cognitive Sciences del Massachusetts Institute of Technology. È autore di *Language Learnability and Language Development* (1984), *Learnability and Cognition* (1989) e *The Language Instinct* (1994).

Per me il linguaggio è un istinto. Devo ammettere che è una strana definizione rispetto a quelle usate dagli altri studiosi di scienze cognitive, che parlano di organo mentale, facoltà, o modulo.

Io sostengo che il linguaggio è una capacità complessa e specialistica; che si sviluppa spontaneamente nel bambino senza bisogno di sforzo cosciente o di un'istruzione formale; si esplica senza consapevolezza della sua logica interna; è qualitativamente uguale in ogni individuo; deve essere distinta dalle abilità più generali del cervello di elaborare informazioni e di presiedere a un comportamento intelligente.

Queste osservazioni portano lontano. Prima di tutto, portano a ritenere il linguaggio come il prodotto di circuiti neuronali specifici, evolutisi appositamente nel cervello umano. Perciò, se il linguaggio è un istinto, potrebbero esserlo anche altri aspetti del nostro intelletto. Un'altra conseguenza è che la complessità del linguaggio proviene principalmente dalla mente stessa del bambino: non dalla scuola o dai libri di grammatica.

Nella mia attività di psicologo sperimentale mi interesso a tutti gli aspetti del linguaggio: l'apprendimento infantile, la formazione mentale delle frasi, la comprensione nella conversazione, la localizzazione cerebrale del linguaggio, i suoi

cambiamenti durante la storia dell'uomo.

Alla base dei miei studi ci sono le scoperte scientifiche sul linguaggio compiute a partire dagli anni Cinquanta. Da allora ci poniamo sempre le stesse domande: come nascono le metafore? Perché gli immigrati fanno tanta fatica a imparare una nuova lingua, a differenza dei loro figli? Che linguaggio parlerebbe un bambino allevato dai lupi? E via di questo passo.

La nostra conoscenza del settore si articola su tre temi principali.

Il primo parte dal presupposto che la gente ha spesso idee sbagliate sul linguaggio. Che si provenga da studi scientifici o umanistici, infatti, si tende comunque a credere che il linguaggio sia un prodotto della cultura, inventato in una certa fase della storia umana: una capacità che i bambini apprendono imitando gli adulti, oppure grazie all'insegnamento nelle scuole. E poiché le scuole oggi sono un disastro, e i giovani si ispirano alle stelle del rock o del pallone, un progressivo deterioramento della lingua dovrebbe portarci presto a esprimerci attraverso grugniti, come Tarzan. Secondo me, invece, non avverrà niente di tutto questo, perché il linguaggio è un istinto innato.

Il secondo tema riguarda l'origine del linguaggio, inteso come organo mentale. Io credo che esso, come gli organi fisici, sia frutto di un adattamento prodotto dalla selezione naturale nell'evoluzione della specie umana. La mia dovrebbe essere un'idea scontata. Una volta accettato il carattere innato del linguaggio, infatti, è ovvio individuare la sua origine nella selezione naturale, da cui derivano tutti gli altri organi complessi del corpo e del cervello umano. Ma c'è invece chi mi giudica un provocatore; e non si tratta di gente qualsiasi, bensì di scienziati del calibro di Stephen Jay Gould, probabilmente il più famoso scrittore di evoluzionismo, e Noam Chomsky, il maggior esperto mondiale di linguistica. Gould e Chomsky sono convinti che il linguaggio sia apparso come un sottoprodotto della crescita e del cambiamento di forma del cervello umano nel corso dell'evoluzione, o addirittura come una conseguenza accidentale nella selezione di qualche altra facoltà. Sostengono - secondo me a torto - che il linguaggio non può essere un adattamento.

Il terzo tema nasce quando ci chiediamo perché il linguaggio è un argomento così appassionante. Certi motivi sono evidenti: è una caratteristica distintiva dell'uomo, da cui dipende la sua sopravvivenza. Ma in realtà siamo così interessati a esso perché intuiamo che lo studio del linguaggio è la strada più accessibile per cogliere il mistero della natura umana.

Quando si definisce il linguaggio come un istinto, anche il concetto di intelligenza cambia. Io infatti non credo che l'uomo sia dotato di una capacità generale d'apprendimento o di imitazione di modelli, bensì di una mente composta da una serie di istinti: questi possono essere intesi come utensili molto specializzati, frutto della selezione naturale, che ci sono serviti per svolgere determinate funzioni fin dal Pleistocene.

Le prove che il linguaggio sia un istinto, piuttosto che la manifestazione di una più generale abilità di acquisire cultura o di usare simboli, si trovano nelle scoperte scientifiche dell'ultimo secolo.

Una verifica importante proviene dall'universalità del linguaggio umano dotato di una grammatica complessa: gli antropologi l'hanno individuato anche nelle popolazioni più sperdute e primitive della Terra. Non che l'universalità sia una prova sufficiente, dato che oggi sono universali anche il videoregistratore e il fax: ma è sicuramente necessaria per stabilire che il linguaggio è una qualità innata.

Non esiste un linguaggio primitivo, perché anche le civiltà materialmente primitive si esprimono in modo molto raffinato. La complessità grammaticale a cui alludo non consiste nel conformarsi a un modello codificato di espressione scritta, cioè

alle regole che insegnano le maestre o su cui insistono i manuali di stile. Mi riferisco invece alla grammatica vernacolare, a quella serie di norme inconsce, e assai più difficili, che stanno alla base della conversazione umana in tutte le sue sfumature e sono comuni a tutti i linguaggi: nomi e verbi, soggetti e oggetti, casi, declinazioni, ausiliari, le cui regole governano vocabolari di migliaia e migliaia di parole. Se non credete a questa estrema complessità, provate a riprodurre con un software l'abilità di conversazione dell'uomo della strada, o di un normale bambino di quattro anni. I bambini infatti sono un'altra miniera di prove a favore dell'istinto del linguaggio. In tutte le civiltà lo sviluppo della parola avviene molto rapidamente e seguendo le tappe note a tutti i genitori: nel primo anno di vita i bambini cominciano a balbettare, a un anno pronunciano la prima parola, a diciotto mesi circa compaiono le prime combinazioni logiche di parole. Poi, intorno ai due anni, l'intera grammatica della lingua madre sboccia nel giro di sei mesi. Un processo sbalorditivo dopo il quale ci si ritrova di botto a compiere con il proprio figlio vere e proprie conversazioni.

La mente del bambino ha risolto un problema di calcolo che un informatico descriverebbe così: trovare un algoritmo che, partendo da una serie di frasi, sia in grado di estrapolare da esse tutte le regole grammaticali di quella lingua (una a caso delle cinquemila parlate sulla Terra). Ebbene, questo algoritmo è oggi al di là della portata di qualsiasi sistema di intelligenza artificiale: i processori linguistici, infatti, non sono ancora in grado di capire un solo linguaggio naturale, e tantomeno imparare a usarlo.

Ai bambini, invece, non occorre insegnare proprio nulla. Negli esperimenti che faccio quotidianamente in laboratorio, i piccoli, stimolati per la prima volta nella loro vita all'uso di particolari costruzioni linguistiche, spesso indovinano al primo tentativo, come se la regola fosse già stampata nella loro testa.

I bambini hanno anche una capacità sorprendente di evitare gli errori, aggirando l'ostacolo delle eccezioni grammaticali della lingua in cui cadrebbe qualsiasi calcolatore: la maggior parte dei bambini, per esempio, dice subito "uova" e non "uovi", come si sarebbe portati a pensare.

Lo sviluppo del linguaggio non dipende dall'interesse di comunicare per ottenere un determinato scopo. Il bambino non impara a parlare per ottenere più biscotti, o per vedere più televisione: infatti il suo linguaggio, diventando sempre più corretto con il passare dei mesi e degli anni, in certi casi finisce col perdere di efficacia comunicativa. Ciò che agisce in lui, invece, è un programma inconscio che sincronizza il suo linguaggio alle regole formali della comunità in cui è inserito.

Un caso speciale, e molto interessante, è quello della cosiddetta creolizzazione, che si verifica quando i bambini aggiungono complessità a un linguaggio imperfetto. È successo in passato nelle piantagioni, fra schiavi di madrelingua diversa; oppure più di recente, durante la convivenza di immigrati di varie nazionalità. Questi adulti cominciano a parlare fra loro una lingua franca: un miscuglio sconnesso e sgrammaticato di parole tratte dalle varie lingue, chiamato *pidgin*. Ma quando nella comunità nasce la prima generazione di bambini, nelle loro bocche il *pidgin* si trasforma a poco a poco in una nuova lingua creola, grammaticalmente ordinata e complessa. Fra i protagonisti di casi famosi di creolizzazione ci sono bambini sordi, che in mancanza di insegnanti o di scuole specializzate, sono stati capaci di inventare un nuovo linguaggio dei segni ordinato e sistematico: è avvenuto di recente in Nicaragua, dove non era disponibile un linguaggio dei segni già codificato.

Infine altre prove importanti derivano dalla specificità neurologica, e probabilmente anche genetica, delle varie funzioni del cervello. Il cervello non è un polpettone indistinto, che esprime intelligenza in modo proporzionale alle sue dimensioni, ma è organizzato in sottosistemi. E possiamo definire la sua specificità studiando le persone colpite da danni cerebrali, o affette da malformazioni congenite.

In certe forme di afasia, cioè di mancanza di parola, causata da un ictus cerebrale, si perde sia la capacità di pronunciare che di comprendere il linguaggio, pur conservando per tutto il resto facoltà intellettive normali. Esistono poi altri disturbi del linguaggio meno radicali: ne sono affetti i bambini che sviluppano la parola con molto ritardo, e per tutta la vita continuano ad esprimersi con lentezza e difficoltà. Solo a prezzo di grandi sforzi riusciranno a risolvere i problemi linguistici che qualsiasi bambino di tre anni supera di slancio: come inventare il passato remoto di un verbo mai udito prima. Ma la loro intelligenza è normale; anzi, spesso sono particolarmente dotati per la matematica.

È probabile che questi disturbi della parola siano ereditari, come indicano studi compiuti sulle famiglie colpite con frequenza. Tuttavia ci manca ancora la prova cruciale, che consisterebbe nel verificare la stessa anomalia in coppie di gemelli monozigoti separati alla nascita e allevati da famiglie diverse. Ma fra le settanta coppie di questi gemelli, studiate finora dagli scienziati in tutto il mondo, non esiste un caso del genere.

Per quanto convincenti, tutti questi esempi non bastano ancora per convincere gli scettici che il linguaggio è un istinto separato dalle altre funzioni cognitive. C'è infatti chi sostiene che, essendo il linguaggio l'attività più impegnativa della mente, esso può subire le peggiori conseguenze di un danno generale, non avvertito ad altri livelli cerebrali.

Io rispondo a quest'ultima obiezione ricordando l'esistenza di persone gravemente minorate, dal bassissimo quoziente intellettivo, ma dotate di capacità linguistiche straordinarie. Fra costoro ci sono alcuni bambini nati con la spina bifida o affetti dalla sindrome di Williams che, pur non riuscendo a compiere semplici azioni come allacciarsi le scarpe, possono formulare frasi bellissime, complicate ed espressive, completamente slegate dalla realtà. Questo secondo me è la prova decisiva che il linguaggio è una facoltà mentale separata dalle altre, un istinto.

Adesso veniamo al punto della selezione naturale. Io ritengo che il linguaggio nasca da un adattamento, mentre per Gould e Chomsky si è sviluppato come conseguenza inevitabile della selezione di qualcos'altro: l'elaborazione analitica delle informazioni, oppure la specializzazione degli emisferi cerebrali, o semplicemente l'ingrandimento del cervello. Il linguaggio sarebbe un epifenomeno, come il fatto che le nostre ossa sono bianche e non verdi: solo una conseguenza accidentale della selezione delle ossa in base alla loro rigidità, quindi per il loro contenuto di calcio, che è appunto bianco.

Purtroppo non abbiamo testimonianze dirette sull'evoluzione del linguaggio, né possiamo rintracciare le sue tracce nei fossili: esistono tuttavia prove indirette per distinguere fra un adattamento e un suo sottoprodotto che, inspiegabilmente, né Gould né Chomsky hanno applicato per avvalorare la loro ipotesi.

Sto parlando del test, sviluppato da George Williams e Richard Dawkins, del progetto adattativo complesso: quello di ogni organizzazione biologica che svolge una funzione particolare e che, per la sua estrema complessità, non può essere attribuita al caso. Prima di Darwin, infatti, i progetti complessi della natura venivano citati dai teologi fra le prove dell'esistenza di Dio.

Un ottimo esempio di progetto adattativo complesso è quello dell'occhio. Il colpo di genio di Darwin è stato di attribuire l'emergere di questa complessità alla selezione naturale, cioè a un fenomeno fisico: perché più un occhio funziona bene, maggiori sono le probabilità che tale caratteristica venga trasferita alla prole.

Adesso proviamo ad applicare lo stesso criterio d'analisi al linguaggio. Anch'esso è un sistema biologico complesso e altamente improbabile, dato che lo troviamo in una sola specie, e che potrebbe essere facilmente danneggiato dal minimo cambiamento del

cervello. Come l'occhio, anche il linguaggio è costituito da una rete di numerosi componenti. Pensiamo al vocabolario mentale, che in un tipico studente liceale ammonta a decine di migliaia di parole; alle regole inconsce della sintassi e della morfologia; alla fonetica e alla pronuncia; ai meccanismi di produzione del linguaggio da parte della lingua e della laringe. Negli umani questi organi sembrano essere stati progettati principalmente per articolare parole in un discorso. Questa loro funzione va a scapito di altre abilità - possedute da altri mammiferi ma non dall'uomo - come quelle di inghiottire e respirare contemporaneamente. Anche la nostra capacità di percepire i discorsi ha dello straordinario: l'orecchio umano può infatti decodificare il parlato a un tasso compreso fra 15 e 45 unità di suono al secondo, un'abilità di discriminazione che non si applica a nessun altro tipo di segnale. Il "miracolo" sta nel fatto che a una frequenza di circa 20 unità per secondo il suono fonde in un ronzio di bassa tonalità. Evidentemente la bocca invia messaggi in forma compressa che l'orecchio è in grado di decomprimere e decifrare. Non da ultimo ricordiamo la capacità dei bambini di imparare tutto ciò in un tempo record.

A queste caratteristiche, che fanno propendere verso la selezione naturale, occorre aggiungere che il linguaggio serve alla riproduzione, allo scambio delle informazioni e delle invenzioni, alle relazioni sociali: per conquistare l'amore, l'amicizia, il potere e il danaro.

Nonostante questo, c'è ancora qualcuno che nega che il linguaggio sia un adattamento frutto della selezione naturale, e che insiste, come Chomsky e molti antropologi, a considerarlo una conseguenza delle dimensioni del cervello. Ma io ribatto che i nani hanno un cervello indubbiamente più piccolo, ma capacità linguistiche normali. E che anche nei casi in cui l'estrema piccolezza del cervello è causa di ritardo mentale, la persona è comunque dotata di linguaggio.

Occorre infine eliminare un'ultima possibile causa della comparsa accidentale del linguaggio, che è la forma sferica del cervello e la particolare configurazione dei neuroni. Ancora una volta, esaminando le possibili variazioni normali e patologiche, quindi anche cervelli dalle forme più strane, per esempio le deformazioni tipiche dell'idrocefalo, si trova che queste condizioni non sono incompatibili con lo sviluppo di un linguaggio normale. Un caso famoso è quello di un ex studente di Oxford.

In definitiva, se avessimo applicato tutti questi criteri d'analisi a un organo diverso dal linguaggio, che non ci stia tanto a cuore, e verso il quale non esistano tanti preconcetti, saremmo già arrivati da tempo alla conclusione inequivocabile che si tratta di un prodotto della selezione naturale.

Come la mettiamo però con il resto della mente? Negli anni Venti di questo secolo è nata la corrente intellettuale che considera la mente come un sistema di apprendimento generale, la cui complessità dipende esclusivamente dalla cultura circostante. L'idea, molto convincente, è diventata presto un baluardo contro le dottrine razziste del XIX secolo: un perfetto principio di uguaglianza, in base al quale per ogni bambino, se allevato nella società giusta, si può aprire qualsiasi orizzonte. Chi si è opposto a questa interpretazione è stato tacciato di "determinismo biologico", quindi messo sullo stesso piano di chi ritiene i poveri esseri inferiori, o le donne adatte solo per fare figli. E tuttora, sia nel mondo accademico sia in quello politico, l'immagine politicamente corretta della mente umana è quella della massa di cera informe, o della lavagna vuota: compito della società è plasmare quella cera, scrivere sulla lavagna.

Nella sua storia del darwinismo nelle scienze sociali, Carl Degler riconduce l'origine di questo credo a due fonti accademiche. Una è l'antropologia, che presentando uno spiegamento di culture e abitudini fra le più svariate, era arrivata alla conclusione che le potenzialità dell'uomo sfuggono a ogni definizione precisa. L'altra è la psicologia, da cui è nato il concetto del meccanismo d'apprendimento generale. Ma

ambidue queste posizioni oggi sono state smentite.

Le culture umane, intese come un carnevale dove tutto è possibile, erano il prodotto di un'antropologia dove prevaleva una mentalità turistica: quella che al ritorno da un viaggio ti fa ricordare solo le cose diverse da casa tua, altrimenti forse non valeva nemmeno la pena di partire. Molti antropologi, sia per giustificare la loro professione, sia per sottolineare le potenzialità della razza umana, hanno esagerato i livelli di stranezza e di esotismo delle tribù che avevano studiato. Alcune di queste scoperte, per esempio quelle di Margaret Mead sulle popolazioni delle isole Samoa, si sono rivelate infondate. Altri antropologi, tutti intenti a cercare le differenze, hanno clamorosamente mancato di notare le caratteristiche comuni a ogni cultura umana: come il senso dell'umorismo, l'amore, la gelosia, il senso di responsabilità. Di queste caratteristiche umane universali, il linguaggio è la più importante. Nel suo libro *Human Universals*, l'antropologo californiano Donald Brown elenca centocinquanta universali che coprono tutte le sfere dell'esperienza umana, la cui presenza in tutte le culture, anche le più remote, è circostanziata dagli studi etnografici. Questa, secondo me, è la vera lezione dell'antropologia: uno schema generale sottostante alla cultura che Brown chiama "il popolo universale", e che assomiglia al concetto di "grammatica universale" di Chomsky.

L'altra smentita tocca alla psicologia che crede nell'esistenza di un magico meccanismo di apprendimento al quale tutto sarebbe possibile, e che si cerca di riprodurre con l'intelligenza artificiale. A dire il vero, l'idea suona plausibile solo fino a quando non si tenta di metterla in pratica.

Le scienze cognitive non hanno fatto altro che scoprire fino a che punto sottovalutiamo le nostre capacità più elementari, come vedere a colori, raccogliere una matita, camminare, parlare, riconoscere una faccia, fare conversazione. Tutti questi compiti sono infatti di una complessità straordinaria, e ciascuno di essi richiede un software speciale. Quando si cerca di riprodurre un sistema di apprendimento, infatti, lo scopo non è ottenere una capacità generale, ma costruire singole funzioni molto specifiche: una per riconoscere le specie animali e vegetali, un'altra per stabilire relazioni sociali, un'altra ancora per capire la grammatica, e così via. L'unico modello possibile di mente deve prevedere una serie di meccanismi di apprendimento: l'idea di un unico utensile tutt'fare, al posto del martello, dei chiodi, del trapano, non è concepibile per l'ingegneria, e tantomeno per quell'ingegneria del software mentale che chiamiamo psicologia.

Se il linguaggio è innato, saranno tali anche le altre capacità umane? C'è il rischio di imboccare una china pericolosa che conduce all'estremo opposto? Finiremo per considerare innata anche l'abilità di riparare un carburatore?

No, perché le ricerche di psicologia, linguistica e intelligenza artificiale dimostrano che esiste un'interessante posizione intermedia. Tutte le cose che l'uomo sa fare, da riparare carburatori, a guarire le malattie, a seguire le trame delle telenovele, possono derivare dall'interazione di un numero limitato di meccanismi intuitivi. Ne cito alcuni: un sistema di meccanica intuitiva, che ci permette di capire il comportamento degli oggetti fisici; una biologia intuitiva, con cui possiamo prevedere gli aspetti basilari della vita di animali e piante; un senso dei numeri, che consente l'apprendimento della matematica e dell'aritmetica; mappe mentali, con le quali ci orientiamo nei grandi spazi; un modulo per la selezione dell'habitat, in base a cui scegliamo l'ambiente per noi ideale; un senso del pericolo, che include le fobie innate comuni a tutti gli uomini, come la paura del vuoto, degli animali velenosi e dei predatori; un istinto particolare per il cibo, che ci protegge dalle contaminazioni, dalle malattie, che ci fa evitare tutto ciò che è disgustoso o repellente. E ancora: un istinto di vigilanza e di giudizio sull'andamento della nostra vita, che ci fa prendere decisioni e cambiare strada. Una psicologia intuitiva, che ci permette di prevedere il comportamento degli altri partendo dalle loro credenze e desideri (questa facoltà

sembra assente in chi è affetto da autismo). La lista degli istinti potrebbe continuare: un'agenda mentale, in cui immagazziniamo le persone che conosciamo, le loro capacità e caratteristiche; il concetto del Sé, cioè la conoscenza della propria identità e dell'immagine che vogliamo mostrare agli altri; un senso della giustizia, dei diritti e dei doveri; un senso della parentela, che a volte degenera in nepotismo; un sistema che regola la ricerca del partner, l'attrazione sessuale, i sentimenti di fedeltà e il dolore del tradimento.

Il bello di definire il linguaggio come un istinto umano è anche di cominciare a pensare che ce ne possono essere molti altri.

George c. williams Ho un'ottima opinione di Steven Pinker, che sarà un protagonista della scienza del XXI secolo. Trovo notevoli le sue ricerche sull'evoluzione della capacità linguistica. In passato mi sono chiesto anch'io quali fossero le caratteristiche elettive della specie umana: fra le varie ipotesi si discuteva sull'essere bipedi, oppure sull'uso degli utensili. Ma nel 1966 mi ero già convinto che ciò che definisce l'uomo è l'abilità linguistica.

Dato che né Shakespeare né Milton hanno avuto un numero sufficiente di pronipoti per propagare le loro capacità linguistiche, rispetto ai loro contemporanei ignoranti e dal basso quoziente intellettivo, deve esistere un meccanismo evolutivo che equipaggia i bambini, in età molto precoce, di una minima capacità verbale da cui possono trarre vantaggio. Poi, solo come conseguenza accidentale, il processo si amplifica con la crescita della persona: ecco perché gli adulti hanno una capacità verbale enormemente superiore al necessario. Pinker sostiene qualcosa di simile; ho letto i suoi primi lavori sull'evoluzione del linguaggio, ma non conosco ancora il suo ultimo libro *The Language Instinct*. Rimedierò molto presto.

daniel c. dennett Mi ha stupito la risolutezza con cui Pinker ha voltato le spalle alla tradizione del Massachusetts Institute of Technology: un'università dove prevale una cultura ristretta del linguaggio e delle scienze cognitive, che esclude qualsiasi considerazione di tipo evoluzionistico. Quando ho incontrato Steve per la prima volta, mi era sembrato un perfetto prodotto di serie del mit; poi evidentemente ha visto la luce e la sua conversione è stata davvero spettacolare.

Lo Spirito disceso su di lui è l'evoluzione. Steve però non ha rinnegato con rancore la sua formazione, rischiando di cadere nell'eccesso opposto, ma è riuscito a integrare con equilibrio i due punti di vista. Mi aveva colpito molto un suo articolo del 1990, scritto con lo studente Paul Bloom, intitolato *Natural Language and Natural Selection*. In esso Pinker parte dalla posizione chomskiana tipica del mit, in base alla quale esiste un organo del linguaggio che è una facoltà innata e specifica degli esseri umani. Quindi mette in evidenza quanto di questa abilità innata può essere interpretato come il frutto dell'adattamento, e spiegato con la selezione naturale. Un'interpretazione che si distacca nettamente dal pensiero chomskiano.

Così Pinker riesce a far cadere le maggiori resistenze opposte dagli scienziati alle idee di Chomsky, che a un certo punto presupponevano l'accettazione di una specie di miracolo: il dono celeste dell'organo del linguaggio. Di fronte a questa concezione, sembrava quasi più accettabile la posizione dei comportamentisti, per i quali il linguaggio non piove dal cielo, ma scaturisce da un meccanismo generale di apprendimento; o, se vogliamo, si sviluppa con l'esperienza attraverso un processo elaborato di "ricerca e sviluppo".

Ebbene, Pinker ha spazzato via quelli che a qualsiasi persona dal temperamento scientifico sembravano gli anatemi della linguistica.

w daniel hillis Studiando con Minsky ho imparato presto a guardarmi dai linguisti, essendo lui un nemico giurato di Chomsky e di tutti i chomskiani. Secondo noi quella scuola studia il linguaggio come un'entità che non ha nulla a che vedere con la concreta attività linguistica. Steven Pinker è il primo che mi convince dell'importanza del contributo dei linguisti, poiché riesce a esporre le sue idee da un punto di vista computazionale, e le collega in modo comprensibile con i fenomeni psicologici.

Che un bambino arrivi sulla Terra e nel giro di tre anni acquisisca una totale padronanza di un linguaggio, infatti, è un fenomeno eccezionale, che sicuramente merita di essere spiegato.

stephen jay gould Non conosco molto bene Steven Pinker. Apprezzo la sua esposizione del pensiero di Chomsky, ma mi piacerebbe persuaderlo che l'adattamento non è il modo giusto per comprendere il funzionamento del cervello. Lui sembra piuttosto irremovibile su questa posizione.

14. Roger Penrose

La coscienza è fatta di ingredienti non computabili

roger penrose è un fisico matematico e insegna all'Università di Oxford. È autore di *Techniques of Differential Topology in relativity* (1972); insieme a W. Rindler, di *Spinors and Space-time* (.1984-1986); di *La mente nuova dell'imperatore* (1989, tr. it. 1992) e di *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness* (1994). Ha inoltre curato, insieme a C. J. Isham e a Dennis W. Sciama, *Quantum Gravity 2: A Second Oxford Symposium* (1981), e insieme a C.J. Isham, *Quantum Concepts in Space and Time* (1986).

Sul piano tecnico, il mio impegno principale riguarda la teoria dei "twistor": una revisione radicale dei concetti di spazio e di tempo di cui mi interessa particolarmente l'inserimento nel contesto della teoria della relatività generale di Einstein. Nonostante i progressi conseguiti nel settore alcuni anni fa, c'è ancora un nodo fondamentale da sciogliere, a cui mi sto applicando con entusiasmo. L'obiettivo finale è trovare il giusto collegamento fra la relatività generale e la teoria quantistica.

Da giovane, quando ho cominciato a pensare seriamente di dedicarmi alla fisica, mi sentivo più attratto dalla teoria quantistica e dalla elettrodinamica quantistica - anche se non le conoscevo ancora bene - che dalla relatività. Durante il dottorato mi sono occupato di matematica pura. Credo che il mio articolo più citato di quel periodo riguardi l'inversione generalizzata delle matrici, un argomento talmente matematico da essere ignorato dalla maggior parte dei fisici. Poi ho lavorato sulle "tassellature non periodiche", che hanno a che fare con i quasi-cristalli e perciò, in una certa misura, con la fisica dello stato solido. Infine sono passato alla relatività generale, dove credo

di essere noto soprattutto per i teoremi sulle singolarità, frutto della collaborazione con Stephen Hawking, che conosco da molti anni, fin dai tempi in cui era un allievo di Dennis Sciama. Altri miei contributi nel campo della relatività riguardano gli spinori e la struttura asintotica dello spazio-tempo, in relazione con la radiazione gravitazionale.

A dispetto dell'opinione più diffusa, sono convinto che la relatività generale modificherà la struttura della meccanica quantistica, e non viceversa. Ritengo infatti che, per riuscire a collegare con successo la meccanica quantistica alla teoria gravitazionale, occorra prima modificare le regole della teoria dei quanti.

Fra quest'area della fisica e la coscienza umana esiste secondo me un nesso un po' indiretto, basato su considerazioni al negativo. Per spiegare gli effetti della coscienza, infatti, credo sia necessario ricorrere a un processo fisico non computazionale, che non vedo in nessuna teoria fisica esistente. L'unico luogo dove la non computabilità potrebbe forse inserirsi è la cosiddetta "misurazione quantistica", a patto di poter formulare per essa una nuova teoria dotata del requisito di non computabilità; cosa che probabilmente la renderà conciliabile con la relatività generale. Ma adesso sto correndo troppo: perché ciò succederà solo in un futuro ancora lontano.

Mi sono convinto che certi ingredienti della coscienza devono essere di natura non computabile grazie al teorema di Gödel. Secondo il mio professore di logica, a Cambridge, il teorema di Gödel stabilisce un punto fondamentale: che il modo di mettere in evidenza l'indimostrabilità formale di una proposizione ne esibisce al tempo stesso la verità. Prima di allora avevo sentito parlare solo vagamente di questo teorema, e della possibilità di esibire asserzioni che non sono dimostrabili sulla base di un qualsiasi sistema di regole assegnate in precedenza. Ma solo in quel momento mi resi conto che, se si crede nella verità delle regole che si stanno usando, si è obbligati anche a credere nella proposizione la cui verità si trova oltre quelle regole. Sono così arrivato alla conclusione che la comprensione matematica non può essere descritta da regole: lo sostengo con vigore nel mio libro *La mente nuova dell'imperatore*.

Per sfuggire al teorema di Gödel esistono alcune scappatoie, che vengono spesso usate dai critici per sostenere i loro punti di vista. Tuttavia, gran parte di questi contrattacchi non colgono nel segno. Gli unici che meritano attenzione sono quelli di Dan Dennett: vale quindi la pena di spiegare perché nemmeno lui riesce ad aggirare il teorema di Gödel.

Dennett sostiene che nel pensiero matematico si impiegano algoritmi ascendenti anziché discendenti. Un algoritmo discendente si presta a risolvere un problema particolare attraverso una procedura specifica di efficacia già nota. Un algoritmo ascendente, invece, non mira a risolvere un problema particolare, ma è organizzato in modo meno rigido, per imparare dall'esperienza e migliorare gradualmente fino a trovare una buona soluzione per la questione in esame. Molti ritengono che il funzionamento del nostro cervello si basa su algoritmi ascendenti piuttosto che discendenti. Ma in *Shadows of the Mind* applico ai sistemi ascendenti il teorema di Gödel, e sostengo che neppure questi riescono ad aggirarlo. Pertanto mi sono convinto che nella nostra comprensione cosciente deve essere presente qualche elemento non computazionale, di natura completamente diversa.

Lo ammetto: il computer può compiere molte delle funzioni svolte dal cervello, e nello stesso modo. Ma sostengo anche che le azioni della coscienza sono di natura diversa, e che esse oltrepassano non i limiti della fisica in generale, ma quelli della fisica che conosciamo oggi.

Il mio ultimo libro consta di due parti. Nella prima ho cercato di dimostrare nel modo più rigoroso possibile che il pensiero cosciente, ovvero la comprensione cosciente, non è descrivibile in termini computazionali. Nella seconda parte, più

esplicativa, cerco di spiegare ciò che accade in realtà.

Questo nuovo elemento non computazionale non riguarda esclusivamente il nostro cervello, ma esiste in tutto il mondo fisico, dove tuttavia ha un ruolo irrilevante. Esso va cercato nel punto di collegamento fra i livelli di comportamento classici e quantistici. Ed è proprio qui che entra in gioco la misurazione quantistica.

La fisica moderna è un po' strana, perché si svolge su due piani: uno quantistico, che fa riferimento ai fenomeni che avvengono su scala piccolissima e a minuscole differenze di energia. L'altro è quello classico dei fenomeni su larga scala, dove operano le leggi di Newton, Maxwell, Einstein. Dato che la meccanica quantistica è più moderna, il pubblico tende talvolta a crederla più accurata di quella classica, e anche in grado di spiegare quest'ultima, se solo si sapesse come fare. Ciò non è esatto: non si può dedurre il comportamento classico da quello quantistico proprio come non è possibile l'operazione inversa.

La verità è che non siamo ancora in possesso di una teoria quantistica definitiva, e che passerà ancora molto tempo prima di riuscire a completare una teoria in grado di spiegare non solo le particelle, ma anche i fenomeni su grande scala. Sarà la fine della fisica come la intendiamo oggi? No, ma essa verrà limitata ad alcuni fenomeni: proprio come la meccanica di Newton è sopravvissuta alla relatività, pur con alcuni cambiamenti, ponendosi rispetto a essa come un limite. Allo stesso modo, la teoria quantistica e la fisica classica che usiamo oggi costituiranno un limite per una teoria che dobbiamo ancora trovare. Io ipotizzo che questa futura teoria debba contenere elementi non computazionali, e che il suo ruolo riguardi l'amplificazione di un fenomeno dal livello quantistico al livello classico, ossia proprio quel che avviene nel processo di misura.

Oggi è a questo stadio che si inserisce la casualità, che fa definire probabilistica la teoria quantistica. Al contrario, se si rimane al livello dei quanti, la casualità non esiste: essa infatti interviene solo quando si cerca di ingrandire l'effetto infinitesimale per portarlo a un livello in cui può essere osservato e misurato, cioè quando "si fa una misura". Solo allora s'inserisce la probabilità. Secondo me, ciò che accade durante questo passaggio di scala, di ingrandimento, è qualcosa che non può essere compreso dalle attuali teorie fisiche. Non si tratta della semplice irruzione della casualità, bensì di un elemento non computazionale irriducibile al calcolo.

Fin da studente sono stato convinto che il pensiero umano dovesse prevedere un elemento non computazionale. Naturalmente, avendo sempre avuto una mentalità scientifica, cercavo anche di dimostrare questa ipotesi: ma essa può esulare dalla scienza che conosciamo oggi, nella quale non sembra esserci posto per i fenomeni che riguardano la coscienza. Oggi infatti l'opinione corrente considera scienza solo ciò che può essere introdotto in un calcolatore.

Credo che questo equivoco dipenda dal fatto che gran parte degli scienziati utilizzano il calcolatore per simulare i fenomeni fisici. Ma esistono anche fenomeni non computabili e tuttavia perfettamente scientifici e descrivibili con la matematica: grazie alla mia formazione di matematico, riesco a rendermi conto di questo fatto forse meglio di altri.

Quando dico "non computazionale", non intendo né casuale, né incomprensibile. In matematica, l'esempio più calzante è rappresentato dal decimo problema di Hilbert. Data una famiglia di equazioni algebriche, ci si chiede se possano essere risolte in numeri interi: la risposta può essere sì o no per ogni esempio particolare, ma nessun computer la può calcolare in un tempo finito. Infatti esiste un famoso teorema, scoperto da Jurij Matijasevič, che prova l'impossibilità di rispondere a questa domanda in un tempo finito attraverso una procedura computazionale. Solo in certi casi particolari si può rispondere con una procedura algoritmica; tuttavia, dato un simile algoritmo a prova di errore, si può sempre trovare una soluzione algebrica che

sfugge a esso, ma che si sa non ammettere soluzioni in numeri interi.

Qualunque sia il livello di comprensione accessibile al genere umano, il decimo problema di Hilbert dimostra che non tutto può essere incapsulato in una forma computazionale. Si può perfino immaginare un mondo giocattolo che si evolve secondo un modello affine al decimo problema di Hilbert: la sua evoluzione potrebbe essere deterministica, cioè matematicamente prevedibile, ma non calcolabile da un computer. Vale la pena di riflettere su quest'esempio: ma ovviamente io non credo che a nessun livello le leggi della fisica funzionino così. Sono convinto che l'universo reale abbia un comportamento molto più raffinato e ricco di sfumature.

Scrivendo *La mente nuova dell'imperatore* avevo due obiettivi. Da una parte cercavo di diffondere l'idea scientifica della non computabilità del nostro pensiero cosciente, e di sostenere anche un punto di vista filosofico. Dall'altra avevo intenzioni educative, perché volevo spiegare i concetti della matematica e della fisica di oggi. Era infatti parecchio tempo che mi attirava l'idea di divulgare a un pubblico colto certe idee sulla scienza, non particolarmente anti convenzionali, che io trovavo entusiasmanti.

Ma la spinta decisiva a mettermi all'opera mi fu data dal programma televisivo "Horizon" della bbc, in cui Marvin Minsky e altre persone facevano affermazioni estremistiche e provocatorie. Capii allora che occorreva dare voce al punto di vista alternativo, che non era ancora stato espresso da nessuno: questa nuova impostazione avrebbe dato incisività e impatto alla mia esposizione di concetti della fisica e della matematica. E il veicolo doveva essere un libro, perché questi contenuti interdisciplinari esulano dal campo di qualsiasi rivista scientifica.

Mi hanno accusato di aver scritto un libro di filosofia che non fa riferimento a nessun filosofo: e credo abbiano ragione, dato che i filosofi tendono a rimanere invischiati nelle loro discussioni di settore e i loro interessi difficilmente coincidono con quelli degli scienziati.

Quando dico che il cervello funziona secondo criteri non computazionali, non sto alludendo ai computer quantistici, che sono concetti molto ben definiti, non presuppongono alcun cambiamento nella fisica e non svolgono funzioni non computazionali. Dan Dennett paragona il computer quantistico a un gancio che scende dal cielo: la sua definizione preferita di miracolo. Esso, invece, è un concetto perfettamente plausibile, anche se non credo che possa spiegare il funzionamento del cervello. Si tratta di un altro comune fraintendimento del mio pensiero.

Una delle caratteristiche fondamentali del livello di attività quantistica è che in esso occorre considerare la coesistenza di vari, diversi eventi alternativi. In meccanica quantistica, infatti, se X è possibile e Y è possibile, allora è possibile anche qualsiasi combinazione di X e Y, ponderata da coefficienti complessi. Quindi ogni particella può avere stati in cui occupa contemporaneamente varie posizioni; e quando si usa la meccanica quantistica per analizzare un sistema, occorre prevedere le cosiddette sovrapposizioni di alternative.

Nell'idea di computer quantistico proposta da David Deutsch, Richard Feynman e altri, sono i calcoli che si sovrappongono: quindi tale computer, invece di fare un calcolo alla volta, ne compie molti contemporaneamente. In certe circostanze la cosa può anche risultare molto efficiente: il problema sorge alla fine, quando dalla sovrapposizione di tutti questi calcoli diversi si cerca di ricavare una determinata informazione.

Dire che il cervello funziona come un computer quantistico è un'affermazione drastica. Io non arrivo a questo estremo: secondo me le azioni quantistiche sono importanti per comprendere i processi cerebrali, ma le azioni non computazionali del cervello avvengono nel passaggio fra il livello quantistico e quello classico, che va oltre la comprensione della meccanica odierna.

La scoperta più promettente per localizzare questa terra di confine fra la fisica classica e quantistica proviene dalle ricerche sui microtubuli di Stuart Hameroff e dei suoi colleghi dell'Università dell'Arizona. Tutte le cellule eucariotiche hanno una struttura chiamata citoscheletro, costituito in alcune parti da microtubuli: questi sono ovviamente presenti anche nei neuroni cerebrali. Esistono però organismi unicellulari, come i parameci e le amebe, che pur essendo privi di neuroni sono in grado di muoversi e di svolgere funzioni complesse. Sembra perfino che essi possano apprendere dall'esperienza, e che questa capacità, in mancanza di un sistema nervoso, sia appunto governata dal citoscheletro e dai microtubuli.

I microtubuli sono letteralmente tubicini del diametro di qualche nanometro. A quelli presenti nei neuroni pare si debba gran parte della lunghezza degli assoni e dei dendriti, perché si trovano sulle loro estremità. Il loro ruolo sembrerebbe consistere nel controllo della forza di connessione fra i neuroni. Anche se l'attività dei neuroni del cervello sembra assomigliare a quella di un computer, si tratterebbe allora di un computer in cui i collegamenti fra i fili sono costantemente modificati da una struttura di controllo di livello più profondo: questa dovrebbe essere simile ai microtubuli presenti all'interno dei neuroni.

Questa azione consiste soprattutto nel trasporto dei neurotrasmettitori lungo gli assoni, e nella crescita di dendriti. Le molecole dei neurotrasmettitori, che viaggiano lungo i microtubuli, sono d'importanza critica per il comportamento delle sinapsi, la cui forza può essere perciò cambiata dall'azione di queste strutture. Inoltre Hameroff e i suoi colleghi ritengono che lungo l'esterno dei microcondotti si svolga un'azione di tipo computazionale.

I tubuli sono costituiti da spirali strettamente interconnesse formate da una proteina chiamata tubulina: ogni molecola di tubulina può avere due stati di polarizzazione elettrica, che possiamo definire 1 e 0 come nel sistema binario, il che rende possibile descrivere in modo computazionale i modelli formati dalle proteine lungo i microtubuli.

Trovo questa idea molto stimolante. Possiamo infatti ipotizzare che ogni microtubulo sia un computer che agisce però a livello molto più profondo dei neuroni. Esistono molti più tubuli che neuroni: essi costituiscono un luogo plausibile dove potrebbe avvenire un'attività di fluttuazione quantistica isolata dall'esterno. A questo livello diventa possibile applicare la meccanica quantistica al funzionamento del cervello, mentre non sarebbe possibile ipotizzare un computer quantistico costituito da normali segnali nervosi, poiché sarebbe troppo grande e disorganizzato. I segnali nervosi infatti disturberebbero tutto il resto del materiale cerebrale, distruggendone molto in fretta la coerenza interna.

Nella mia visione è necessario prevedere nei microtubuli questa attività a livello quantistico, abbinata all'attività computazionale identificata in essi da Hameroff: solo così, infatti, si potrebbe prevedere un trasferimento di informazioni non solo da un microtubulo all'altro, ma da una cellula nervosa all'altra, attraverso ampie zone del cervello.

Esistono varie possibilità di sviluppo per queste ricerche. In fisica sono stati da poco avviati esperimenti per mettere alla prova possibili modifiche della meccanica quantistica. Ma non credo che nessuno abbia per ora intenzione di sperimentare le mie idee, che richiederebbero esperimenti molto complicati.

In biologia, invece, occorre organizzare esperimenti sui microtubuli, per verificare l'ipotesi di effetti quantistici coerenti su larga scala. E per effetti quantistici su larga scala intendo qualcosa di simile alla superconduttività, o alla superfluidità.

nicholas humphrey Bravo Roger Penrose, che almeno ci ha provato, e il suo è

stato un buon tentativo. Secondo lui le capacità del cervello umano vanno oltre quelle della macchina, dato che la nostra mente è in grado di riconoscere la verità o la falsità di affermazioni che sono per principio non calcolabili. Ma gli esempi che porta non mi colpiscono molto. Naturalmente le persone possono compiere azioni molto intelligenti e creative di cui non si comprende ancora la natura: ci sfugge ancora il segreto della scrittura di Shakespeare, della pittura di Picasso, della matematica di Hawking, ma non credo che esista alcun parallelo fra queste gesta sbalorditive e l'assunto del teorema di Gödel.

Penrose ha una teoria interessante, e va in cerca di qualcosa a cui applicarla. Ma io non credo che occorra un punto di vista così nuovo e radicale per spiegare l'intelligenza e la creatività umana.

steve jones Penrose è molto stimato dai matematici e io sarei lietissimo di lavorare con lui. Le sue teorie mi interessano soprattutto dal punto di vista estetico.

Prendiamo il pavimento di un bagno: ci sono tanti modi per rivestirlo, con semplici piastrelle quadrate tutte uguali, oppure tempestandolo di brillanti. Oltre a questi due estremi, si possono usare piastrelle di forme infinite, ma perfettamente coerenti dal punto di vista matematico, che sono in grado di riempire uno spazio soddisfacendo sia la scienza sia il senso estetico. Perciò certi sforzi non vanno mai snobbati; come ha fatto Francis Crick, che nella sua autobiografia racconta di aver visto Penrose e suo padre, negli anni Cinquanta, cercare di riprodurre con goffe sagome di legno i meccanismi di replicazione del dna. Forse dal punto di vista del dna era davvero una perdita di tempo, come dice Crick; in compenso i Penrose stavano scoprendo una nuova branca della matematica.

steven pinker Nel suo *La mente nuova dell'imperatore*, Penrose dice di non credere che la mente umana possa discendere dall'evoluzione. Si tratta chiaramente di un'intuizione personale, più che di un'affermazione meditata. Non è raro trovare scienziati scettici sulla selezione naturale di Darwin. Si tratta infatti di una spiegazione troppo macchinosa, di una variazione casuale di tipo stocastico da cui deriva una selezione per utilità, che ripugna associare a qualcosa di bello. Per un fisico, o un matematico, o qualcuno come Noam Chomsky, il cui lavoro è stato spesso di tipo matematico, la teoria migliore è quella in cui la conclusione deriva da un certo gruppo di premesse, secondo un elegante sistema deduttivo. Per il loro senso estetico molto sviluppato, la selezione naturale è sempre un meccanismo debole e volgare.

francisco varela Roger Penrose mi sembra il classico fisico che si crede investito dell'autorità di parlare su tutto e di tutto. Ma fra la computabilità ideale di Turing e la meccanica quantistica viene a mancare qualcosa di fondamentale: il corpo, che è appunto ciò che Penrose non prende nemmeno in considerazione. Mi sembra incredibile che queste teorie provengano da un fisico matematico così famoso: come nella favola, direi che il re-Penrose è nudo.

Trovo che la stessa supponenza sia tipica di alcuni fisici, in particolare dei fisici matematici, e mi pare che tale caratteristica emerga anche fra i ricercatori del Santa Fé Institute, incluso Gell-Mann. Ecco forse perché molti biologi soffrono di una specie di invidia della fisica. Invidiano questa ipersicurezza.

Se avessi l'occasione di incontrare Penrose, lo sfiderei a darmi anche solo un frammento di prova della rilevanza dei processi quantistici per la descrizione del cervello. Queste prove infatti non esistono, come non esistono quelle della psicocinesi o degli ufo. Si possono soltanto invocare vaghi indizi: ma nulla di chiaramente

dimostrabile.

Dall'altra parte, stanno emergendo dalla neurobiologia e dalla neuropsicologia molti elementi che militano a favore di un'interpretazione non computazionale del cervello. Fino a questo punto sono d'accordo con Penrose, il quale improvvisamente compie questo buffo salto nel vuoto, invocando la quantistica. Qui non lo seguo più.

w. daniel hillis Da fastidio che qualcuno così bravo in matematica strumentalizzi la sua credibilità per dare peso a quelle che sono soltanto sue speculazioni. Penrose parla bene, ma racconta una storia sbagliata. E il suo errore è quello classico di mettere gli esseri umani al centro dell'universo. Egli arriva a sostenere che la complessità della nostra mente si può spiegare solo grazie ad un magico elisir derivante da qualche nuovo principio della fisica di là da venire. Penrose cade così nella trappola della sua stessa immaginazione.

Il fisico di Oxford ha preso un'idea perfettamente plausibile, quella della non computabilità, e l'ha confusa con quel comportamento complesso dell'uomo che non è in grado di spiegare. Certamente esistono cose inspiegabili e non calcolabili, ma non è detto che a esse appartenga il comportamento umano che invece, secondo me, è solo molto, molto difficile da spiegare. Penrose assomiglia ai vitalisti che, non volendo ammettere che la vita è un fenomeno chimico, devono per forza trovare un principio diverso. Allo stesso modo, per Penrose la connessione fra i neuroni e il pensiero umano deve consistere in qualcosa che va oltre la nostra attuale comprensione. Un perfetto equivalente, dunque, del principio vitalista. La sua tesi sta tutta qui.

Richard dawkins Chiaramente Roger Penrose è dotato di un'intelligenza poderosa. Io non conosco abbastanza la fisica quantistica per criticare la sua teoria della mente, ma sono sempre diffidente nei confronti di idee come le sue.

daniel c. dennett Roger Penrose. Se non esistesse, Dio dovrebbe inventarlo, com'è stato detto a proposito di Voltaire. Penrose infatti interpreta al meglio un ruolo necessario: quello di chi ha torto.

Roger afferma di aver provato un rifiuto istintivo nei confronti dell'intelligenza artificiale, ed è partito in quarta per attaccarla. In fondo ciò che ha fatto rappresenta il miglior complimento per i suoi nemici, perché per smentire l'intelligenza artificiale Penrose arriva a negare la selezione naturale, e a scatenare in fisica una specie di terremoto.

L'intelligenza artificiale, infatti, non è altro che un'estrapolazione molto conservatrice di ciò che conosciamo oggi e Penrose chiarisce questo punto meglio di chiunque altro.

Il computer quantistico di Roger è un gancio che scende dal cielo o una gru? La gru non è un miracolo, ma obbedisce ai buoni vecchi principi della meccanica. Il gancio dal cielo invece o è un miracolo, o richiede una rivoluzione della fisica, ed è ciò che Penrose sta cercando disperatamente di inventare. Per lui il cervello è una sorta di macchina che non si può chiamare macchina, perché in esso agiscono fenomeni quantistici. La maggior parte dei biologi invece credono che gli effetti quantistici nel cervello siano completamente irrilevanti.

Certamente essi esistono nel cervello, come nelle auto, negli orologi, nei computer. Ma la maggior parte degli oggetti macroscopici non amplificano, né tantomeno si basano su effetti quantistici: semplicemente li ignorano. Secondo Roger, invece, il cervello in qualche modo li sfrutta.

Perché ne è convinto? Forse perché esistono prove empiriche che il cervello è un computer quantistico? E da dove provengono queste prove? Io credo che per lui questa evidenza possa provenire solo dalla matematica. Adesso sta collaborando con Stuart Hameroff dell'Università dell'Arizona, che sostiene che i microtubuli dei neuroni sono gli amplificatori degli effetti quantistici.

La fisica permette questa ipotesi; probabilmente occorre dare ragione a Roger almeno su questo punto. Ma da qui a spiegare come questi effetti possano essere impiegati da qualche tipo di computer quantistico, il passo è molto lungo. Se mai Penrose ci riuscirà, dovremo certamente prestargli attenzione.

alan guth Roger Penrose è noto per i suoi lavori sulla teoria classica della relatività. Al mondo ci sono pochi fisici della relatività: non ce n'è nessuno al MIT, e neanche ad Harvard; c'è Robert Wald all'Università di Chicago, Kip Thorne al Caltech, Penrose a Oxford, Rovelli all'Università di Pittsburgh, Ashtekar e Smolin all'Università della Pennsylvania. Anche Stephen Hawking, come Penrose, è diventato famoso con la relatività classica generale, nonostante si sia recentemente occupato di altri argomenti.

Penrose e Hawking hanno scoperto la maggior parte dei teoremi fondamentali che conosciamo sul comportamento generale delle equazioni di Einstein. Si tratta di problemi matematici, dato che la teoria della relatività generale di Einstein è rimasta immutata nei suoi principi fondamentali fin dalla sua scoperta, nel 1916. Ma le equazioni di relatività generale sono assai complicate, e le implicazioni della teoria non sono certo facili da dedurre.

Per esempio, Penrose e Hawking si sono posti il problema di cosa avviene quando la materia collassa sotto un'altissima forza gravitazionale. Fin dalla metà degli anni Sessanta era noto che la materia può collassare formando un buco nero, un ammasso di materia dotato di una forza gravitazionale così alta che nemmeno la luce è in grado di sfuggirle. Per arrivare ai buchi neri occorre però un passaggio davvero speciale: un'assunzione di simmetria, cioè di forma perfettamente sferica della materia che collassa. Solo così si possono risolvere le equazioni calcolando esattamente come la materia collassa, e provare che si forma un buco nero. Se invece la materia ha una forma diversa, non si può prevedere con certezza il buco nero.

Poiché nessuno si aspetta una distribuzione perfettamente sferica della materia nell'universo reale, si trattava di un'obiezione importante; e furono proprio Hawking e Penrose a sviluppare i teoremi che provano che in certe condizioni si forma necessariamente un buco nero, anche se non sono riusciti a risolvere le equazioni per il collasso non sferico.

Questo è stato il principale contributo di Penrose: gli stessi teoremi si applicano alla questione della singolarità iniziale dell'universo. Nel modello del big bang, infatti, si ipotizza un universo perfettamente simmetrico, omogeneo e di densità di massa uniforme. Naturalmente l'universo reale non ha queste caratteristiche, ma occorre idealizzarlo per formulare equazioni abbastanza semplici e risolvibili. Quando si applicano queste equazioni a ritroso nel tempo, si trova quella che viene chiamata singolarità: un istante in cui la densità di massa e la temperatura dell'universo sono letteralmente infinite.

Ecco cos'è la singolarità iniziale. Anche in questo caso ci si deve chiedere che cosa succede se si complicano le equazioni inserendo in esse le complessità dell'universo reale, con le non uniformità di massa che hanno formato le galassie. Ovviamente le equazioni diventano troppo complicate da risolvere, quindi occorre trovare teoremi generali che spiegano il comportamento di queste equazioni, indipendentemente dai loro dettagli. Anche in questa occasione sono stati Hawking e Penrose a provare i

teoremi che, se l'universo assomiglia a quello che noi vediamo e lo si segue all'indietro nel tempo, garantiscono di trovare la singolarità.

lee smolin Dopo Einstein, Roger Penrose è il fisico più importante e creativo che abbia lavorato sulla relatività: dobbiamo a lui la maggior parte delle nuove idee del settore. È una delle rare persone che considero un genio, senza riserve. Roger ha sempre qualcosa di originale da dire su qualsiasi argomento gli si sottoponga.

Roger ha cominciato a interessarsi di relatività partendo da un certo scetticismo nei confronti della meccanica quantistica, dove aveva svolto le sue prime ricerche. Si era occupato di variabili nascoste, del teorema di Bell, del paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen e aveva cercato di provare il teorema dei quattro colori. Ma chi lo avviò alla relatività generale fu il fisico teorico americano David Finkelstein.

Finkelstein tenne una conferenza a Londra sulla sua idea di come la topologia dello spazio-tempo potrebbe essere diversa all'interno dei buchi neri. La topologia è la scienza delle relazioni e della connessione a livello puro, senza far riferimento a misure "reali" come la distanza, e David era uno dei pochi che aveva pensato di applicare le idee della topologia alla geometria dello spazio e del tempo. Anche Roger è un topologo, in possesso di un dottorato in matematica e topologia algebrica: con i suoi "reticoli di spin", allora stava cercando di costruire lo spazio e il tempo a partire da piccoli elementi discreti a carattere puramente quantico.

Egli è sempre stato convinto - come molti altri, d'altronde - che lo spazio e il tempo non sono continui, e che la continuità è un'illusione che deriva dall'osservazione dei fenomeni su grande scala. Perciò Roger aveva cominciato a costruire modelli per spiegare che la geometria dello spazio può derivare da piccoli atomi di geometria, e li aveva battezzati "reticoli di spin": si tratta di una costruzione profondamente matematica, che recentemente è ritornata al centro dell'attenzione di molti scienziati.

Quando Roger incontrò finalmente Finkelstein a Londra, gli parlò dei famosi reticoli e praticamente si scambiarono di posto. David infatti ritornò negli Stati Uniti e da allora si dedicò alla costruzione di modelli di spazio e tempo intesi come processi discreti. Roger cominciò invece a pensare di applicare le idee topologiche alla geometria dello spazio-tempo.

Dopo aver inventato i "reticoli di spin", Roger non riuscì però a trasformarli in modelli spaziotemporali che riescono a incorporare la teoria della relatività. Questo tentativo, che lo impegna fin dagli anni Sessanta, si chiama teoria dei "twistor". Esso costituisce il motivo dell'isolamento di Roger rispetto agli altri fisici delle particelle. Si tratta del tentativo di formulare una nuova e completa teoria fisica, in grado di conciliare la meccanica quantistica con la teoria della relatività.

Ecco una definizione concisa della teoria dei "twistor". Quando osserviamo il mondo, crediamo che certi suoi punti, cioè le cose che esistono nello spazio, siano fondamentali e che il tempo sia qualcosa che accade loro. Riteniamo fondamentali le cose che esistono e di importanza secondaria i processi attraverso i quali esse cambiano nel tempo. Nella teoria dei "twistor", invece, i termini si rovesciano: diventano infatti fondamentali i processi, e secondari gli eventi, che esistono nel tempo e nello spazio solo come punti d'incontro e di interazione dei processi. L'idea è quella di formulare le leggi fisiche nello spazio dei processi, e non nello spazio e nel tempo come li intendiamo di solito, che emergono solo a un livello successivo.

La teoria dei "twistor" è una bellissima entità matematica. Roger, insieme ad alcuni suoi studenti, ha compiuto sforzi enormi per cercare di fondare su di essa una teoria fondamentale della fisica. Ma il problema è arduo, e nonostante Roger sia un genio, la teoria è ancora incompleta. Non conosciamo ancora il suo potenziale di

sviluppo, ma certo è qualcosa che solo una persona come lui può aver creato.

Roger è sempre stato scettico sulla meccanica quantistica e sulla necessità di una nuova teoria dinamica della geometria dello spazio-tempo. Secondo questa scuola, la relatività generale deve essere riformata sulla base delle teorie della gravità supersimmetrica e delle stringhe. Invece secondo Roger la gravità è importante per comprendere gli enigmi della meccanica quantistica: è quest'ultima che deve essere modificata per fare posto agli effetti della gravità, non viceversa.

Tutte le idee di Roger sono coerenti fra loro: da quelle tecniche della teoria dei "twistor" alle sue convinzioni filosofiche, all'interpretazione della meccanica quantistica, a quella della mente e del cervello umano. Ma nonostante sia lo scienziato più influente nel campo della teoria della relatività, quello che ha realizzato rappresenta solo un pallido riflesso delle sue ambizioni.

murray gell-mann Non conosco bene Roger Penrose. Credo che abbiamo frequentato negli stessi anni l'Imperial College di Londra, quindi ci siamo sicuramente incontrati, ma non mi ricordo di lui. So che ha avuto una brillante carriera nel campo della fisica matematica, ma le idee dei suoi ultimi libri per il grande pubblico mi sembrano molto strane.

Secondo me la consapevolezza di sé, cioè la coscienza, costituisce una proprietà come l'intelligenza, che si può evolvere in sistemi complessi adattativi quando raggiungono un certo livello di complessità. E mi immagino che grazie a questi fenomeni, l'intelligenza e la coscienza si siano evolute su molti pianeti dell'universo. Infatti anche i livelli umani di queste facoltà, di cui andiamo tanto fieri, non sono poi così impressionanti su scala cosmica, sebbene superino quelle delle altre specie terrestri. Non mi sento di escludere che noi uomini potremo un giorno produrre computer dotati di un ragionevole grado di autoconsapevolezza. Penrose sembra attribuire qualità mistiche a tale coscienza, e certamente non è l'unico. Ma nella sua proposta, per come l'ho capita io, la coscienza viene posta in relazione con la gravità quantistica, frutto della combinazione di teoria dei quanti e relatività generale. Ebbene, non vedo alcuna ragione per immaginare qualcosa di simile. Tanto più che oggi la teoria delle super-stringhe si propone come una brillante soluzione per una teoria unificante di tutte le particelle elementari, gravitone incluso, e delle loro interazioni. Questa teoria porta, con un'accettabile approssimazione, ad accordare la relatività di Einstein con la fisica quantistica, evitando tutti i terribili problemi degli infiniti che costellavano i tentativi precedenti. Un giorno sapremo se la teoria delle superstringhe può essere supportata da osservazioni, per esempio con esperimenti effettuati con un nuovo acceleratore ad alte energie. Comunque, non vedo il motivo di trastullarsi con speculazioni mistiche sulla gravità quantistica.

Marvin minsky Mi sembra che Penrose assuma come presupposto quello che sta cercando di provare. Sostiene che gli esseri umani possono fare cose non accessibili ai computer, com'è stato provato matematicamente. In particolare, si riferisce alla capacità umana di risolvere "intuitivamente" certi problemi non risolvibili dalle macchine, come il test di Turing o il teorema di Gödel. Purtroppo per Penrose, questi problemi sono irrisolvibili solo nel senso che nessun programma di computer li può affrontare "senza sbagliare mai". Di fatto non esiste alcuna prova che non possa esistere un programma di computer dotato di intuizione, cioè di una capacità di indovinare, pari a quella dei matematici umani. Non c'è motivo di ritenere, come fa Penrose, che sia le menti umane sia i calcolatori debbano essere sempre perfettamente logici: come ha dimostrato lo psicologo infantile Jean Piaget, il ragionamento logico è una facoltà raffinata che si sviluppa tardi nell'uomo, se si sviluppa. Forse Penrose non sa che è facile scrivere programmi per il computer basati su gruppi di assiomi

inconsistenti: basta applicare a essi una logica occasionalmente difettosa. Perciò Penrose non ha prove per affermare che nessun computer è in grado di pensare in modo simile a un essere umano. Il suo è tutto fumo, di cui il lettore acuto si avvede facilmente.

roger schank Roger Penrose è l'autore di un libro scandaloso sull'intelligenza artificiale. È ben triste che la gente scriva di argomenti che non conosce. Se poi sei un fisico famoso, ti credi in diritto di fare commenti che esulano dal tuo settore di competenza. Un modo classico per attaccare l'intelligenza artificiale trae spunto dal teorema di Gödel. Esso riguarda il numero di calcoli che si possono fare in un tempo determinato: la "prova" consisterebbe nel fatto che la macchina, per risolvere certi problemi in un certo modo, quindi per pensare, dovrebbe compiere un numero di calcoli eccessivo. Ma c'è un errore di base, che consiste nel confondere certi tipi di calcoli con quelli che si crede vengano effettuati dal pensiero. Si tratta infatti molto probabilmente di assunzioni sbagliate, come sembra provare tutto ciò che conosciamo a proposito del pensiero umano. In definitiva, tutti questi attacchi dimostrano solo ignoranza da parte di chi li scatena. Come Penrose, che a proposito di intelligenza artificiale non dice nulla di particolarmente interessante.

Parte terza

Il problema delle origini

In un certo senso sensori fisici sembrano essere capitati in questo libro per errore. È interessante notare come abbiano poco da dire sugli altri scienziati presentati nell'opera, i quali a loro volta non spendono molti commenti su di loro. Questo può essere spiegato col fatto che il linguaggio della fisica è la matematica, ma può anche darsi che ciò sia dovuto alla diversa rilevanza che i concetti di complessità ed evoluzione hanno in biologia e in informatica rispetto alla cosmologia e alla fisica. Gli astronomi hanno studiato lo spettro della luce emessa da stelle miliardi di anni fa e non hanno trovato nessun indizio di una mutazione delle leggi fisiche nel corso del tempo.

La cosmologia, che si è costituita come scienza autonoma solo trent'anni fa, ha fra gli altri scopi quello di stabilire i parametri dell'universo: la velocità con cui si espande, la sua massa, la natura della sua "materia oscura". Oggi i cosmologi si avventurano anche in speculazioni di più ampio respiro: per esempio come ha avuto origine l'universo e in che modo è giunto a organizzarsi in questa struttura. Ma mentre alcuni si domandano se le leggi della fisica possano spiegare la nascita dell'universo, l'origine stessa delle leggi è una questione così insondabile che pochi hanno provato ad affrontarla. Potrebbero entrare in gioco anche in questo ambito i principi della complessità adattativa? Esiste la possibilità che l'universo si sia autorganizzato? E il

"principio antropico" - secondo cui l'esistenza di osservatori intelligenti come noi avrebbe un ruolo nell'esistenza dell'universo - può essere utile alla cosmologia?

La fisica delle particelle, da parte sua, è un campo che ha risentito negativamente del suo stesso successo. Le scoperte fondamentali compiute negli anni Sessanta e Settanta hanno portato allo sviluppo del modello standard, una teoria che sembra accordarsi con tutti gli esperimenti di fisica delle particelle condotti fino a oggi. Eppure questo modello è troppo complicato per essere considerato l'ultima parola sulla natura; inoltre non è in grado di fornire una descrizione quantistica della gravitazione. Nel tentativo di superare il modello standard i fisici delle particelle sono alla ricerca di una "teoria del tutto". Il suo scopo è quello di unificare le quattro forze fondamentali della natura - l'elettromagnetismo, l'interazione forte, l'interazione debole e la gravitazione - in una teoria onnicomprensiva. Dopo aver portato a buon fine questa impresa riduzionista, non sarebbe necessario spingersi oltre: l'unificazione delle prime tre forze è già in vista, mentre per la quarta, la gravitazione, le difficoltà sono ancora insuperabili. Questo per quanto riguarda la fisica tradizionale. E interessante notare come il suo rappresentante più eclettico, il premio Nobel Murray Gell-Mann, sia all'avanguardia nello studio dei sistemi complessi adattativi.

L'astrofisico Martin Rees - noto più per la sua visione generale delle questioni-chiave della cosmologia che per scoperte specifiche - è il protagonista indiscusso del dibattito contemporaneo. Attualmente sta considerando la possibilità di universi multipli e di come avvalersi delle forma debole del principio antropico (che nella versione forte ha implicazioni decisamente religiose) per chiarire alcuni importanti temi cosmologici. Ha elaborato inoltre ipotesi interessanti sulla formazione di stelle e galassie, sui buchi neri e sulle caratteristiche dell'universo nella sua fase iniziale. Una riflessione di particolare importanza riguarda poi la natura di quella materia oscura che sembra riempire lo spazio intergalattico, poiché sarebbe la forza gravitazionale esercitata da questa materia che deciderà se il nostro universo è destinato a espandersi in eterno o a collassare su se stesso. Rees ha dimostrato anche un interesse spiccato per gli aspetti più filosofici della cosmologia, cercando di rispondere a domande del tipo: perché l'universo ha sviluppato condizioni specifiche che hanno consentito l'evoluzione di forme di vita? Esistono anche altri universi, governati da leggi fisiche completamente diverse?

Nato come fisico delle particelle, Alan Guth ha dato forse il contributo più importante agli studi cosmologici dell'ultima generazione con la teoria inflazionaria. Nel suo modello, l'universo dei primi istanti sarebbe entrato in un periodo di rapida espansione; questo spiegherebbe, fra le altre stranezze della teoria del big bang, come mai l'universo odierno è così sorprendentemente omogeneo.

Guth ama dipingersi come uno scienziato naïf, a dispetto del carattere speculativo del suo lavoro. In questi anni si occupa di una questione a prima vista bizzarra, se cioè sia possibile viaggiare attraverso il tempo in virtù dei tunnel (detti anche "gallerie di tarlo", dall'inglese *wormholes*, *n.d.t.*) presenti nella tessitura dello spazio. In realtà Guth non crede che ciò sia possibile, ma la cosa che lo affascina è che le leggi della fisica non possono nemmeno escludere questa eventualità romanzesca.

Il fisico teorico Lee Smolin s'interessa alla questione della gravitazione quantistica; cerca, in altre parole, di conciliare la teoria dei quanti con la relatività generale di Einstein, così da ottenere una visione coerente dello spazio-tempo. Fra i suoi progetti, c'è anche quello di elaborare una teoria generale dell'evoluzione dell'universo, secondo le leggi della selezione naturale.

Un altro fisico presente in questo libro è Paul Davies, che si occupa soprattutto di cosmologia, gravitazione e teoria quantistica, con una predilezione per i buchi neri e la questione dell'origine dell'universo. Formidabile divulgatore scientifico, Davies ha scritto una dozzina di opere di grande successo. Qui presenta una sorta di agenda

antiriduzionista che sintetizza in un unico sistema fisica e biologia, sotto il segno dei sistemi complessi. Secondo lui gli scienziati di queste due discipline dovrebbero lavorare assieme, partendo dalla constatazione che i sistemi complessi, siano essi biologici o cosmologici, non possono essere ricondotti alla somma delle loro parti, ma rispondono a specifiche leggi. Tutte da scoprire.

15. Martin Rees

Un insieme di universi

Martin Rees è astrofisico e cosmologo. Research Professor alla Royal Society del King's College, a Cambridge, ha scritto *Our Home Universe* (in stampa) e, con John Gribbin, *Cosmic Coincidences: Dark Matter, Mankind, and Anthropic Cosmology* (1989).

Il pubblico è sempre molto interessato alle questioni fondamentali delle origini, che si parli di dinosauri o di cosmologia. È significativo notare come gli argomenti che affascinano di più i lettori sono spesso distanti anni luce dalle preoccupazioni della vita quotidiana. Chi sostiene che dovremmo rendere il nostro lavoro più "attuale" per attrarre l'interesse del pubblico si sbaglia, perché niente può essere meno attuale dei dinosauri e della cosmologia.

La mia disciplina piace perché tocca aspetti fondamentali e questo è un momento molto propizio per questo genere di argomenti. Per la prima volta, la cosmologia, che indaga le origini dell'universo, è entrata a far parte della scienza ufficiale: finalmente possiamo chiederci com'era l'universo dopo un secondo di vita, o anche prima, senza esser presi per folli. Possiamo, insomma, porci le domande fondamentali. Questa è davvero un'epoca molto interessante ed eccitante per la scienza del cosmo.

Se dovessi definirmi, direi che sono un astrofisico e un cosmologo. L'astrofisico studia oggetti singoli, come le galassie, i quasar, le stelle e la loro evoluzione, mentre il cosmologo è più interessato all'universo nel suo complesso che al suo contenuto: ovviamente le due discipline sono strettamente legate fra loro. Devo confessare che la matematica non è il mio forte. Nel mio lavoro cerco quindi di spiegare i fenomeni, ma non costruisco complessi sistemi deduttivi.

Quando ho cominciato, la cosmologia era essenzialmente una scienza teorica, perché non poteva avvalersi di dati. Solo intorno agli anni Sessanta abbiamo cominciato a sapere qualcosa in più del mero fatto che l'universo si sta espandendo. Da allora gli sviluppi della conoscenza sono stati impressionanti, al punto che oggi possiamo descrivere in termini quantitativi le prime fasi dell'universo, e possiamo discutere su molti più argomenti di un tempo. Ciò che in passato era pura speculazione, oggi è scienza genuina.

Non ho voluto impegnarmi su un singolo tema; ho cercato piuttosto di riflettere sulla cosmologia a tutto campo, e sono stato fortunato, perché la materia si presta bene a una considerazione di tipo sintetico. Così io e i miei colleghi abbiamo passato il tempo a raccogliere i dati provenienti dai telescopi, dai radiotelescopi e dalle missioni spaziali e li abbiamo messi insieme, cercando di interpretarli in un quadro unitario. È come chiedere a un ingegnere di fare un progetto che risponda a certi requisiti: la

natura ha dato le specifiche e noi utilizziamo le leggi della fisica per vedere se la cosa funziona, se cioè riusciamo a spiegare i fenomeni.

Tuttavia va considerata la fastidiosa ipotesi che le attuali leggi della fisica non siano quelle giuste per fare questo lavoro. Come se non bastasse, questa è una complicazione in più, nella quale preferisco non inoltrarmi qui. La prima ragione per studiare astronomia e cosmologia è il puro gusto dell'esplorazione, per vedere cosa diavolo c'è fuori dal nostro piccolo mondo. La seconda molla, che scatta nella testa degli astronomi di professione, è il bisogno di comprendere come si è evoluto l'universo, come cioè si è passati dalla semplicità primordiale alla complessità attuale. C'è poi un terzo motivo che rende interessante la cosmologia: l'universo è infatti un immenso laboratorio che ci consente di verificare le leggi naturali in condizioni molto più estreme di quelle riproducibili in un laboratorio terrestre, e quindi di estendere la nostra conoscenza dei meccanismi fondamentali della natura.

Un'altra cosa che m'interessa è la particolare psicologia dei ricercatori. Succede infatti che molti si affezionino a tal punto alle loro teorie che finiscono per difenderle come avvocati, contro ogni evidenza contraria. Rinunciare a una teoria può essere per loro molto doloroso. Io non mi affeziono. Sono anzi molto contento di lavorare nello stesso tempo a due ipotesi opposte, un metodo che mi sembra ottimale quando non sappiamo come spiegare un fenomeno.

Può darsi che una ricerca porti a una nuova prova o a una nuova contraddizione. Presa nel suo insieme, la comunità scientifica lavora in questo modo, ma non tutti i ricercatori sono disponibili quanto lo sono io a lavorare contemporaneamente su due teorie differenti.

Gran parte del mio lavoro consiste nel cercare di comprendere gli aspetti più paradossali dell'universo, come i buchi neri, le esplosioni di energia e via dicendo. Ho ottenuto buoni risultati sui quasar e sui centri delle galassie: temi caratteristici dell'astrofisica delle alte energie. Negli ultimi dieci anni, mi sono sempre più interessato a ciò che si potrebbe chiamare cosmogonia. Oggi infatti è possibile occuparsi non solo della struttura dell'universo attuale osservando le galassie più vicine, ma anche dell'universo nei suoi primi istanti scrutando le sue parti più remote; in questo modo siamo in grado di ricostruire l'aspetto dell'universo quando le galassie erano in via di formazione, o addirittura quando ancora dovevano formarsi.

Attualmente sto studiando come si sono formate le galassie e gli ammassi di galassie, la natura della materia oscura e se la materia contenuta nell'universo è sufficiente a determinare un futuro collasso o se invece continuerà a espandersi per sempre. Le risposte a queste domande mancano ancora, ma è prevedibile che nei prossimi dieci anni raggiungeremo un accordo su alcuni di questi argomenti. Credo, ad esempio, che così come abbiamo capito come si formano le stelle, riusciremo anche a chiarire come si formano le galassie, e spero che scopriremo anche che cos'è la materia oscura. In effetti è piuttosto imbarazzante ammettere che non sappiamo di cosa è fatto il 90 per cento di ciò che costituisce l'universo. Questo cosiddetto materiale mancante potrebbe essere composto di stelle deboli, particelle esotiche o buchi neri. Ovviamente non potremo conoscere le galassie fino a quando non avremo svelato il mistero che ancora circonda il 90 per cento della loro massa.

Abbiamo buone ragioni per credere che nell'universo vi sia un sacco di roba che non riusciamo a vedere, ma che esercita una forza gravitazionale. Lo prova il comportamento delle galassie a forma di disco che girano su se stesse, come la Via Lattea. Se si osservano le parti più distanti dal centro di queste galassie, si rileva uno strato gassoso che orbita in modo sorprendentemente rapido, più di quanto possa giustificare l'attrazione gravitazionale delle stelle che lo circondano. Da ciò si deduce l'esistenza di una grande quantità di materia oscura che tiene insieme queste galassie. Altre prove giungono dagli effetti di lente gravitazionale e dai movimenti interni degli

ammassi galattici. La materia oscura, sulla cui natura regna ancora la più totale incertezza, dovrebbe esercitare una forza gravitazionale dieci volte superiore a quella della materia visibile. E poiché il processo cosmogonico - da cui trae origine la struttura dell'universo - dipende dalla gravità, noi non potremo capire come si formano le galassie finché non avremo chiarito l'enigma della materia oscura.

Se dovessi spiegare in breve cosa sto tentando di fare, insieme ai miei colleghi che si occupano di cosmologia e cosmogonia, direi che voglio comprendere come si è evoluto l'universo - negli ultimi quindici miliardi di anni - da una palla di fuoco calda, compressa e amorfa, alla sua configurazione attuale, in cui vediamo galassie, stelle e pianeti caratterizzati da una grande complessità. La cosa difficile è ricostruire una dopo l'altra le tappe di questa evoluzione, che attraverso successive condensazioni ha portato alla formazione delle stelle, degli elementi chimici, dei pianeti e infine di creature così complesse da potersi porre la questione dell'origine.

È davvero incredibile che noi possiamo porci queste domande. In un certo senso l'universo ci ha dato una mano, poiché esso è molto più semplice di quanto potremmo aspettarci. È semplice in due sensi. In primo luogo, la sua struttura generale è uniforme e simmetrica, contrariamente a quanto avviene su scala galattica, dove le disomogeneità non mancano. Ogni pezzo dell'universo si è evoluto allo stesso modo, intendendo per "pezzo" una "casella" grande alcune centinaia di milioni di anni luce. Esso dunque è liscio e omogeneo: così, quando osserviamo parti del cosmo lontane da noi, siamo sicuri che laggiù ci sono le stesse condizioni che si sono verificate qui molto tempo fa. Quale che sia la regione dell'universo considerata, fa parte della stessa storia.

In secondo luogo, le leggi della fisica sono valide ovunque. Quando analizziamo lo spettro della luce emessa da un quasar molto distante, ritroviamo gli atomi che ci sono famigliari; ne consegue che le leggi scoperte nei nostri laboratori possono essere applicate a ogni regione dello spazio osservabile, fino al momento in cui l'universo non aveva che un microsecondo di vita. Prima di quel microsecondo, le densità, le pressioni e le energie erano così elevate da mettere in discussione la tenuta delle leggi fisiche. Ma da quel momento in poi i parametri dell'universo in espansione sono compatibili con quelli che possiamo riprodurre in laboratorio.

Tuttavia, anche ragionare sul primo microsecondo di vita può far progredire la fisica ben al di là dei limiti imposti dalle condizioni di laboratorio. Persino nei più potenti acceleratori di particelle, infatti, non possiamo ottenere le energie che le particelle possedevano all'inizio dei tempi. Inoltre, senza sapere cosa è avvenuto nel primo microsecondo non è possibile capire perché l'universo si è espanso in un certo modo, perché la sua struttura è semplice e simmetrica e perché c'è in esso quel particolare rapporto fra materia e radiazione.

La radiazione di fondo a microonde, scoperta nel 1965 da Arno Penzias e Robert Wilson, fu il più grande progresso in cosmologia dalla fine degli anni Venti, quando Edwin Hubble stabilì che l'universo si stava espandendo. La scoperta di Hubble pareva suggerire che prima di espandersi l'universo fosse in una fase di compressione; questa supposizione non poteva però essere provata. Tanto è vero che la teoria dell'universo stazionario, elaborata da certi petulanti astronomi inglesi, negava l'esistenza di questa fase e della successiva espansione. Con la scoperta della radiazione di fondo si ebbe la prova che il cosmo doveva essere passato attraverso uno stadio iniziale caratterizzato da temperature e densità elevatissime. Dopo di allora quasi tutti i cosmologi abbracciarono la nuova teoria, più o meno con la stessa rapidità con cui i geologi optarono per la deriva dei continenti, un'altra teoria squisitamente speculativa che solo in seguito trovò una conferma sperimentale. A metà degli anni Sessanta, la teoria del big bang si era ormai imposta, e la radiazione cosmica di fondo, ora raffreddata a 2,7 gradi sopra lo zero assoluto, poteva essere vista come la testimonianza fossile di

quella esplosione primordiale.

Dal 1965 sono state effettuate misurazioni sempre più accurate dello spettro di questa radiazione e della sua distribuzione angolare nella volta celeste. Fu allora che si fecero due scoperte cruciali. Circa vent'anni fa, l'astrofisico George Smoot riuscì a misurare il nostro movimento in relazione all'universo osservando che la radiazione fossile, invece di avere sempre la stessa temperatura nello spazio a noi circostante, era leggermente più calda in una direzione che in quella opposta. Questo è dovuto al fatto che noi e la nostra galassia ci muoviamo all'interno dell'universo ad alcune centinaia di chilometri al secondo. Smoot misurò la radiazione di fondo avvalendosi di un apparecchio di precisione montato su un aereo U2 in volo.

Con il progredire delle tecnologie, negli anni successivi le misure divennero ancora più precise (una parte su 1000): nel 1989 sempre Smoot misurò il variare della radiazione di fondo in diverse regioni dello spazio con uno strumento a bordo del satellite cobe (Cosmic Background Explorer). In questo modo scoprì che la radiazione non era completamente uniforme: alcune regioni erano leggermente più fredde di altre. Il fatto fu spiegato ipotizzando che l'universo delle origini non era completamente omogeneo. Si potrebbe dire che esso era "liscio" così come lo è la superficie dell'oceano, una curvatura media screziata però da piccole rugosità. Queste increspature cosmiche non erano altro che i germi delle future galassie e degli ammassi galattici. Gli astrofisici le avevano previste e gli strumenti di misura utilizzati da Smoot sul satellite cobe erano stati sufficientemente sensibili da individuarle.

Se queste anisotropie non fossero state scoperte mi sarei molto stupito, poiché la comunità scientifica era ormai convinta che le galassie avevano avuto origine da instabilità gravitazionali. In altre parole, le parti dell'universo primordiale che presentavano una densità leggermente maggiore della media restarono indietro quando l'universo cominciò a espandersi, fino a condensarsi. Gli ammassi e i superammassi di galassie non avrebbero potuto formarsi se queste disomogeneità non si fossero manifestate già dai primi istanti di esistenza dell'universo; queste piccole increspature, inoltre, dovevano avere una dimensione tale da provocare nella radiazione di fondo fluttuazioni dell'ordine di una parte su 100 mila. Queste speculazioni furono confermate da Smoot nei minimi dettagli.

È interessante chiedersi quali proprietà generali doveva possedere l'universo affinché si potesse sviluppare la complessità. La prima è sicuramente la gravitazione, che attraverso le instabilità provoca il condensarsi delle strutture nell'universo informe dei primi istanti. Paradossalmente, il progredire verso strutture sempre più complesse necessita sì della gravitazione, ma a patto che sia sufficientemente debole. Se fosse più intensa, infatti, la vita delle stelle sarebbe stata troppo breve per consentire l'evoluzione della complessità. Se le stelle e le galassie sono così grandi, ciò dipende appunto dalla relativa debolezza della gravitazione. Sarebbe un bell'esercizio poter quantificare questo fenomeno, arrivando a capire perché questa forza deve essere proprio così debole per funzionare a dovere.

Questo punto va compreso fino in fondo: la gravitazione è, per così dire, la levatrice della complessità dell'universo. Essa porta all'instabilità e attrae materia formando stelle e galassie. Quando le stelle perdono energia, il loro centro si fa ancora più caldo e compatto; si innescano così al loro interno reazioni di fusione nucleare. Le differenze di temperatura che s'instaurano fra le stelle, i pianeti e il cielo rendono possibili i processi termodinamici "lontani dall'equilibrio" (come ci ha insegnato Ilya Prigogine) da cui traggono origine le molecole complesse e la vita. Si può dire dunque che, a partire da un universo primordiale e senza forma, la gravitazione generi lo squilibrio, che è il prerequisito di ogni forma di complessità. Questo è il genere di processo che noi stiamo indagando da un punto di vista quantitativo. Nei prossimi anni sarà anche possibile elaborare simulazioni realistiche dell'ammasso gravitazionale, della dinamica dei gas e di altri fenomeni che ci consentano di comprendere meglio

come un universo non strutturato può evolversi verso la complessità.

Nella mia carriera ho affrontato anche argomenti più speculativi: mi sono chiesto per esempio se i fisici potrebbero accidentalmente distruggere l'universo eseguendo un certo tipo di esperimento. La domanda - a prima vista bizzarra - ha un senso se consideriamo la teoria dell'universo inflazionario di Alan Guth. Tale concezione presuppone che nei primi istanti dell'universo perfino il vuoto fosse dotato di proprietà particolari, fra cui la transizione di fase, qualcosa di simile a quello che succede all'acqua quando si trasforma in ghiaccio.

Alcuni ricercatori - il primo dei quali fu Sidney Coleman - suggerirono che il vuoto attuale potrebbe non trovarsi al livello energetico più basso possibile. In questo caso, lo spazio potrebbe andare incontro a un'ulteriore transizione di fase verso un genere differente di vuoto, in cui cambiano le leggi della fisica. Tutte le particelle che conosciamo, e ogni cosa che vediamo attorno a noi, verrebbero in tal caso distrutte. Per dirla diversamente, il vuoto attuale potrebbe essere superraffreddato, così come l'acqua molto pura può essere portata sotto lo 0 senza trasformarsi in ghiaccio. E come una particella di polvere può fare congelare improvvisamente quest'acqua, così un'inezia qualsiasi potrebbe innescare la metamorfosi dello spazio in una configurazione totalmente diversa. Perché allora non ipotizzare che con un esperimento compiuto in un acceleratore di particelle i fisici possano inavvertitamente produrre una bolla del nuovo vuoto, che si espanderebbe alla velocità della luce fino a colonizzare l'universo intero?

La cosa può apparire assurda, ma non è la prima volta che l'uomo produce situazioni mai esistite prima in natura. Prima dell'invenzione dei metodi di refrigerazione, per esempio, la temperatura del cosmo non era mai scesa sotto i 2,7 gradi sopra lo zero assoluto (temperatura della radiazione di fondo attuale). Un pericolo potrebbe essere rappresentato da una collisione fra particelle ad alta energia all'interno di un grande acceleratore; una collisione di questo genere potrebbe teoricamente provocare una enorme densità locale di energia adatta a innescare una transizione di fase.

Ho affrontato la questione in un saggio scritto a due mani con l'astrofisico olandese Piet Hut, per verificare se gli acceleratori possono creare concentrazioni di energia mai esistite nell'universo dopo il big bang. Le conclusioni a cui siamo giunti sono piuttosto rassicuranti. Abbiamo calcolato il tasso di collisione fra raggi cosmici e particelle che si muovono a una velocità vicina a quella della luce negli spazi intersiderali. Calcolate quindi le collisioni più energetiche che si sono mai verificate in questa parte d'universo, abbiamo scoperto che esse sono molto più potenti di quelle che possono verificarsi in un acceleratore. Per fortuna, dobbiamo ancora farne di strada prima di poter paventare un'Apocalisse tecnologica.

Un'altra cosa di cui mi sto occupando è il concetto di un insieme di universi, ciascuno dotato di proprietà diverse. Fra gli scienziati che stanno lavorando su questo tema, ricordo il fisico russo Andrej Linde, che ha proposto l'idea di una inflazione caotica ed eterna: secondo questa teoria, nuovi universi potrebbero gemmare da quelli già esistenti, oppure crescere all'interno di un nuovo quadro spazio-temporale presente nei buchi neri. Linde e altri fisici sostengono che il nostro universo è solo un elemento di un insieme infinito e che ogni universo è governato da leggi fisiche diverse. In alcuni la gravitazione potrebbe essere molto forte, in altri assente, in altri ancora potrebbero esserci particelle che non conosciamo. Il concetto di insieme di universi, o come io preferisco chiamarlo, di metauniverso, da una giustificazione scientifica al ragionamento antropico: esso afferma la necessità della nostra presenza in un universo in cui si è potuta sviluppare la complessità. Se esistono tutti gli universi possibili, è logico trovare, su almeno uno di essi, condizioni propizie alla vita e dunque alla nostra esistenza. Questo suggerisce l'idea di una "selezione osservativa" degli universi. Vediamo di spiegarla: di tutti gli universi che noi possiamo concepire, alcuni

non hanno le caratteristiche necessarie per lo sviluppo della complessità, e dunque è come se fossero nati morti. Altri invece hanno potenzialità ben maggiori del nostro, ma proprio per questo non siamo in grado di immaginarli.

A partire dal primo microsecondo di vita, l'evoluzione dell'universo può essere prevista con i dati che abbiamo a disposizione. Allo stesso modo possiamo ricostruire la storia più remota della Terra avvalendoci della geofisica e della paleontologia. La cosmologia ha lo stesso tipo di evidenza di queste discipline, con la differenza che la scienza del cosmo si basa su prove più quantitative. Tuttavia, quando torniamo al primo microsecondo, abbiamo a che fare con idee come l'espansione e la transizione di fase. La difficoltà è che sappiamo troppo poco di questa fisica estrema per poter fare previsioni quantitative. Se però ammettiamo una pluralità di universi dotati di proprietà diverse, la nostra prospettiva si allarga notevolmente.

A questo punto è importante distinguere diverse definizioni di universo. Questa parola può significare ciò che riusciamo a osservare, vale a dire una regione di circa 15 miliardi di anni luce; oppure uno spazio più vasto, che comprende anche quelle regioni dalle quali la luce ci raggiungerà in futuro. Infine, la definizione di universo può racchiudere tutti i possibili universi, governati da tutte le possibili leggi fisiche. Credo che l'ultima accezione, certamente la più affascinante, possa cominciare a essere trattata scientificamente.

Preferisco parlare di "ragionamento" piuttosto che di "principio" antropico. Questo peculiare ragionamento insiste sul fatto che, poiché alcune caratteristiche dell'universo sono prerequisiti dell'esistenza di osservatori, non ha senso cercare di spiegarli: essi sono così perché noi siamo qui e viceversa. In un certo senso, non c'è nulla di più banale del ragionamento antropico: non dobbiamo scervellarci per capire come mai ci troviamo vicino a una stella come il sole e non in altro luogo dello spazio. Né dobbiamo chiederci perché abbiamo cominciato a esistere solo dopo 15 miliardi di anni di storia dell'universo e non al momento del big bang, perché è ovvio che il cosmo doveva raffreddarsi e compiere tutta una serie di passaggi prima che noi potessimo esordire sul pianeta Terra.

C'è chi ha spinto il ragionamento antropico alle sue estreme conseguenze, arrivando a sostenere che ogni legge fondamentale della natura porta necessariamente a forme di vita intelligente. Credo che questa visione sia errata. Lo statuto del ragionamento antropico dipende molto dalla natura delle leggi fondamentali. Se queste - come la gravitazione e le altre forze fondamentali, le masse, gli spin e le cariche delle particelle elementari - sono conseguenze accidentali del processo di raffreddamento dell'universo, possiamo immaginare universi con leggi non altrettanto propizie alla vita. Fra tutti gli universi possibili, noi siamo capitati in uno compatibile con la nostra esistenza. Non c'è niente di straordinario in ciò.

Se invece le leggi fondamentali della natura sono uguali ovunque e per sempre, lo sviluppo della complessità appare come un puro caso, o frutto della fortuna, o della provvidenza, a seconda delle convinzioni personali.

C'è da restare strabiliati all'idea che leggi così semplici possano produrre una realtà così ricca e sfaccettata; ma è lo stesso stupore che ci coglie quando vediamo che una figura infinitamente complessa come un insieme di Mandelbrot può essere contenuta in un semplice algoritmo. La matematica fa di questi scherzi. Perché allora non ammettere che le leggi della fisica siano uguali ovunque e che possano avere conseguenze così incredibilmente ricche e complesse?

Se la fisica è unica, non c'è spazio per la selezione antropica, perché le leggi sono semplicemente date. O le si accettano insieme alle loro notevoli conseguenze, alla stregua di fatti bruti, oppure bisogna andare fino in fondo, ossia al "principio antropico forte". Ma se ci sono più universi che si raffreddano diversamente, alcuni avranno condizioni propizie alla vita, altri saranno invece troppo freddi, o troppo vuoti,

comunque con una storia molto breve. In questo caso è possibile una chiara selezione antropica, tale per cui noi viviamo necessariamente in un universo sufficientemente ospitale e complesso.

Sarebbe bene comunque che i fisici non facciano troppo affidamento su argomenti di tipo antropico. Molti aspetti ancora sconosciuti dell'universo potranno essere spiegati con il progredire della fisica. Se invece pensassimo che essi sono semplici accidenti da porre in relazione al modo in cui la nostra regione di metauniverso è andata raffreddandosi, non saremmo motivati a spiegarli scientificamente. Circa dieci anni fa ho intervistato Steven Weinberg per una trasmissione radiofonica. Disse proprio questo: è meglio che i fisici non credano al principio antropico, perché non si impegnerebbero più a cercare una teoria unificata dell'universo, e se smettono di cercarla di certo non la troveranno. Questi nuovi concetti di metauniverso (o insieme di universi) portano la selezione antropica più vicino al discorso scientifico.

lee smolin Ho conosciuto Martin Rees solo di recente, durante una visita all'Università di Cambridge. Avevo naturalmente già sentito parlare di lui, e in termini molto favorevoli. Oggi è senza dubbio uno dei ricercatori più importanti in campo cosmologico e astrofisico e adesso che l'ho conosciuto ho capito anche perché: Rees è aperto alle nuove teorie ma nel contempo è attento e rigoroso nell'esercizio della critica. È davvero difficile pensare qualcosa sull'evoluzione dell'universo o sulla formazione delle galassie che lui non abbia già pensato, sviscerato e probabilmente anche scritto da qualche parte. È molto divertente parlare con lui, forse anche perché non ha la spocchia che hanno molti altri. Di solito non è molto piacevole sentir criticare le proprie idee, ma quando lo ha fatto Rees mi sono divertito. Pur non condividendole, le ha considerate attentamente e infine mi ha spiegato per filo e per segno dove secondo lui non funzionano.

A Rees va gran parte del merito di aver scoperto che le leggi della natura hanno consentito l'evoluzione della complessità strutturale dell'universo. Già la generazione precedente - specialmente Paul A.M. Dirac, Fred Hoyle e Robert Dicke - aveva intuito qualcosa di simile. Ma credo che sia stato proprio Martin, insieme al suo giovane collega Bernard Carr, a mettere insieme tutte le prove scientifiche a sostegno del carattere speciale delle leggi naturali. Il risultato di questo lavoro è stato un saggio pubblicato su "Nature", che ha avuto un'enorme influenza su tutti coloro che si occupano del principio antropico. Più di un libro è stato scritto parafrasando ed estendendo quell'articolo. Rees ha reso questa teoria così seria da costringere anche coloro che come me non si sentono attratti dal principio antropico ad occuparsene. E ora siamo al punto che se non accettiamo di spiegare la peculiarità del nostro universo con la nostra stessa esistenza, dobbiamo trovare qualche spiegazione alternativa altrettanto plausibile.

Credo che gli scienziati americani abbiano ancora molto da imparare dalla tradizione britannica in astronomia e in fisica. Nessun altro paese al mondo può contare su creatori di teorie cosmologiche e astronomiche altrettanto originali. Solo in questo secolo ci sono stati Arthur Eddington, Fred Hoyle, Dennis Sciama, Roger Penrose, Stephen Hawking e lo stesso Martin Rees, a cui vanno aggiunti altri meno noti. Questi scienziati sono stati educati a lavorare con altissimi livelli di rigore e onestà intellettuale, e hanno potuto sviluppare le loro idee in un'atmosfera molto più libera e tollerante delle individualità e perfino delle eccentricità di quanto non sia possibile in America. Negli usa ci sono sicuramente più scienziati e più fondi, ma mi sembra che ci sia anche un eccesso di burocratizzazione.

Solo in Gran Bretagna si può trovare uno scienziato come Jim Lovelock o un fisico e filosofo come Julian Barbour, che pur lavorando a casa propria e senza

incarichi universitari riescono a conquistarsi il rispetto di colleghi meno coraggiosi che lavorano nelle università. Forse il segreto sta nel fatto che gli inglesi non si sono dimenticati che alla fine il progresso della scienza dipende dalle personalità creative; per questo si cerca di dare alle persone la migliore educazione intellettuale e morale - in cui vengono esaltati i valori dell'onestà e della tolleranza - per poi concedere il massimo di libertà a coloro che hanno dimostrato particolari doti di creatività. Negli Stati Uniti si dovrebbe riflettere di più su queste cose.

nicholas humphrey Io e Martin siamo amici e quando voglio sapere qualcosa di fisica e cosmologia mi rivolgo a lui. Certe volte ho l'impressione che sia un po' troppo cauto. Non credo che abbia ragione, ad esempio, quando respinge la versione più spinta del principio antropico. A me questa sembra un'idea meravigliosa: non necessariamente vera, ma di certo molto suggestiva. Ma Martin non ne vuole sentir parlare.

alan guth Martin Rees è l'astrofisico teorico che preferisco. Qualunque cosa gli si chieda in questo campo, dimostra una erudizione e una capacità comunicativa straordinarie. È capace di sviscerare l'argomento fino in fondo e con grande maestria. È difficile indicare i risultati più importanti della sua ricerca, perché sono tantissimi. Ha scritto parecchie centinaia di saggi di astrofisica, dando contributi importanti in quasi ogni settore di questa scienza.

16. Alan Guth

Un universo nel cortile

alan guth ricopre attualmente la cattedra di fisica V. F. Weisskopf al mit. È autore di *The Inflationary Universe* (in stampa).

La cosmologia è diventata una scienza osservativa. I ricercatori non se ne stanno più in poltrona almanaccando su teorie indimostrabili dell'universo. Le osservazioni vengono condotte a getto continuo e con tecniche diverse: sulla distribuzione delle galassie nell'universo, sulla radiazione fossile e sulle sue variazioni, sulla densità della massa del cosmo e sulla sua età.

Tutto questo influisce sulle teorie cosmologiche. Nel 1980 ho sviluppato l'idea dell'universo inflazionario, una nuova teoria per spiegare come avrebbe potuto iniziare il big bang. Essa è stata accettata da molti perché è in accordo con i dati relativi al big bang. Non mette in discussione le conoscenze precedenti ma ne aggiunge molte altre: ci spiega, per esempio, molte cose su ciò che è accaduto nella prima frazione di secondo dell'universo, un periodo che non era mai stato esplorato prima. Risponde inoltre a una serie di domande lasciate aperte dal modello standard. L'universo inflazionario è una teoria che riguarda la realtà. Come probabilmente la maggior parte dei fisici, anch'io intendo la realtà come un fatto fisico, che gli individui possono influenzare solo prendendo e spostando oggetti. La realtà esisterebbe anche senza di noi e il compito

dei fisici è di comprenderne la natura.

Una delle caratteristiche più stupefacenti del modello dell'universo inflazionario è che esso si può evolvere a partire da qualcosa di incredibilmente piccolo: pare che bastino dieci chili di materia per dare origine a un universo. Qui si fa sentire la differenza con la teoria standard. Il modello cosmologico tradizionale presuppone che tutta la materia che esiste adesso fosse già presente all'inizio; quindi esso si limita a descrivere come è avvenuta l'espansione e come la materia è andata raffreddandosi ed evolvendosi. Con la teoria inflazionaria ci si potrebbe chiedere, in via di principio, se un universo può essere creato in un laboratorio - o in un cortile - per mezzo di processi innescati dall'uomo.

Chiediamoci allora cosa succederebbe se avessimo un piccolo lembo di universo inflazionario nel nostro universo, lasciando perdere per il momento come possa esserci finito dentro. Ammettiamo che esista e vediamo come si potrebbe evolvere. Ebbene, se questo pezzo fosse grande abbastanza, crescerebbe fino a diventare un nuovo universo, ma in un modo molto strano. Esso infatti - per la tranquillità di chi si preoccupa del nostro ambiente - non prenderebbe il posto dell'universo attuale. Al contrario, questo lembo formerebbe una sorta di varco e vi scivolerebbe all'interno. Visto dal nostro universo, apparirebbe piccolo e come una specie di buco nero. Dall'interno, invece, il nuovo universo si starebbe espandendo fino a diventare arbitrariamente grande, creando nuovo spazio via via che si espande. Potrebbe diventare così grande da inglobare un universo simile al nostro. In un tempo molto breve, pari a una frazione di secondo, si staccerebbe dal nostro cosmo per diventare un universo totalmente distinto.

La cosmologia inflazionaria è una nuova tendenza della teoria del big bang. Non è in contraddizione con essa, anzi la conferma. L'unica cosa che modifica è la storia di quel primo microsecondo iniziale. Secondo questa nuova teoria, in quell'attimo primordiale l'universo subisce un'espansione straordinaria.

Vediamo meglio quali sono le due principali differenze fra la nuova e la vecchia teoria. Per il modello inflazionario tutta la materia nell'universo può essere creata nel brevissimo periodo di inflazione. Nel modello standard, invece, è necessario postulare che essa sia presente fin dall'inizio, e non c'è modo di spiegare come è stata creata. Fra l'altro, la produzione inflazionaria di materia si accorda con il principio di conservazione dell'energia, benché l'universo venga creato praticamente dal nulla. I calcoli di fisica relativistica lo confermano. Lo strano risultato si spiega con il ruolo centrale giocato dalla gravità nella conservazione dell'energia. Si da il caso, infatti, che l'energia di qualsiasi campo gravitazionale sia negativa. Durante l'espansione, via via che l'universo cresce, l'energia totale della materia sale a livelli altissimi, mentre l'energia nella gravità diventa sempre più negativa. In questo modo le due forme di energia si elidono, cosicché l'energia totale del sistema resta la stessa di quando era cominciata l'espansione, probabilmente a livelli molto bassi. In effetti l'universo potrebbe avere anche un'energia totale pari a zero, in virtù del fatto che quella negativa della gravitazione cancella quella positiva della materia. Questa capacità di produrre materia nell'universo differenzia il modello inflazionario da quello precedente.

Ma c'è anche un'altra differenza che consente alla nuova teoria di spiegare fenomeni non interpretabili con il modello standard. Si prenda, per esempio, la sostanziale uniformità dell'universo. Quando osserviamo lo spazio a grandi distanze, l'universo ci appare uniforme. Ce lo conferma la radiazione di fondo, che altro non è che un'istantanea di ciò che era il cosmo poche centinaia di migliaia di anni dopo il big bang, nel momento appunto in cui questa radiazione fu emessa. Questa fotografia rivela che l'universo era già allora straordinariamente uniforme.

La cosmologia tradizionale non può spiegare questo fatto. L'universo primordiale era così ampio che la luce non avrebbe potuto attraversarlo nel poco

tempo a disposizione. Possiamo immaginare, per esempio, di osservare la radiazione delle microonde da due direzioni opposte nel cielo, e possiamo così utilizzare la teoria del big bang per ricostruire il tragitto che ciascuno dei due raggi ha compiuto dai rispettivi punti di origine. Quando la radiazione fu emessa, le due fonti erano separate da una distanza circa cento volte più grande della distanza totale coperta dalla luce a partire da quell'istante. Poiché noi crediamo che nulla possa viaggiare più velocemente della luce, ciò significa che un estremo dell'universo non può essere stato influenzato da ciò che succedeva all'estremo opposto. Ciononostante questi due punti hanno sempre mantenuto temperature identiche negli stessi istanti, con una precisione straordinaria. Tale uniformità può essere spiegata dalla teoria standard del big bang solo postulando che l'universo fosse uniforme fin dall'inizio.

Il modello inflazionario risolve la difficoltà individuando un breve periodo, nei primi istanti dell'universo, in cui si è verificata una espansione rapidissima, molto più rapida di quanto previsto nel modello standard. Se questo è vero, l'universo primordiale era molto più piccolo di quanto si fosse portati a credere. E questo microscopico protouniverso ebbe tutto il tempo per portarsi a una temperatura uniforme prima che avesse inizio l'espansione. Successivamente l'inflazione ingigantì questa piccola regione fino a farle comprendere l'intero universo osservato. Ecco allora che l'uniformità dell'universo non è più un mistero, ma risulta essere una conseguenza naturale dell'evoluzione cosmica. Per dare ragione di questo fenomeno nelle sue dimensioni attuali, dobbiamo ipotizzare che durante l'era inflazionaria l'universo si sia espanso almeno di un fattore di trilioni di trilioni. E probabile che in realtà l'espansione sia stata molto superiore a questa cifra stupefacente, ma purtroppo non abbiamo modo di saperlo.

Recentemente ho lavorato sui tunnel spaziali e sulla possibilità teorica di costruire un universo nel proprio cortile di casa. Con Steven Blau e Eduardo Guendelman mi sono chiesto cosa succederebbe se ci fosse una regione di universo in espansione nel mezzo del nostro universo. Alla domanda si può rispondere con molta chiarezza utilizzando la teoria della relatività generale e prendendo in prestito dalla fisica delle particelle il concetto di "falso vuoto", un tipo molto particolare di materia che è la forza trainante dell'inflazione. Abbiamo scoperto allora che una regione sufficientemente grande di falso vuoto darebbe vita a un nuovo universo, il quale, come ho detto prima, si staccerebbe molto rapidamente dal nostro per diventare un'unità distinta.

La questione si complica se ci chiediamo quali sono le condizioni per produrre una piccola regione di falso vuoto in grado di innescare questo processo. Per quanto ne sappiamo, sono condizioni impossibili da realizzare, poiché la densità di massa del falso vuoto dovrebbe essere circa 10^{60} volte maggiore di quella di un nucleo atomico. Non vedo come si possa ottenere una diavoleria di questo genere anche in futuro. Ma non per questo la cosa perde d'interesse, almeno per la fisica dell'universo.

Proviamo a immaginare che qualcuno riesca a produrre nel suo cortile di casa il falso vuoto e impari a manipolare queste impressionanti densità energetiche. Sorge a questo punto un'altra difficoltà. Quando si comincia a raccogliere questa materia, la sua forza gravitazionale è tale da collassare in un buco nero. L'unico modo per evitare questo guaio è far sì che questa materia cominci a espandersi molto rapidamente. Scopriamo così che se la regione deve espandersi con la rapidità necessaria a produrre un nuovo universo, deve cominciare da ciò che in termini tecnici si chiama una singolarità iniziale, altrimenti nota come buco bianco. Questo è essenzialmente il contrario di un buco nero: mentre nel buco nero la materia viene risucchiata senza che possa sottrarvisi, dal buco bianco viene espulsa senza che vi possa rientrare. L'istante della creazione cosmica nella teoria del big bang è un esempio di buco bianco, ma certamente nessuno ha mai visto un buco bianco e tantomeno saprebbe riprodurlo in laboratorio. Alla domanda se è possibile in via di principio creare un universo in

laboratorio, la relatività generale classica risponde di no, perché tale creazione richiederebbe un buco bianco. Tuttavia parecchi indizi ci fanno ritenere che il nostro mondo non sia governato da leggi deterministiche; che cioè il nostro sia un universo quantistico. La teoria quantistica è necessaria per comprendere il comportamento delle molecole, degli atomi e delle particelle subatomiche, e i fisici sono ormai convinti che essa sia indispensabile anche per cogliere la vera natura della gravità. Sfortunatamente vi sono ancora molti problemi tecnici che impediscono di elaborare una teoria quantistica della gravità. Parte di questi inciampi potrebbero essere superati con la teoria delle superstringhe, la quale è però ancora lontana dall'essere stata compresa fino in fondo.

Sta di fatto, comunque, che con la fisica dei quanti si potrebbe pensare di creare un universo senza ricorrere ai problematici buchi bianchi. Insieme ai fisici Edward Farhi e Jemal Guven, ho provato a formulare una teoria approssimativa della gravità quantistica evitando di impantanarmi nella teoria delle superstringhe. E così abbiamo scoperto che, se la nostra elaborazione è giusta, è anche possibile creare un universo in laboratorio senza ricorrere ai buchi bianchi. Non è detto che la cosa funzioni, ma nel quadro della meccanica quantistica possiamo stimare le probabilità di successo. Ci ha rincuorato scoprire, inoltre, che i fisici Willy Fischler, Daniel Morgan e Joseph Polchinski hanno ottenuto gli stessi risultati con un metodo diverso. Ma da cosa dipendono le probabilità di successo? Sostanzialmente dalla densità energetica del falso vuoto. Se questa rientra nella scala tipica di ciò che i fisici delle particelle chiamano "teorie di grande unificazione", la probabilità è quasi nulla. Se invece, come pare, il livello energetico associato al falso vuoto è migliaia di volte superiore a quello delle teorie di grande unificazione, diverrebbe molto probabile poter produrre un universo in laboratorio.

Detto questo, bisogna riconoscere che i nostri calcoli risentono fortemente delle incertezze proprie della teoria della gravità quantistica. La nostra e le prossime generazioni non riusciranno certo a condurre esperimenti sulla creazione di un universo artificiale; tutto ciò che possiamo fare è capire se è possibile elaborare nuove teorie dettagliate della gravitazione e del comportamento della materia a energie molto alte. Le due ricerche sono legate fra loro, poiché le iterazioni gravitazionali delle particelle elementari diventano significative solo a energie straordinariamente alte.

I tunnel spaziali svolgono un ruolo importante nel lavoro di creazione dell'universo. Questi si configurano come lunghe gallerie che collegano due universi fra loro, oppure due parti distanti di uno stesso universo. Nel momento della creazione, l'universo bambino viene inizialmente connesso al suo genitore da un tunnel (simile a un cordone ombelicale), che si stacca però dopo appena 10^{-35} secondi.

Dai tunnel e dalla loro durata dipende anche la dibattuta e bizzarra questione se sia possibile viaggiare nel tempo. Perché si possa compiere un viaggio temporale, è necessario un tunnel sufficientemente grande e duraturo da essere percorso fino in fondo. Immaginiamo allora che sia tecnologicamente possibile costruire un tunnel che collega il nostro universo a se stesso. L'aspirante crononauta manterrà quindi un'entrata del tunnel presso di sé man mano che s'inoltra nel futuro. Dovrà farlo spostandosi ad una velocità prossima a quella della luce e potrà viaggiare secondo un itinerario circolare, in modo da tornare periodicamente su se stesso. Anni o millenni dopo, il viaggiatore o i suoi discendenti saranno in grado di tornare al tempo in cui il tunnel è stato costruito semplicemente spostandosi in esso.

Purtroppo le leggi della fisica non sembrano consentire questo viaggio. Non a caso il tunnel che si forma negli istanti iniziali dell'universo collassa così rapidamente. Se lo si costruisce con materia "normale", esso svanirà prima ancora che qualsiasi cosa possa attraversarlo. L'unico modo per renderlo durevole sarebbe di costruirlo con un materiale dotato di densità energetica negativa. In linea di principio l'ipotesi non è da scartare, perché la teoria della relatività quantistica prevede

l'esistenza di regioni dello spazio a energia negativa. Possedendo però dimensioni e durata molto limitate, nessuno è ancora riuscito a costruire teoricamente un tunnel attraversabile. È anche vero però che nessuno ha potuto dimostrare l'impossibilità della cosa.

A questo punto molti si chiederanno che senso ha mettere mano a teorie che si basano su grandezze dell'ordine di 10^{-35} , del tutto inconcepibili nella nostra esperienza. Tuttavia la scienza ha ottenuto grandi successi proprio estrapolando le relazioni matematiche verso l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande. Per creare le equazioni dell'elettromagnetismo, Maxwell condusse esperimenti su fenomeni caratterizzati da distanze che andavano da pochi centimetri a qualche metro. Oggi utilizziamo con successo le stesse equazioni per descrivere eventi atomici e cosmologici. Ovviamente queste estrapolazioni non funzionano sempre: se per esempio applichiamo le leggi di Newton a fenomeni che si muovono alla metà della velocità della luce, otteniamo risultati errati. Eppure vale sempre la pena di tentare queste estrapolazioni. Albert Einstein formulò la teoria della relatività speciale nel tentativo di applicare le leggi di Newton a una velocità vicina a quella della luce. Egli si era chiesto cosa sarebbe successo spostandosi su un'onda luminosa. I fisici di oggi si chiedono che aspetto aveva l'universo 10^{-35} secondi dopo la sua nascita. Domande speculative (e apparentemente deliranti), ma forse decisive per la scienza del futuro.

A dispetto dell'astrusità di certe considerazioni cosmologiche, la mia concezione filosofica della realtà è volutamente terra-terra. Secondo me l'universo è un oggetto fisico, di cui i fisici e gli altri scienziati stanno scoprendo molte leggi fondamentali. Nella scienza e nella vita è importante riconoscere che a un dato momento vi sono sempre domande alle quali non si sa rispondere. Noi cerchiamo instancabilmente queste risposte, ma non dobbiamo stupirci se molte continuano a sfuggirci.

lee smolin L'ipotesi inflazionaria è stata probabilmente l'idea più influente nella cosmologia degli ultimi quindici anni, ed è Alan ad averla elaborata. Non posso dire che mi abbia davvero convinto, e con me altri fisici, ma non si può negare l'impatto enorme che ha avuto su tutti noi. La teoria è nata cercando di spiegare alcuni complessi problemi cosmologici, come l'inaspettata uniformità dell'universo.

Esistono due versioni della teoria inflazionaria: la prima sostiene che l'universo ha cominciato quasi subito a espandersi in modo esponenziale, crescendo di moltissime potenze di dieci. Nella seconda versione, invece, il tempo ha subito un notevole rallentamento durante il periodo inflazionano. In entrambi i casi si ottiene che le diverse parti dell'universo sono entrate in comunicazione fra loro, consentendo così caratteristiche uniformi ovunque.

Inoltre, per la teoria inflazionaria ω è uguale a uno, dove ω è la misura della densità della materia nell'universo. A una certa densità di materia, l'universo collasserà su se stesso a causa della forza di gravità. Conoscendo la velocità di espansione dell'universo, possiamo calcolare quanta materia è necessaria per arrestarne la crescita. ω è il rapporto fra l'effettiva densità di materia del nostro universo e questa densità critica. Si tratta sicuramente del parametro più importante in cosmologia. Dicendo che ω è uguale a uno, la teoria inflazionaria sostiene che l'universo si trova in bilico fra l'espansione eterna e il collasso. Basterebbe un po' di materia in più per farlo sparire o un po' di materia in meno perché continui a espandersi per sempre. Nei prossimi dieci o quindici anni le previsioni di questa teoria potranno essere finalmente sottoposte a prove sperimentali.

Martin rees L'inflazione ha stimolato un gran numero di dibattiti cosmologici sull'universo primordiale. In questi anni sono state elaborate diverse varianti della

teoria - l'inflazione vecchia, l'inflazione nuova e quella caotica - ma c'è ancora molto da lavorare sui dettagli, poiché la fisica attuale non consente di calcolare dove si è verificata questa espansione e in che modo si sono manifestate le fluttuazioni che hanno portato alla formazione di galassie, ammassi e superammassi. È affascinante, comunque, pensare che quelle piccole variazioni di temperatura registrate dal satellite cobe, e in seguito da un'altra decina di esperimenti, siano la traccia di fenomeni fisici manifestatisi quando l'universo aveva le dimensioni di una pallina da golf.

Oggi questa fisica dei primi istanti di vita dell'universo, in cui gli effetti quantistici riguardavano tutto il cosmo, sta diventando una scienza sperimentale. Molti cosmologi sono pronti a scommettere che la teoria inflazionaria elaborata da Guth diventerà un ingrediente essenziale di qualunque teoria dell'universo iniziale. Grazie a essa possiamo dire qualcosa di sensato non solo sul primo secondo, ma anche sulla frazione 10^{-36} del primo secondo dell'universo.

La teoria inflazionaria non avrebbe potuto affermarsi se contemporaneamente a essa non fosse nata un'altra teoria, secondo la quale fin dall'inizio la materia prevale sull'antimateria. Senza un'asimmetria di questo genere sarebbe stato difficile ipotizzare un'espansione dell'universo; per riempire un cosmo sempre più grande è necessario infatti creare nuova materia. Guth ha avuto il merito di unire in una sola teoria queste due idee.

17. Lee Smolin

Una teoria generale dell'universo

Lee Smolin è professore di fisica e membro del Center for Gravitational Physics and Geometry alla Pennsylvania State University. Ha scritto *The Life of the Cosmos: A New View of Cosmology, Particle Physics, and the Meaning of Quantum Physics* (1995).

Che cos'è lo spazio, che cos'è il tempo? Ecco il tipo di domande che si pone la teoria quantistica della gravità. Nella relatività generale, Einstein ha elaborato non solo una teoria della gravità, ma anche dello spazio e del tempo, superando così la fisica newtoniana. Ora si tratta di combinare la concezione spazio-temporale della relatività generale con la teoria dei quanti, dalla quale potremo trarre anche una visione nuova e profonda della natura. Avremo in questo modo una fisica unificata che potrà essere applicata a tutti i fenomeni, da quelli microscopici a quelli del cosmo. Non ho dubbi che sulla scorta di questa nuova teoria potremo andare oltre la stessa relatività generale nel concepire lo spazio e il tempo. Ma la gravità quantistica dovrà diventare anche una teoria cosmologica, con la quale descrivere l'intero universo dal punto di vista dell'osservatore che ci vive dentro; per definizione, infatti, non esistono osservatori al di fuori dell'universo. Questo ci porta a considerare la questione fondamentale, vale a dire come estendere alla scala dell'universo il dominio di una scienza abituata a descrivere il comportamento di atomi e molecole. Bohr e Heisenberg ci hanno insegnato che la teoria dei quanti sembra avere senso solo quando descrive ciò che è piccolo e isolato da chi lo osserva, il quale rimane esterno a esso. Per

questa ragione, la sintesi di fisica quantistica e relatività avrà anche profonde ripercussioni sulla nostra comprensione della teoria dei quanti. Più in generale, la domanda che ci dobbiamo porre è la seguente: come possiamo noi, in quanto osservatori interni all'universo, elaborare una sua descrizione oggettiva e completa?

Gran parte del mio lavoro di scienziato si è indirizzato al problema della gravità quantistica. Sono contento di occuparmi di questo settore, poiché è l'unica branca della fisica in cui l'attività di ricerca e di calcolo convive con la speculazione filosofica. Bisogna davvero sapere un sacco di cose per occuparsi di questo tema. È probabile che diventerà sempre più importante conoscere la teoria dei quanti per interpretare correttamente i dati delle osservazioni astronomiche, ed è altrettanto probabile che per costruire una teoria unificata bisognerà utilizzare nuovi concetti e strutture della matematica. Forse è per questo che, pur avendo lavorato in solitudine per almeno vent'anni, non mi sono mai annoiato.

Ci sono giornate in cui la mattina vola via in calcoli e in verifiche di idee pensate la notte prima. All'ora di pranzo vado a seguire un seminario di astronomia, in cui magari si discute di faccende importanti come quanta materia oscura c'è nello spazio. Nel pomeriggio studio un saggio di matematica pura scritto da un collega, mentre a cena discuto con un filosofo sulla natura del tempo. Ed è molto interessante vedere come queste discipline, che fino a poco tempo fa non comunicavano fra loro, ora si illuminino l'una con l'altra. Certo, non tutto va sempre per il verso giusto: la burocrazia e l'insegnamento rubano non poco tempo, ma poi ci si abitua. In fondo è bello anche insegnare. Insomma, certe volte mi sembra di essere proprio fortunato e non riesco a credere che ci sia qualcuno che mi paghi per fare quello che faccio.

Come dicevo, negli ultimi otto anni ho lavorato con parecchi amici alla fusione di relatività e fisica quantistica. Abbiamo chiamato questo approccio "gravitazione quantistica non perturbativa". Pur non avendo ancora concluso i nostri studi, la teoria che abbiamo ottenuto ci ha consentito di fare alcune importanti predizioni sperimentali. Purtroppo non è possibile verificare questi risultati, poiché riguardano la geometria dello spazio a una scala di venti ordini di grandezza inferiore ai nuclei atomici. Ciononostante ci siamo avvicinati alla soluzione del problema ben più di altri, e ben al di là di quanto mi sarei aspettato di raggiungere nel corso della mia vita.

In questo lavoro abbiamo combinato una elegante formulazione della relatività generale di Einstein - elaborata dal mio amico Abhay Ashtekar - con una particolare versione quantistica della geometria spazio-temporale, in cui tutto viene descritto in termini di anelli. Anziché descrivere i fenomeni stabilendo la posizione di ogni particella, osserviamo il modo in cui questi anelli sono connessi fra loro. Questa formulazione della teoria dei quanti è stata ideata da me, dall'amico Carlo Rovelli e dal fisico uruguayano Rodolfo Gambini.

Il risultato principale di questa teoria è che, alla lunghezza di Planck (inferiore di venti potenze di dieci al nucleo atomico), lo spazio appare come una rete o un'onda di anelli discreti. E questi anelli sono qualcosa di simile agli atomi di cui è costituito lo spazio. Siamo così in grado di prevedere che nella scala dell'infinitamente piccolo i valori possibili delle superfici e dei volumi di una certa regione dello spazio sono discreti, allo stesso modo in cui lo sono i possibili livelli energetici degli atomi. Lo spazio macroscopico ci appare liscio, ma in realtà esso è il risultato di un numero enorme di questi anelli elementari connessi gli uni agli altri, proprio come una stoffa apparentemente uniforme è costituita da innumerevoli fili.

In questo ambito, inoltre, non esiste una geometria prestabilita, lo spazio non ha punti di riferimento fissi; tutto è dinamico e relazionale. È così che Einstein pensava la geometria dello spazio e del tempo. Adottando la configurazione ad anelli, siamo riusciti a tradurre questa impostazione nella teoria quantistica.

A mio avviso, l'idea più importante emersa dalla fisica e dalla cosmologia del xx

secolo è che le cose non hanno proprietà intrinseche, assolute: le proprietà non sono altro che relazioni fra le cose. Prima ancora che a Einstein, questa intuizione venne al filosofo del XVII secolo Gottfried W. Leibniz. Contrariamente a Newton, per il quale spazio e tempo erano assoluti, Leibniz riteneva che fossero aspetti delle relazioni fra le cose. Da allora nella fisica si sono scontrati i sostenitori delle entità assolute e del relazionalismo. Parteggiando decisamente per i secondi, non posso essere imparziale nel giudizio; tuttavia credo che gli ultimi sviluppi della fisica abbiano dato ragione proprio a loro.

Mi sembra inoltre che la visione relazionale possa dare importanti suggerimenti in merito ad altre questioni della fisica e dell'astronomia. Il problema forse più importante, relativo alla fisica delle particene elementari, consiste nell'individuazione di tutte le masse e le cariche delle particelle fondamentali. È mia convinzione che ciò sia in qualche modo legato a due domande basilari che gli scienziati vanno ponendosi da molti anni a questa parte. La prima si può formulare così: perché le leggi della fisica e le condizioni dell'universo sono tali da aver reso possibile la vita? La seconda domanda è strettamente legata alla prima: come mai, miliardi di anni dopo la sua nascita, l'universo è così ricco di strutture? Più che il mistero della vita, stupisce il fatto che da uno stato iniziale di uniformità ed equilibrio termico l'universo abbia potuto sviluppare una tale meravigliosa complessità strutturale a tutti i livelli, da quello subnucleare a quello cosmologico.

Il quadro che emerge sia dalla relatività sia dalla teoria quantistica raffigura un mondo intessuto da una rete di relazioni. La visione gerarchica di Newton, in cui atomi dotati di proprietà invariabili si muovevano sullo sfondo di uno spazio-tempo assoluti, è ormai tramontata. Questo non significa tanto che gli atomisti e i riduzionisti si siano sbagliati, quanto che le loro teorie vanno interpretate in modo più sottile ed elegante di come si sia fatto finora. Con la nostra descrizione della geometria dello spazio-tempo in termini di anelli e nodi intrecciati fra loro, abbiamo dato un'espressione matematica all'idea del carattere relazionale delle proprietà del reale.

Probabilmente questa concezione può avere una portata molto più generale. Più precisamente mi chiedo se, invece di ricorrere a leggi fisse della natura, il mondo nel suo complesso non vada considerato come un insieme di relazioni. Nella tradizione, le leggi fisiche sono qualcosa di dato per sempre in virtù di alcuni principi matematici assoluti; così concepite, esse governano la realtà determinando il comportamento delle particelle più piccole. Ci sono buoni motivi per credere che le forze fondamentali agiscano solo sulle particelle elementari. Tuttavia, nella fisica delle particelle si ipotizza anche la presenza di meccanismi o principi che selezionano quali leggi operano effettivamente in natura. Secondo la fisica, tali meccanismi o principi sono attivi solo in dimensioni molto piccole, molto inferiori a quelle dei nuclei atomici: un esempio di questo genere è la cosiddetta "rottura spontanea di simmetria". Poiché questa selezione delle leggi condiziona necessariamente l'universo nel suo complesso, mi sembra strano che non valga anche il reciproco, e cioè che tali meccanismi non subiscano a loro volta l'influenza della storia generale e della struttura complessiva dell'universo. Secondo me, comunque, è stato il fallimento della teoria delle stringhe a mandare in crisi l'idea secondo cui i meccanismi di selezione delle leggi agirebbero solo su scala molto piccola.

Come molti di coloro che hanno studiato fisica delle particelle negli anni Settanta e Ottanta, riponevo grandi speranze nella teoria delle stringhe e nella sua capacità di dar luogo a una teoria unificata. Oggi si può senz'altro dire che, se da un lato questa ardua costruzione intellettuale ha consentito di sviluppare idee molto interessanti dal punto di vista matematico, ha invece fallito come teoria delle particelle elementari. Infatti, mentre all'inizio pareva vi potesse essere una sola teoria delle stringhe coerente, ora ne esistono molte, e ognuna prevede un universo differente. Così essa non chiarisce perché nel nostro mondo esiste una certa collezione di particelle e di forze e

non un'altra. E qualunque sia il suo futuro, non credo che potrà mai dare una risposta a questo quesito.

Questa crisi mi instillò un dubbio: sarebbe mai stato possibile scoprire i principi della natura indagando solo la dimensione subatomica? Non era forse meglio cercare di correlare le proprietà delle particelle elementari a quelle del cosmo? In questo approccio non c'è nulla di mistico. Poiché nella sua lunga storia l'universo è passato attraverso una fase in cui era molto piccolo, deve esserci qualche meccanismo che sovrintende alle proprietà del mondo microscopico e di quello macroscopico. Circa cinque anni fa precisai meglio la questione, chiedendomi se le leggi delle particelle elementari potessero in qualche modo essere state selezionate dall'universo durante la sua evoluzione. Solo allora feci caso al fatto, sottolineato in passato da molti autori, che le caratteristiche generali dell'universo e quelle degli atomi e delle particelle sembrano fatte apposta per consentire lo sviluppo della vita. È plausibile ipotizzare che se le forze e le particelle in gioco fossero state altre, l'universo non avrebbe ospitato forme di vita e sarebbe stato anche infinitamente meno ricco di strutture e di varietà di fenomeni di quanto sia in realtà.

In genere chi ha fatto questa osservazione ha aderito al principio antropico, che subordina il particolare tipo di struttura dell'universo alla nostra esistenza quali osservatori intelligenti. Confesso che questo principio non mi convince né nella sua versione debole né in quella forte. La prima mi sembra inconsistente, in quanto afferma semplicemente che il mondo nel quale ci troviamo a vivere è molto speciale. L'idea è carina, ma non spiega proprio nulla. La versione forte sostiene invece che le leggi della fisica sono state selezionate affinché la vita possa aver luogo, tesi più vicina alla religione che alla scienza. Non a caso molti sostenitori di questo principio hanno scritto libri in cui tentano di conciliare la fisica con la teologia cristiana. Un proposito nobile, ma ben poco scientifico. Più convincente mi è parsa l'opinione di Martin Rees e Bernard Carr, secondo cui ciò che rende il cosmo un luogo così speciale consiste nella complessità e improbabilità delle sue strutture. Allora mi sono messo alla ricerca di un meccanismo fisico - entrato in azione nelle prime fasi dell'universo - che potesse giustificare lo sviluppo di un universo complesso e ricco di strutture.

A quel tempo divoravo libri di biologia: come quelli di Richard Dawkins sull'evoluzione, di Harold Morowitz sull'autorganizzazione e di James Lovelock e Lynn Margulis sulla teoria di Gaia. Queste letture mi fecero capire che la Terra poteva essere concepita come un sistema autorganizzato. Ma quello che valeva per il nostro pianeta poteva valere anche per le galassie o per l'intero universo. Questi pensieri mi vennero d'estate, mentre me ne andavo a zonzo in barca a vela. Ogni tanto la lascio andare alla deriva e mi chiedevo quale potesse essere la molla che fin dai primi istanti aveva spinto l'universo ad autorganizzarsi e a selezionare in modo non casuale le forze naturali e le proprietà delle particelle elementari. Giunsi alla conclusione che il principio in questione fosse quello della selezione naturale. Ma era sensato applicare questa legge all'universo? E se sì, come avrebbe potuto agire?

Trovai quasi subito la risposta: i tipi di particelle e di forze vengono selezionati in modo da massimizzare il numero di buchi neri nell'universo. Deve essere così per due motivi suggeritimi dalla gravità quantistica: prima di tutto perché dentro ai buchi neri gli effetti quantistici rimuovono la singolarità che la relatività generale ha previsto che ci fosse (grazie ai teoremi di Penrose e Hawking); in questo modo, sempre all'interno dei buchi neri, comincia a espandersi una nuova regione di universo come se si stesse verificando un big bang. Ricordo che un grande pioniere della gravità quantistica, Bryce DeWitt, mi parlò di questa idea nel periodo in cui lavoravo nel suo istituto. L'altra ragione per accettare la selezione naturale come motore cosmologico mi fu suggerita da un altro grande fisico, John A. Wheeler: secondo lui, nei buchi neri le proprietà delle particelle elementari e delle forze possono mutare a caso. Affinchè l'ipotesi della selezione naturale potesse funzionare, dovevo solo postulare che tali

mutamenti fossero molto piccoli, come quelli che avvengono nei geni. Dawkins mi aveva insegnato che tante piccole variazioni genetiche portano ai grandi mutamenti tipici della selezione naturale. A quel punto l'analogia era perfetta: gli universi stavano al posto delle specie animali e le proprietà delle particelle elementari al posto dei geni. Avevo quindi un meccanismo in base al quale agisce la selezione naturale: la variazione casuale dei parametri fisici dà vita a un gran numero di universi differenti, che tendono a produrre la quantità massima di buchi neri. A loro volta i buchi neri sono il mezzo attraverso cui si riproducono gli universi, un po' come gli organi sessuali sono il mezzo di riproduzione degli animali.

Era il 1989. Ancora oggi non so quanto questa idea sia fondata. Quello che posso dire è che, al contrario di altre teorie, essa è verificabile. Vediamo come. Cominciamo col dire che alla luce di questa teoria quasi ogni universo - e a maggior ragione il nostro - è "progettato" in modo da produrre la massima quantità possibile di buchi neri. Se immagino di cambiare il progetto di uno di questi universi - se cioè faccio variare una qualsiasi delle proprietà delle particelle elementari che lo costituiscono - il numero di buchi neri prodotti non può che diminuire.

Dopo aver approfondito le mie conoscenze di astronomia e astrofisica, provai dunque a cambiare la massa di una particella elementare o l'intensità di una forza per vedere se le nascite di buchi neri di quell'universo teorico sarebbero aumentate o diminuite. Nel primo caso la mia teoria sarebbe crollata, nel secondo invece avrebbe trovato una conferma. Ma per quanto provassimo a cambiare vari parametri, né io né astrofisici ben più esperti di me siamo riusciti a far aumentare il numero dei buchi neri. Anzi, abbiamo trovato parecchi modi per diminuirli.

Sarei molto grato a chi riuscisse a dimostrare che la mia teoria è sbagliata. In fondo non sarebbe un dramma, perché ciò che conta veramente è l'idea generale secondo cui esiste un meccanismo di autorganizzazione in grado di selezionare i parametri e le leggi della natura. Pare impossibile, ma dopo cinque anni questa teoria bizzarra regge ancora.

Studiando astronomia, mi sono sempre più convinto della giustezza di quest'ipotesi. Negli ultimi dieci anni chi studia le galassie ha potuto confermare la presenza di meccanismi di autorganizzazione e di retroazione. Senza di questi sarebbe difficile spiegare la formazione delle stelle e l'esistenza di galassie a spirale. Queste regioni celesti appaiono quindi sempre più simili a sistemi ecologici che ad ammassi amorfi di stelle e gas.

È probabile che i concetti di autorganizzazione e di complessità avranno un ruolo sempre più importante nella cosmologia. Anche la fisica delle particelle elementari subirà il fascino di queste idee. Ancora oggi molti fisici e biologi di punta, come Murray Gell-Mann, Stuart Kauffman e Harold Morowitz, ritengono che il mondo sia governato da sistemi complessi, mentre le leggi fondamentali della materia siano state fissate una volta per tutte, da Dio o dalla matematica. Anch'io lo pensavo, ma adesso non più: se la complessità ha un senso, deve riguardare sia il cosmo sia le particelle elementari.

Per dirla in altro modo, credo che la sintesi di relatività e fisica quantistica possa funzionare solo sotto il segno del concetto di autorganizzazione. Niels Bohr diceva che la teoria dei quanti ha senso a patto che nel mondo vi siano orologi e osservatori. Normalmente il problema non si pone, perché gli orologi e gli osservatori sono fuori dal sistema che stiamo studiando, e così ne possiamo semplicemente presupporre l'esistenza. Ma se applichiamo la teoria dei quanti all'intero universo, non c'è più un "fuori" dove collocare osservatori e orologi.

Inoltre, per ospitare cose come osservatori e orologi, l'universo deve essere complesso - tanto complesso da aver reso possibile la vita di soggetti intelligenti. Quindi la teoria quantistica dell'universo deve accettarne la complessità e spiegare

perché si è manifestata. Ne consegue che ci deve essere una relazione fra teoria dei quanti, relatività e autorganizzazione. Come si potrebbe, altrimenti, dare una descrizione del mondo basata sulla meccanica quantistica e sulla relatività? Come abbiamo visto, esse presuppongono la complessità da un punto di vista logico, ma solo i meccanismi di autorganizzazione possono generare un universo complesso.

Anche partendo dalla descrizione relativistica dello spazio si arriva alle medesime conclusioni. Secondo la relatività generale, infatti, ha senso parlare dello spazio come insieme di punti diversi, o del tempo come un susseguirsi di istanti separati, solo a patto che i punti e gli istanti possano essere distinti in base a ciò che vi sta accadendo. In altre parole, se nella relatività generale si può parlare di tre dimensioni spaziali e di una dimensione temporale è perché da ciascuno di questi punti nello spazio e nel tempo si ha una visione diversa e unica dell'universo. Altrimenti non li si potrebbero distinguere l'uno dall'altro. Questo però significa che il mondo è sufficientemente complesso da consentire a una persona di dire dove si trova semplicemente guardandosi intorno. Pertanto, anche la teoria della relatività generale deve presupporre la complessità e, se vuole descrivere l'universo nel suo complesso, deve darne una spiegazione.

I temi della complessità e dell'autorganizzazione sono intimamente collegati ai concetti di spazio e tempo, di cui si sta occupando con non poche difficoltà la teoria della gravità quantistica. Nei prossimi anni la fisica delle particelle e la cosmologia si muoveranno in questo nuovo quadro concettuale, e questa è una prospettiva molto affascinante. A dire il vero, molti miei colleghi stanno ancora perdendo tempo sulla teoria delle stringhe, ma i fisici con più talento - come Alexander Polyachov e Holgar Nielsen - hanno cambiato rotta e adesso studiano il modo in cui l'universo riesce a regolare le proprietà delle sue particelle elementari.

Per concludere, vorrei raccontare brevemente come lavora il fisico teorico, perché spesso ne abbiamo un'idea poco veritiera. Occuparsi di gravità quantistica, per esempio, significa partecipare a una grande ricerca, che in parte si conduce da soli e in parte all'interno di una comunità scientifica, sotto le insegne di una nobilissima tradizione. La scienza è un'attività molto più sociale di quanto si creda. Si viaggia molto e si passa gran parte del tempo a parlare di lavoro con amici e colleghi. In fisica si discute in continuazione. A studiare gravità quantistica siamo poche centinaia di ricercatori in tutto il mondo e ci conosciamo tutti; con molti di loro ho contatti quotidiani. Quello che proprio non capisco è perché ci siano così poche donne nella mia comunità scientifica. Adesso stanno un po' aumentando, ma rimangono una esigua minoranza. Chissà perché, bisognerebbe studiare la cosa.

Nelle scienze di base, però, c'è spazio anche per un confronto intimo, personale, con la natura. A pensarci bene, se mi arrovello intorno al concetto di tempo è per cercare di cogliere il segreto della mia esistenza e di quella del mondo. Facendo scienza tento di vincere lo sconcerto che mi coglie sapendomi una piccola creatura in un universo enorme. Essere scienziato significa anche rendersi personalmente responsabili di ciò in cui si crede.

Un ricercatore è libero di pensare e studiare quello che vuole, ma è anche tenuto ad accettare l'esistenza di una comunità che alla fine giudicherà quello che ha fatto. Perciò l'etica della scienza è basata sull'onestà e sul rispetto per le idee altrui, ma anche sul valore delle differenze individuali e del disaccordo. Dopo una lunga lotta fra teorie avverse, in una comunità scientifica sana si forma sempre un certo consenso su alcune cose e un dissenso feroce su altre. E guai se non fosse così: dove c'è unanimità la scienza muore.

Martin rees Una delle mete più ambiziose della fisica è di accordare la gravità con la teoria quantistica delle particelle elementari. Vi sono diverse scuole di pensiero a

questo proposito: quella di Stephen Hawking, quella di Roger Penrose e molte altre ancora. Secondo me, benché si sia ancora molto lontani da un accordo in questo campo, il contributo di Smolin e Ashtekar è stato molto importante.

Quando John Wheeler ne parlò negli anni Cinquanta, la gravità quantistica era ancora un argomento di frontiera. Oggi se ne discute con cognizione di causa, anche se le prove sperimentali non sono ancora disponibili. Lee Smolin fece un passo decisivo quando propose di trattare lo spazio e il tempo come una struttura elastica su scala molto piccola. Ispirato da Wheeler, che aveva parlato di "schiuma spaziotemporale", Smolin sostenne che nel mondo ultramicroscopico il tempo e lo spazio non erano più caratterizzati rispettivamente da una e da tre dimensioni, ma da un intrico molto complesso di più dimensioni.

Un'altra idea di Smolin è la "selezione naturale" degli universi. Secondo lui, quelli più ricchi di complessità si riproducono in modo più efficiente degli altri. L'insieme di tutti questi universi si evolve a sua volta secondo leggi molto complicate. Quando muoiono, talvolta le stelle formano dei buchi neri. Secondo Smolin, in un buco nero può gemmare un nuovo universo. Noi non lo vediamo, perché esso si espande in una nuova dimensione. Stabilito questo, Smolin afferma che le leggi fisiche del nuovo universo non differiscono molto da quelle del progenitore. In questo si differenzia dall'idea di un insieme cosmologico casuale sostenuta da Andrej Linde. Questo significa che gli universi più complessi, in cui molte stelle nascono, si evolvono e muoiono, hanno una progenie più numerosa, grazie alla proliferazione di buchi neri. L'insieme di questi universi non si evolve a caso ma secondo una sorta di selezione darwiniana, che premia quelli più ricchi di strutture.

È difficile giudicare una teoria simile, anche perché non sappiamo quasi niente della fisica di stati caratterizzati da densità così elevate. Tuttavia va aggiunto che l'ipotesi di Smolin può essere, almeno in via di principio, sottoposta a prove sperimentali. Abbiamo, infatti, sufficienti informazioni sull'evoluzione delle stelle, e sappiamo quali di esse diventano buchi neri e quali si trasformano invece in stelle di neutroni. Ed è appunto su questo che io e altri colleghi stiamo lavorando.

Si può ipotizzare che, mutando anche di poco le leggi della fisica, cambi il numero dei buchi neri. Poniamo, per esempio, di variare la forza di gravità, o la massa del neutrone: quali saranno le conseguenze sull'evoluzione delle stelle, e come cambierà la loro propensione a trasformarsi in buchi neri? Se Smolin ha ragione, e se questo insieme si è evoluto attraverso un numero sufficiente di generazioni di universi, il nostro cosmo dovrebbe essere governato da leggi che massimizzano il numero di universi-figli.

Questa congettura è verificabile a una condizione: che, per quanto variamo le leggi della fisica, gli universi ottenuti producano sempre un numero di buchi neri inferiori al nostro. Purtroppo non credo che questo sia vero. È possibile, infatti, cambiare le leggi fisiche in modo da ottenere un universo che produce più buchi neri del nostro. Dunque la teoria di Smolin è confutata, ma se è confutabile significa anche che è scientifica.

murray gell-mann Smolin? Ah, sì. È quel giovanotto con quelle idee pazzesche? Ha sicuramente ragione da vendere!

roger penrose Il tentativo di Smolin di unire i livelli quantistici con quelli della fisica classica è diverso dal mio. Ne abbiamo parlato insieme più volte. Ha un'ottima conoscenza della fisica contemporanea, ma nel contempo è sufficientemente critico nei suoi confronti, nel senso che ne conosce i limiti e cerca di migliorarla. Credo che sia un fisico critico di grande originalità. Trovo inoltre molto interessanti le idee

cosmologiche di Smolin e Rovelli. Non so dire che destino avranno, ma mi sembrano davvero promettenti.

paul davies Ho incontrato Lee Smolin solo una volta e ho capito subito che tipo era. Come John Archibald Wheeler è dotato di una grande libertà intellettuale ed è capace di portare le sue idee alle estreme conseguenze, senza per questo prendersi troppo sul serio. La fisica e la cosmologia sono il paese della cuccagna per gente così, che sa essere utile alla scienza inventandosi teorie bizzarre e non necessariamente vere. Se poi lo sono, tanto meglio.

alan guth Essendo approdato alla teoria della relatività dopo Hawkings e Penrose, Lee Smolin ha dovuto affrontare un altro genere di questioni. Invece della relatività generale classica, egli si è occupato di una teoria quantistica della relatività, o più precisamente della gravità quantistica.

Così come è stata formulata da Einstein, la relatività generale è una teoria classica, nel senso che tutte le grandezze previste in essa hanno un valore definito in ogni istante, e che le sue equazioni descrivono il modo in cui queste grandezze variano nel tempo. Nella relatività generale non c'è posto per la probabilità; ogni cosa è definita con precisione. Tuttavia, nei primi decenni del xx secolo i fisici hanno imparato che il mondo reale è tutta un'altra cosa.

Esso viene descritto dalla teoria dei quanti, in cui niente può essere misurato con precisione, nemmeno in via teorica. L'universo, o anche una sua singola parte, si configura in modo incerto, sicché si possono fare solo previsioni probabilistiche. La tal cosa può accadere al 30 per cento, la tal'altra al 17 per cento e così via. Spesso la probabilità di un certo evento sfiora il cento per cento; ma il punto è che la certezza può essere sfiorata, non raggiunta.

Oggi siamo tutti convinti che relatività generale e fisica quantistica vadano riunite in una sola teoria in grado di descrivere correttamente il comportamento della gravitazione e dello spazio. Finora, però, abbiamo avuto solo successi parziali. Quando si cerca di combinare la relatività con la meccanica quantistica seguendo lo stesso approccio adottato in passato per sposare elettromagnetismo e quanti, la cosa non funziona. Calcoli alla mano, molte grandezze diventano infinite e quindi inutili.

Per questo sono state tentate altre strade ed è qui che si colloca il lavoro di Lee Smolin. Gran parte dei fisici delle particelle ha pensato che la soluzione del problema della gravità quantistica stesse nella teoria delle superstringhe. Secondo questa concezione, l'entità fondamentale in natura è una stringa microscopica, un oggetto di larghezza quasi nulla e lunghezza minima, che rappresenta il mattone delle costruzioni più grandi.

Con l'accorgimento delle superstringhe si è creduto di poter superare le difficoltà in cui si dibattevano i fisici. Si è dimostrato, infatti, che almeno per i tipi di calcolo conosciuti questa teoria consente di evitare il problema degli infiniti della gravità. Quello che i sostenitori delle superstringhe devono ancora dimostrare è che la teoria può descrivere la nostra realtà, con i suoi oggetti e le sue basse energie.

Se la rivista "Discover" ha recentemente definito Lee Smolin "Il nuovo Einstein" è perché egli sta cercando di ottenere questa sintesi concettuale partendo dalla relatività generale. La teoria delle superstringhe, invece, ha relegato Einstein sullo sfondo, considerando valida la relatività solo a bassi livelli di energia.

Nella fisica di Smolin, l'ingrediente fondamentale resta il campo gravitazionale, trattato però secondo la meccanica quantistica. È possibile fare questo? Smolin pensa di sì, perché la teoria della gravità è essenzialmente non lineare. E questa non linearità

può essere tradotta in termini fisici ipotizzando l'esistenza di gravitoni, particelle portatrici dell'energia gravitazionale così come i fotoni sono particelle di energia luminosa. C'è però un'importante differenza: mentre i fotoni non producono altri fotoni, i gravitoni dovrebbero produrre dei loro simili. Questi, infatti, trasportano energia e ogni forma di energia genera un nuovo campo gravitazionale e dunque nuovi gravitoni. Il fatto che la gravitazione produca se stessa ha creato una serie di difficoltà insuperabili, tra cui il sorgere di infiniti quando si prova a calcolare.

Quello dei fisici relativisti è un club ristretto, che deve ancora convincere il resto della comunità scientifica. Tutti sono molto interessati ad ascoltare Lee Smolin e i suoi accoliti, ma ciò non toglie che la maggioranza dei fisici propenda per la teoria delle superstringhe.

18. Paul Davies

La via sintetica

Paul Davies è un fisico teorico e insegna filosofia naturale all'Università di Adelaide. È autore di molti libri, tra cui *Universi possibili* (1980, tr. it. 1981), *Dio e la nuova fisica* (1983, tr. it. 1986), *Superforza* (1984, tr. it. 1986), *The Cosmic Blueprint* (1989) e *Gli ultimi tre minuti* (1994, tr. it. 1994); con John Gribbin ha scritto *The Matter Myth* (1992).

La gente è molto interessata al tema delle origini. E non mi riferisco solo all'origine dell'universo, ma anche a quelle della vita e della coscienza. L'interesse nasce dal fatto che su questi tre argomenti possiamo dare solo risposte congetturali, e non è un caso se i credenti vorrebbero ricondurli a un presunto intervento divino. Chi subisce di più il fascino dell'origine dell'universo rispetto a quello della coscienza e della vita trova che ci sia qualcosa di sbagliato nel modo in cui questi temi vengono presentati. Dal punto di vista degli esseri umani, sono tutti ugualmente profondi e importanti.

Fin da giovane mi sono occupato della questione della cosiddetta "freccia del tempo", che si potrebbe formulare così: perché la maggioranza dei processi fisici si sviluppa verso il futuro, mentre le leggi fondamentali che governano tali processi non hanno una direzione temporale obbligatoria? Ho cominciato a interessarmi della faccenda dopo aver letto un paio di lavori in cui John Wheeler e Richard Feynman tentavano di spiegare perché i segnali radio arrivano al ricevitore sempre dopo aver lasciato il trasmettitore, e mai viceversa. La loro spiegazione esordiva ipotizzando la possibilità di onde elettromagnetiche simmetriche nel tempo (in grado cioè di spostarsi nel passato e nel futuro). Quindi giustificava l'esistenza solo di onde che si spostavano avanti nel tempo ponendo la condizione di un universo caratterizzato dalla presenza di emittenti e assorbitori di onde elettromagnetiche. Questo mi ha indotto a investigare su una serie di altri campi in cui la simmetria temporale viene infranta. A 24 anni scrissi su questo tema il libro *The Physics of Time Asymmetry*. In realtà, altro non era che un approccio preliminare a uno dei maggiori rompicapi della fisica. Ciononostante, molte personalità come John Wheeler, Roger Penrose e Martin Gardner ne dissero un

gran bene. Feynman, addirittura, lo raccomandò a un suo collega.

In quanto a scoperte, il mio nome è associato di frequente a uno strano effetto che ho rilevato nella teoria dei campi quantistici. Immaginate un vuoto assoluto, dove non ci sia l'ombra di una particella, nemmeno di un fotone. Ora immaginate di accelerare attraverso questo vuoto. Cosa vedete? Niente? Risposta sbagliata: a differenza del vostro amico che non ha accelerato, voi osserverete un "bagno" di radiazioni di calore. Allo stesso effetto - riconducibile teoricamente alla scoperta di Stephen Hawking secondo cui i buchi neri irradiano calore - è giunto per un'altra via Bill Unruh, fisico all'Università della British Columbia. Quando presentai questo risultato a metà degli anni Settanta, non gli diedi molto peso. Il fenomeno è piuttosto insignificante ed è anche abbastanza semplice da dimostrare; non pensavo che avrebbe potuto interessare molti studiosi. Ancora oggi, invece, continuano a uscire lavori che approfondiscono ora l'uno ora l'altro aspetto della "radiazione da accelerazione".

Dopo questo successo inatteso mi misi a lavorare sulla teoria dei campi quantistici nello spazio-tempo curvo, ossia in presenza di campi gravitazionali. Il libro che scrissi assieme al mio studente Nick Birrell, intitolato *Quantum Fields in Curved Space*, è tuttora - con mia grande soddisfazione - il testo principale sull'argomento. Molti erano gli aspetti della teoria dei quanti che attiravano il nostro interesse. Ci chiedevamo, per esempio, se l'espansione dell'universo potesse generare nuove particelle; in che modo il campo gravitazionale potesse interferire con quello quantistico e come quest'ultimo retroagisse sul primo. Si trattava cioè di studiare come questi campi agiscono in diversi modelli di universo. Su uno di questi modelli, elaborato dal cosmologo olandese Willem de Sitter, io e un altro mio studente, Tim Bunch, abbiamo condotto diverse ricerche. Da una di queste abbiamo ricavato il concetto di uno stato quantistico vuoto particolarmente interessante, noto da allora come il vuoto di Bunch-Davies. Non mi passò nemmeno per la mente, a quel tempo, che una teoria del genere potesse trovare qualche applicazione. E fu una piacevole sorpresa scoprire che, tutto a un tratto, lo "spazio" di de Sitter era diventato un cardine della teoria dell'universo inflazionario di Alan Guth, e che i ricercatori cominciarono a usare il vuoto di Bunch-Davies nei loro calcoli.

Ho lavorato parecchio tempo anche sui buchi neri e le loro proprietà termodinamiche, scoprendo, per esempio, che se un buco nero ha una carica elettrica sufficientemente grande può rimanere in equilibrio circondato da un bagno di calore, invece di evaporare e scomparire nel modo descritto da Hawking. Anche l'affascinante idea di Penrose, secondo cui la gravitazione rappresenterebbe una sorta di entropia, mi ha indotto a scrivere molti lavori negli anni Ottanta, senza tuttavia arrivare a risultati convincenti.

Il modo in cui Alan Guth approdò alla teoria inflazionaria merita di essere raccontato per la sua stranezza. In quegli anni, Guth si stava occupando di un problema piuttosto specifico connesso ai cosiddetti monopoli magnetici. La teoria standard del big bang, insieme a tutto ciò che conosciamo della fisica delle particelle, prevedeva la presenza di una grande quantità di monopoli magnetici, che invece non sono mai stati osservati. Il fisico americano si chiedeva come potevano essere scomparsi. Un modo molto elegante per sbarazzarsene era quello di ipotizzare che l'universo si fosse espanso a un ritmo così elevato da "diluire" la densità di questi monopoli.

Più esperto di fisica delle particelle che di cosmologia, Guth azzardò l'idea che nella prima frazione di secondo della sua esistenza, l'universo facesse uno straordinario balzo di dimensioni. Solo dopo ci si accorse che questo *escamotage* tecnico, ipotizzato per sbarazzarsi dei monopoli magnetici, poteva rispondere ad alcune questioni cosmologiche fondamentali: ossia, se l'universo si espande precisamente alla velocità necessaria per sfuggire alla sua stessa forza di gravità, e se le fluttuazioni quantistiche conseguenti a quella espansione danno il tipo di spettro

osservato recentemente dal satellite cobe. È interessante notare come Guth sia entrato nel dibattito cosmologico dalla porta di servizio e abbia scoperto da allora una ricca miniera di idee rivoluzionarie. Oggi la teoria inflazionaria rappresenta la spiegazione più accreditata dell'origine dell'universo.

Solo venticinque anni fa, cercare di dare una spiegazione fisica all'origine dell'universo veniva considerata un'eresia. Ricordo ancora una conferenza a cui assistetti appena laureato all'University College di Londra, circa due anni dopo la scoperta, avvenuta nel 1965, della radiazione cosmica di fondo. Il relatore spiegò come, dall'analisi dei processi nucleari avvenuti nei primi minuti dopo il big bang, si poteva desumere che nell'universo ci fosse il 75% di idrogeno e il 25% di elio. A questa affermazione la sala esplose in uno sghignazzo generale: come si poteva essere così folli da parlare dei primi tre minuti di vita dell'universo basandosi su quella radiazione a microonde? Oggi nessuno si stupisce più e la prima infanzia dell'universo pare non avere più segreti.

Da semplice descrizione, il big bang è diventata una spiegazione dell'origine dell'universo. Si tratta di una differenza fondamentale. Descrivere significa dire semplicemente che le cose avvengono in un certo modo: ossia, che le cose sono come sono perché erano come erano. Oggi abbiamo qualcosa di molto più vicino a una spiegazione scientifica, in base alla quale possiamo affermare non solo che il big bang si è verificato, ma anche ricondurne le caratteristiche salienti a una teoria fisica confermata dai dati del satellite cobe.

L'evoluzione della teoria del big bang ci porta a discutere del principio antropico, secondo cui il mondo che vediamo è tale perché noi siamo qui a vederlo, in questa precisa localizzazione nello spazio e nel tempo. Il principio antropico conosce molte varianti, più o meno sostenibili. Ma il loro minimo comun denominatore è che la nostra scienza non può fare a meno della presenza dell'uomo. Più esplicitamente potremmo dire che, nonostante gran parte dell'universo sia uno spazio vuoto, noi ci troviamo sulla superficie di uno dei suoi pianeti. La nostra è una localizzazione molto atipica, ma non è sorprendente il fatto che ci troviamo proprio qui, visto che non potremmo vivere in altri luoghi dello spazio. Il modo in cui noi osserviamo l'universo dipende quindi dalla nostra posizione e dal momento in cui lo stiamo osservando.

Detto questo, si tratta di vedere se l'assunzione del principio antropico costituisca una semplice interpretazione dell'universo o se in qualche modo sia in grado di spiegarne la struttura. Se c'è un solo universo, è evidente che la nostra presenza in esso è riconducibile a un punto di vista interpretativo; se invece ammettiamo una pluralità di universi, dotati di leggi e condizioni diverse, la nostra esistenza spiega molte cose, o meglio esercita un principio di selezione. L'ordine che noi constatiamo nell'universo si spiega in parte con il fatto che esso è uno dei pochi universi conoscibili. Alcuni studiosi hanno portato questo principio a conseguenze estreme e - aggiungo io - ridicole, concludendo che in natura non esistono leggi ma solo il caos; secondo costoro, l'universo ci appare ordinato solo in quanto lo abbiamo selezionato dall'insieme infinito di universi caotici.

È facile dimostrare la falsità di questa concezione caricaturale del principio antropico. L'universo è effettivamente retto da leggi e principi razionali, che sono in parte indipendenti dalla nostra capacità di percepirli. Bisogna rendersi conto che qui sono in gioco due principi diversi: il primo è di tipo razionale e asserisce che il mondo è dotato di un ordine matematico; il secondo è il principio antropico, per il quale, probabilmente, fra i tanti mondi possibili questo tipo di mondo è quello che noi riusciamo a osservare.

La nostra scienza ha, senza dubbio, una componente antropica. Per trecento anni abbiamo creduto all'obiettività assoluta, ma oggi questa posizione non è più sostenibile. Il nostro statuto di osservatori privilegiati nell'universo è intrinseco alla

nostra attività conoscitiva. Tuttavia è molto facile trarre conclusioni avventate da questo principio. Certamente esso non implica che la nostra esistenza eserciti una compulsione teologica o causale sulle leggi dell'universo. In altre parole, non siamo certo noi a crearlo.

Siamo ormai prossimi a individuare la natura dei mattoni che compongono la materia. Questo approccio riduzionista, benché importantissimo per la fisica, non esaurisce il nostro compito conoscitivo. Una cosa, infatti, è disegnare l'armatura fisica del mondo, costituita dalle diverse particelle elementari, un'altra è occuparsi di sistemi complessi come l'origine della coscienza e della vita. Per comprendere il comportamento di questi sistemi non possiamo limitarci a elencare i loro componenti, dobbiamo penetrarne l'intima organizzazione dinamica. Qui il metodo riduzionista, che cerca di ricostruire la realtà sommando le sue singole parti, non funziona, poiché tali sistemi sembrano rispondere e adattarsi alle condizioni ambientali come gli organismi biologici.

Spero che in futuro i biologi smetteranno di redarguire i fisici per ogni loro tentativo di abbandonare il riduzionismo. Forse il dogmatismo riduzionista dei biologi dipende dalla incertezza dei fondamenti della loro disciplina, mentre i fisici sono abituati a muoversi da almeno trecento anni su un terreno molto più sicuro. Ecco perché ora osano addentrarsi senza particolari patemi d'animo nei nuovi territori della complessità. Ma credo che tra venti-trent'anni le due comunità avranno superato la barriera che ancora li divide e potranno cominciare a parlare una lingua comune.

Esistono due vie per investigare il mondo: la via riduzionista e quella sintetica. La seconda attiene allo studio della complessità, che non va confusa con la mera complicazione o con la somma di sistemi semplici. I sistemi complessi sono caratterizzati piuttosto da leggi e principi propri.

La complessità è il futuro della fisica. Attualmente la domanda cruciale che si pongono i fisici è la seguente: il programma riduzionista può essere completato? Nella sua famosa allocuzione del 1979, quando fu chiamato alla cattedra lucasiana, Stephen Hawking disse che la fisica teorica stava arrivando al capolinea. Con questo voleva dire che si stava chiudendo l'era della scienza riduzionista. E non è escluso che tra qualche anno potremo stampare sulle magliette una sola formula matematica che racchiuda tutte le particelle e le forze in gioco nell'universo. Nascerà allora la scienza della complessità, una visione olistica del mondo dove fisici e biologi collaborano a uno stesso progetto di ricerca.

Siamo ancora in una fase di transizione, in cui il vecchio stenta a tramontare: da una parte i fisici cominciano a speculare sugli aspetti qualitativi e organizzativi dei sistemi complessi, dall'altro i biologi si arroccano nel caro vecchio riduzionismo, secondo cui la vita non è altro che una interazione inconsapevole di singole particelle, governate da forze cieche e senza scopo. I fisici parlano spesso di una "teoria del tutto". Ma il tutto non va qui inteso come "ogni cosa": sappiamo bene che non potremo spiegare le fluttuazioni dei mercati azionari e tantomeno l'origine della vita. Essa è piuttosto la sintesi concettuale di tutti i sistemi parziali di cui è costituito il mondo.

martin rees Conosco Paul Davies da quando faceva il postdottorato all'Istituto di astronomia di Cambridge; siamo quasi coetanei. Cominciò allora, con il primo libro, la sua carriera di brillante e profondo divulgatore della fisica. I suoi libri sono straordinariamente chiari e meritano tutti gli encomi che hanno ricevuto. Forse meglio di lui c'è solo Heinz Pagels. Ma nel campo della cosmologia e della fisica delle particelle non credo ci sia nessun altro autore altrettanto chiaro e fantasioso.

alan guth Paul Davies è un buon divulgatore e un buon fisico. Il suo nome è

legato soprattutto alla ricerca nel campo della gravità quantistica, anche se non si sta muovendo nella stessa direzione di Lee Smolin o di coloro che si interessano alla teoria delle superstringhe. La sua è un'impostazione essenzialmente pragmatica.

Paul Davies è il tipo di ricercatore che preferisce risolvere metà del problema piuttosto che non risolverlo affatto. Smolin, invece, propone una soluzione globale, come anche coloro che si occupano di superstringhe. Resta da vedere, però, se queste soluzioni sono vere o fasulle. Il lavoro più importante di Davies riguarda la teoria del campo quantistico nello spazio curvo. Così facendo egli ha affrontato, in effetti, metà della questione: i campi di materia che descrivono elettroni, protoni, neutroni e fotoni (in questo contesto i fotoni contano come materia) vengono trattati secondo la fisica relativistica e la meccanica quantistica, mentre la gravitazione viene trattata in forma classica. Davies si è posto un programma realistico, ancorché difficile, e così è riuscito ad arrivare prima di altri a certe soluzioni matematiche.

Parte quarta

L'algoritmo di Darwin

I sacerdoti della nuova scienza della complessità sono il fisico Murray Gell-Mann, il biologo Stuart Kauffman, l'informatico Christopher G. Langton e il fisico J. Doyne Farmer, insieme ai loro colleghi che frequentano i National Laboratories a Los Alamos e il Santa Fé Institute.

Il Santa Fé Institute fu fondato nel 1984 da Gell-Mann, che a quell'epoca si trovava al California Institute of Technology (Caltech), e dal chimico di Los Alamos George Cowan. Si dice che sia diventato in breve tempo il rifugio dei fisici che non ne potevano più del solito tran tran della vita di laboratorio. E in effetti a Santa Fé si conduce un genere di ricerca che non ha più nulla a che spartire col vecchio riduzionismo.

Considerato uno dei più grandi fisici delle particelle del secolo (insieme al suo collega del Caltech Richard Feynman), Murray Gell-Mann ricevette il premio Nobel per il lavoro svolto negli anni Cinquanta e Sessanta sui quark. Dopo una vita passata ai vertici della fisica delle particelle, solo recentemente Gell-Mann ha cominciato a interessarsi di sistemi complessi adattativi.

Il suo modello del mondo è basato sull'informazione: il suo approccio connette le leggi fondamentali della fisica alla complessità che emerge da quelle stesse leggi e a ciò che definisce "accidenti congelati", ossia a eventi che si verificano per caso ma che sono in grado di mutare il corso delle cose. Questo tipo di ricerca che investiga l'intreccio di leggi semplici e sistemi complessi, applicabile non solo alla natura ma anche al mondo del linguaggio e dell'economia, è stata battezzata da Gell-Mann con un neologismo che

spiegheremo nel capitolo successivo: *plectics*.

Stuart Kauffman è un biologo teorico che studia le origini della vita e dell'organizzazione molecolare. Venticinque anni fa elaborò i "modelli Kauffman", sorta di reti casuali (o stocastiche) che rivelano un comportamento caratteristico di autorganizzazione chiamato ordine gratuito. Kauffman è tutt'altro che facile, poiché utilizza modelli matematici piuttosto ostici per i suoi colleghi biologi. Se dovessi sintetizzare il suo pensiero, direi che nell'evoluzione della vita il ruolo decisivo è giocato dai flussi convergenti piuttosto che da quelli divergenti. Insieme al collega Christopher Langton, egli è convinto che i sistemi complessi più in grado di adattarsi sono quelli che si trovano al margine fra ordine e caos.

Kauffman pone una domanda che va oltre a quelle classiche formulate dai teorici dell'evoluzionismo: se la selezione naturale è sempre all'opera, come possiamo ammettere forme di autorganizzazione, di ordine gratuito? La cosa sembra essere possibile solo alla luce di una nuova biologia - simile per certi versi a quella di Brian Goodwin - che sintetizzi teoria della selezione naturale e strutturalismo.

Christopher Langton studia l'evoluzione al computer. Egli è alla ricerca del cosiddetto "algoritmo di Darwin", ossia la procedura in grado di ricostruire, passo dopo passo, il processo evolutivo in tutta la sua stabilità e differenziazione. Il lavoro di Langton consiste nel simulare l'evoluzione al calcolatore con un programma di vita artificiale. Questo è possibile elaborando "ecosistemi virtuali" in cui popolazioni di "animali" semplificati possano interagire, riprodursi ed evolversi. Sembra un videogioco ma in realtà è qualcosa di profondamente innovativo, che consentirà di studiare la complessità della vita, dell'intelligenza e della coscienza partendo da informazioni di base. In questo, il suo lavoro richiama alla mente quello di Marvin Minsky, Roger Schank e Daniel Dennett. Con questo nuovo approccio informatico, Langton spera di cogliere aspetti della vita che sfuggono all'osservazione naturalistica.

Doyne Farmer è uno dei pionieri della teoria del caos, secondo la quale anche gli eventi casuali seguono un ordine riconducibile a leggi. Farmer ha mostrato anche i curiosi risvolti pratici di questa teoria, asserendo di poter sbancare al gioco della roulette con l'aiuto delle leggi della fisica. Non solo: ha pure fondato una società che opera sui mercati finanziari in base a modelli di previsione elaborati da lui.

Oppenheimer Fellow al Centro per gli studi nonlineari di Los Alamos, Farmer ha costituito in seguito il Gruppo dei sistemi complessi, di cui sono entrati a far parte i più grandi talenti in questo campo, come Christopher Langton, Walter Fontana e Steen Rasmussen. Oltre alla teoria del caos, Doyne Farmer ha dato importanti contributi in altri settori dei sistemi complessi, fra cui la *machine learning* - ossia un modello di macchina in grado di apprendere da sola -, un modello del sistema immunitario e uno dell'origine della vita.

19. Murray Gell-Mann

Plectics

murray gell-mann è un fisico teorico. Professore emerito di fisica teorica presso il California Institute of Technology, ha vinto il premio Nobel nel 1969. Ha fondato il

Santa Fé Institute, dove attualmente insegna e riveste la carica di copresidente del comitato scientifico. Dirige inoltre la Mac Arthur Foundation ed è stato uno dei Global Five Hundred premiato dall'Environment Program delle Nazioni Unite. È membro del President's Committee of Advisors on Science and Technology. Ha scritto *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simplex and the Complex* (1994).

Quand'ero ragazzino mi interessavo molto di storia naturale, linguistica e archeologia. Benché vivessi nel centro di New York, riuscivo a scovare piccoli giardini dove scoprivo nuovi uccelli, farfalle e piante fiorite. Già allora ero affascinato dall'evoluzione biologica e dall'evoluzione della cultura umana. Quindi non è così strano che abbia voluto capire i rapporti che intercorrono fra le leggi fisiche dell'universo e l'insieme dei fenomeni ricchi e complessi che vediamo intorno a noi e di cui siamo parte.

Per fare questo bisogna considerare il mondo dal punto di vista dell'informazione. Ci accorgiamo allora che lo schema di base è caratterizzato da una complessità che parte da regole molto semplici, da un ordine iniziale e dall'opera del caso reiterata infinite volte. Se consideriamo l'universo nel suo complesso, scopriamo che le sue regole semplici sono le leggi della fisica.

Vi sono molte cose che possono essere comprese sotto il nome di "complessità". Quando questo termine viene applicato a un fenomeno, significa che lo riferiamo a un contesto; in altre parole, tale complessità dipende non solo dal fenomeno che si vuol descrivere, ma anche da chi lo sta descrivendo.

In particolare, c'è una quantità che mi sembra meriti il nome di "complessità effettiva", mentre un'altra, per molti versi affine, l'ho battezzata "complessità potenziale". Di entrambe sto cercando di fornire una trattazione matematica rigorosa. Vi sono poi altri generi di complessità che meritano un approfondimento.

In ogni caso adoperare il termine di complessità per le cose che stiamo studiando può risultare fuorviante, giacché la semplicità che caratterizza le regole sottostanti è un aspetto altrettanto fondamentale della nostra ricerca. In altre parole, noi studiamo sia la semplicità sia la complessità, nella duplice forma dei sistemi complessi adattativi e non adattativi. Ho cercato di sintetizzare tutto il campo d'indagine con un neologismo *-plectics* - che deriva dalla parola greca *πλεκτός*, che significa "attorcigliato", "intrecciato". La parola latina corrispondente è *plexus* ("intrecciato"), da cui deriva *complex*, che originariamente significava "congiunto, intricato, intrecciato insieme". Il verbo latino *plicare* (piegare) rimanda a sua volta a *simplex* (semplice), che in origine voleva dire "piegato una volta".

Plectics, pertanto, è lo studio del semplice e del complesso. Con esso si intendono i vari tentativi di definire la complessità; lo studio del ruolo della semplicità, della complessità e dell'informazione classica e quantistica dell'universo; la fisica dell'informazione; lo studio della dinamica nonlineare (compresi la teoria del caos, degli attrattori strani e l'autosimilarità nei sistemi complessi non adattativi nelle scienze fisiche) e lo studio dei sistemi complessi adattativi. Di questi fanno parte l'evoluzione chimica prebiotica; l'evoluzione biologica, il comportamento di organismi singoli, il funzionamento degli ecosistemi, del sistema immunitario dei mammiferi, l'apprendimento e il pensiero, l'evoluzione delle lingue umane, l'ascesa e la caduta delle culture umane. E ancora il comportamento dei mercati e il funzionamento di calcolatori programmati per mettere in atto strategie, come sviluppare dei giochi o risolvere automaticamente certi problemi.

Al Santa Fé Institute, che ho contribuito a creare nel 1984, lavorano fianco a fianco matematici, informatici, fisici, chimici, neurobiologi, immunologi, biologi dell'evoluzione, ecologi, archeologi, linguisti, economisti, scienziati della politica e

storici. Molti studiosi amano l'interdisciplinarietà, ma è problematico sconfinare nei campi altrui lavorando nelle università tradizionali. Ecco perché non abbiamo voluto creare il nostro istituto vicino a posti come Harvard o Stanford, dove il dominio esercitato da teorie ortodosse e già sedimentate può difficilmente essere messo in discussione. Nel nostro centro studi possiamo pensare e discorrere liberamente, con il solo vincolo rappresentato dalla verifica dell'esperienza.

Il poeta Arthur Sze scrisse che "il mondo dei quark è in tutto e per tutto simile al giaguaro che si aggira nella notte". Come si fa allora - per attenerci alla metafora - a mettersi sulle tracce del giaguaro? In un sistema complesso adattativo (che si evolve cioè alla stregua degli esseri viventi) il flusso dei dati che lo interessa segue determinati schemi. A loro volta questi schemi entrano in competizione fra loro e si avvicinano nel tempo. Adoperandoli per descrivere o predire il comportamento del mondo, oppure per prescrivere un comportamento allo stesso sistema complesso adattativo, si generano conseguenze sulla realtà. Infine, queste conseguenze influenzano retroattivamente la competizione fra schemi diversi, rendendo così possibili l'adattamento e l'apprendimento.

La teoria dei sistemi complessi adattativi, che stiamo elaborando in questi anni, dovrebbe spiegare tutti i sistemi di questo genere presenti nell'universo. Si pensi solo a quante stelle ci sono nella nostra galassia e quante galassie nel cosmo, di cui non sappiamo praticamente nulla. A cosa assomigliano questi sistemi? A quello terrestre o a qualcosa di totalmente diverso, governato da altre leggi fisiche? E ancora: la biochimica degli ecosistemi della Terra è l'unica possibile o se ne possono ipotizzare altre, frutto di circostanze casuali diverse?

Ho già detto che l'effettiva complessità del nostro pianeta si fonda su regole molto semplici e su un ordine di partenza, ma anche sull'azione del caso. E la meccanica quantistica - che sta a fondamento delle leggi fisiche - è la fonte di tale casualità o indeterminatezza strutturale.

A differenza della fisica classica, la meccanica quantistica non è deterministica. Anche se conoscessimo le condizioni iniziali dell'universo e le leggi che descrivono le interazioni fra particelle elementari, non sarebbe possibile prevederne l'evoluzione successiva. Con la meccanica quantistica possiamo solo stabilire le probabilità che l'universo si sviluppi nell'uno o nell'altro modo. In alcuni casi si possono fare previsioni quasi certe e la fisica classica compie bene il suo dovere; in altre circostanze, invece, l'indeterminazione è pressoché totale. Prendiamo per esempio la disintegrazione di un nucleo radioattivo e la successiva emissione di una particella alfa: è impossibile, in via di principio, prevedere la direzione di questa particella prima che la disintegrazione si sia effettivamente verificata.

L'imprevedibilità degli eventi futuri persiste, d'altra parte, anche nella fisica classica, poiché non è mai possibile conoscere tutte le circostanze a un momento dato. Queste, infatti, sono dovute in parte a eventi casuali occorsi precedentemente. Questo tipo di indeterminazione è accentuato dal ricorrente fenomeno del caos nei cosiddetti sistemi non lineari, le cui configurazioni future dipendono dai dettagli che si verificano nel presente.

Nella storia dell'universo gli accidenti svolgono un ruolo di primo piano. Ciascuno di noi, per esempio, è il frutto di una lunga sequenza di eventi casuali. Si pensi alle fluttuazioni che hanno prodotto la nostra galassia, gli accidenti che hanno determinato la formazione del sistema solare, e fra questi la condensazione di polvere e gas che hanno generato la Terra. Lo stesso carattere di casualità hanno poi gli eventi che hanno fatto sì che la vita sul pianeta cominciasse a evolversi in un certo modo, così come l'emergere di specie dotate di particolari caratteristiche. A monte della selezione naturale, ogni individuo è dotato di un corredo di geni che a loro volta sono il risultato di una lunga sequenza di mutazioni e di accoppiamenti accidentali.

Va detto che molti di questi eventi incidono ben poco sull'evoluzione futura; altri, invece, si ramificano e generano una serie notevole di conseguenze. A questi ultimi diamo il nome di "accidenti congelati". Nella storia della vita sulla Terra, per esempio, alcune molecole destrorgire hanno avuto un ruolo più importante delle corrispondenti molecole levogire. Per lungo tempo si è tentato di spiegare il fenomeno invocando il carattere "mancino" per l'interazione debole della materia, in opposizione all'antimateria; ma la spiegazione non è risultata convincente. Supponiamo allora che la "destrorsità" delle molecole biologiche sia un puro accidente; ossia che l'organismo ancestrale, da cui ha tratto origine l'evoluzione successiva, fosse costituito da tali molecole per caso. Certo la vita avrebbe avuto tutt'altro corso se avessero prevalso le molecole levogire.

Un altro esempio può essere tratto dalla storia umana. Enrico VIII divenne re d'Inghilterra perché morì suo fratello Arturo. Dall'accidentalità di questa morte seguirono a cascata molte cose, fra cui la scelta delle monete, la separazione della chiesa d'Inghilterra dalla chiesa cattolica romana, la successione dei monarchi inglesi e le recenti vicissitudini del matrimonio di Carlo e Diana. L'accumularsi di questi eventi accidentali è ciò che dà al mondo la sua "complessità effettiva".

La complessità effettiva di qualcosa è la lunghezza di una concisa descrizione delle sue regolarità. Queste regolarità possono avere solo due fonti: le leggi fondamentali, semplici da descrivere, e gli "accidenti congelati". Con lo scorrere del tempo, appaiono sistemi dalla complessità sempre maggiore. Questo vale sia per i sistemi non adattativi (galassie, stelle, pianeti), sia per i sistemi complessi adattativi, tipici dell'evoluzione biologica. Con ciò non voglio dire che ogni singolo sistema diventa necessariamente più complesso col passar del tempo. Talune cose si semplificano fino a estinguersi, com'è il caso delle civiltà sepolte. Ma se la complessità non aumenta ovunque, è anche vero che l'involucro della complessità efficace tende a espandersi. Questo accade perché col tempo gli "accidenti congelati" si accumulano e in ogni istante vi sono diversi meccanismi che producono autorganizzazione. Ciò dà luogo a un ordine locale, anche se il disordine medio dell'universo continua ad aumentare, come prevede il secondo principio della termodinamica. L'autorganizzazione è alla base, per esempio, dei bracci delle galassie a spirale, così come delle miriadi di configurazioni simmetriche dei fiocchi di neve.

Nel caso dei sistemi complessi adattativi, i loro schemi hanno delle conseguenze sul mondo reale; queste, a loro volta, influenzano la competizione fra gli schemi. In altre parole, gli schemi che producono risultati favorevoli nel mondo reale hanno la tendenza a sopravvivere, mentre quelli che hanno meno successo tendono a essere ridimensionati o addirittura a scomparire. In molte situazioni, la complessità può offrire un vantaggio selettivo e il compito dei biologi evuzionisti dovrebbe essere proprio di capire quando questo avviene.

Un aiuto può arrivare dalla simulazione al computer del comportamento dei sistemi adattativi. Questa disciplina in pieno sviluppo e particolarmente interessante, in quanto studia da un punto di vista matematico come da un numero limitato di regole molto semplici possano emergere comportamenti complessi. Ma più ancora che l'interesse per la materia in quanto tale, è suggestivo pensare che essa possa dare importanti contributi alle scienze della vita, alla psicologia nonché alla corretta impostazione di questioni sociali e politiche.

L'attività preferita dei colleghi più giovani del Santa Fé Institute e di molti amici sparsi per il mondo è appunto quella di elaborare modelli informatici dotati di regole semplicissime, dalle quali far scaturire comportamenti complessi. È bizzarro e anche lievemente inebriante assistere a questa evoluzione via computer. Lo scienziato della politica Bob Axelrod è particolarmente portato in questo genere di cose, per non parlare poi della sua abilità nel convincere i suoi colleghi politologi della sensatezza dei suoi esperimenti. Se io presentassi a un convegno i suoi "modelli semplificati", con ogni

probabilità mi seppellirebbero di lazzi e risate. Bob invece riesce a farli accettare anche ai più conservatori. Immaginiamo, per esempio, un'isoletta polinesiana dominata da un vulcano, posto al suo centro, circondato da piccole entità politiche che si affacciano sulla costa. Questi staterelli interagiscono stringendo alleanze o facendosi guerra. Ciascuno può attaccare solo il suo immediato vicino, oppure un villaggio che possa essere raggiunto da una sequela ininterrotta di alleati. Da questo giochetto Axelrod è riuscito a trarre insegnamenti molto interessanti.

Verrà il giorno in cui avremo una nuova matematica, con tanto di teoremi e dimostrazioni, che ci consentirà di selezionare solo quelle regole davvero essenziali al funzionamento di questi modelli emergenti. Questa matematica rappresenterà il primo gradino, il linguaggio di base dell'informatica dei sistemi complessi. All'altro estremo si situano i tentativi - ancora prematuri - di utilizzare tali sistemi per studiare i rapporti fra uomo, società e biosfera. A un livello intermedio, invece, alcuni studiosi cercano di comprendere il funzionamento dei sistemi adattativi nelle scienze biologiche, comportamentali e sociali.

A mano a mano che ci allontaniamo dal livello di base, puramente matematico, cominciano a diventare importanti i cosiddetti accidenti storici e il loro progressivo accumularsi. Nella loro forma più elementare, questi modelli simulano al computer l'evoluzione dei sistemi complessi su un qualsiasi pianeta dell'universo. Essi non contengono alcuna informazione storica sul pianeta Terra e sugli organismi che l'hanno popolato; il tipo di evoluzione che emerge spontaneamente è ancora indifferenziato, ma già si cominciano a scorgere alcune costanti. Qualche giochetto informatico del genere è già disponibile: si parte inserendo nel programma del computer un livello di organizzazione molto rudimentale che si evolve verso un'organizzazione più complessa. Se per esempio si comincia progettando individui molto semplificati, emergerà un abbozzo di società. Partendo invece da raggruppamenti sociali, si svilupperà una confederazione di staterelli e così via.

Supponiamo, invece, che si voglia avere una descrizione semplificata della società umana, con tutte le sue istituzioni politiche e statali, risultanti da una quantità straordinaria di accidenti storici. Queste entità sono contingenti e specifiche al pianeta Terra e al genere umano. Sarà allora necessario complicare quei modelli rudimentali arricchendoli fin dall'inizio di nuovi livelli di organizzazione. Non si partirà più da modelli che contemplano semplici individui, aspettando che questi si aggregino in partiti, imprese e società più vaste; e che queste a loro volta generino nazioni e le nazioni gli organismi sovranazionali. Tutto questo, assieme alle caratteristiche salienti degli esseri umani, dei gruppi etnici e delle istituzioni politiche, andrà inserito da subito nel modello.

Tuttavia, se rimpinziamo il software di troppe proprietà specifiche, esso diventerebbe ingestibile dal punto di vista matematico e incomprensibile nei suoi risultati. È sempre necessario ricercare un equilibrio fra la semplificazione e la complessità: la prima può essere maneggiata con i nostri strumenti matematici ma offre un quadro caricaturale della realtà; la seconda è più aderente all'effettivo corso delle cose ma non è dominabile. Via via che i computer diventano più potenti, questo difficile equilibrio potrà spostarsi verso modelli sempre più complicati.

Rispetto ai sistemi complessi adattativi, ci si chiede spesso cosa determina il passaggio da un livello organizzativo a un altro. Nel piccolo mondo artificiale di organismi digitali, creato da Tom Ray, si assiste a veri e propri salti di qualità, e se utilizziamo modelli più elaborati, il passaggio da un tipo di organizzazione semplice a uno più complesso è ancora più marcato. In questo campo, i ricercatori preferiscono lavorare sui modelli matematicamente più semplici, in cui l'emergere spontaneo della complessità è un fenomeno davvero affascinante. Tuttavia questi modelli, ancorché eleganti, hanno ben poca utilità pratica. Per fare corrette previsioni scientifiche è

necessario insistere su configurazioni più ricche di informazioni iniziali.

Bisogna, inoltre, procedere con i piedi di piombo: nella storia umana sono stati combinati molti pasticci esagerando il ruolo della metafora scientifica nelle vicende umane. La scienza economica ne è un esempio: quando si è cercato di dare una lettura puramente economicistica delle società umane, si è ottenuto un quadro distorto della realtà, in cui molti valori fondamentali hanno subito una drastica sottovalutazione. Anche le teorie razziali del nazismo, o le idee del darwinismo sociale del secolo scorso, sono un esempio di come si possa fare un cattivo uso della scienza. Quando utilizziamo modelli più o meno complessi, dobbiamo stare molto attenti a non applicarli direttamente alla realtà ma ad avvalercene come metafore da cui trarre ispirazione. Solo in questo caso ci saranno utili.

Generalmente non sono uno che vuole vendere quello che fa come la cosa più interessante del mondo. Non l'ho fatto con la fisica delle particelle e non intendo farlo ora con i sistemi complessi adattativi. Ci sono molte altre attività culturali altrettanto avvincenti: dalla pittura alla musica, dalla poesia agli studi archeologici e astronomici.

Mi pare però che chi lavora sulla complessità sviluppi una buona propensione all'eclettismo. Il che non sempre è un vantaggio, soprattutto in ambito accademico, dove chi ha più di un interesse viene spesso emarginato. Questa chiusura è frutto di pregiudizi, ma anche del fatto che l'unico criterio per giudicare il valore di uno scienziato sono i risultati conseguiti in una singola disciplina. È certamente vero che negli studi interdisciplinari vi sono anche molti ciarlatani che se ne fanno un baffo del rigore scientifico. La selezione è un criterio sacrosanto, a patto che non venga usata per tarpare le ali ai ricercatori più dotati.

Quello che mi preme sottolineare è che la cosiddetta *plectics* non è un'accozzaglia di discipline separate, quanto un tentativo di trattare i più svariati argomenti - dalla psicologia alle scienze della vita, dalla fisica alla cosmologia - sotto il segno dei sistemi complessi.

Inoltre, mi sono trovato spesso a dover chiarire il concetto di riduzionismo, sul quale gli scienziati tendono a ingaggiare forsennate battaglie ideologiche. A me sembra che l'unica posizione sensata sia quella di rendere il giusto tributo alle leggi fondamentali della fisica, senza pretendere con questo di derivare da esse il funzionamento del mondo intero. Le leggi della storia e quelle delle altre scienze non sono infatti riconducibili alla meccanica delle particelle. A dire il vero, anche la fisica presa nel suo complesso non può accontentarsi delle leggi fondamentali della materia. Per descrivere ciò che avviene nel centro del Sole, per esempio, la fisica dello stato solido non serve, così come l'universo nei suoi primi istanti di vita, quando non era altro che una zuppa di quark, non sa che farsene della fisica nucleare. Le scienze della natura e della vita dipendono in buona parte da una serie di eventi accidentali verificatisi nella storia dell'universo: incidenti astronomici, geologici, biologici e storici. Se consideriamo, per esempio, la biologia terrestre, alle leggi fondamentali della materia dobbiamo aggiungere un gran quantità di informazioni per essere in grado di descrivere i fenomeni della vita in modo soddisfacente. Ogni disciplina è caratterizzata da principi che hanno senso solo all'interno di quell'universo di discorso. La conoscenza è come un edificio a più piani, ognuno col proprio arredo e i propri inquilini. Secondo me, chi coltiva interessi interdisciplinari deve costruire le scale che uniscono un piano all'altro, connettere livelli diversi di conoscenza escogitando nuove leggi empiriche. Semplificando, si potrebbe dire che chi si limita a salire le scale, passando dai livelli più elementari a quelli più complessi, ha un atteggiamento di tipo riduzionista, mentre il cultore dei sistemi complessi è colui che compie anche il tragitto inverso, scendendo le scale dell'edificio.

Io ho lavorato a lungo al Caltech, un centro di ricerca noto per essere riduzionista, nel senso che i suoi ricercatori sono più orientati verso le scienze di base. I

temi psicologici, per esempio, non li affrontano studiando l'inconscio o il comportamento, bensì attraverso la neurobiologia. In tal modo il Caltech ha acquistato una notevole reputazione in alcuni settori. Tuttavia, enfatizzando la ricerca dei meccanismi di base, gli scienziati dell'istituto californiano hanno ignorato l'altra faccia dell'impresa scientifica, che consiste nell'indagare le leggi e i principi dei piani alti dell'edificio, percorrendone le scale nei due sensi.

Mi sono chiesto più volte se Darwin sarebbe stato assunto al Caltech. Non credo. La sua conoscenza della biologia di base era carente e ancora meno sapeva di genetica, che stava nascendo proprio in quegli anni. Ciononostante, partendo dalla mansarda dell'osservazione naturalistica e scendendo le scale del palazzo, elaborò la meravigliosa teoria della selezione naturale e della reciproca dipendenza di tutti gli esseri viventi.

Al Santa Fé Institute, oltre allo studio sperimentale della complessità, cerchiamo di incentivare nuovi stili di ricerca, così che gli scienziati di domani si abituino ad aggirarsi più liberamente fra i piani dell'edificio scientifico, salendone e scendendone a piacere le scale; avendo il coraggio e l'originalità di gettare uno sguardo non specialistico al tutto e affrontando i singoli problemi da diversi punti di vista. Noi Darwin l'avremmo assunto molto volentieri.

christophe g. langton Quando uno vince il premio Nobel si sente in diritto di parlare di qualsiasi cosa, certo di essere ascoltato religiosamente. Generalmente non vale la pena di assecondare questa tendenza. A meno che non si tratti di Murray Gell-Mann, che sa davvero un sacco di cose. Penso che la sua padronanza delle diverse branche della scienza sia quasi pari alla sua conoscenza delle lingue, di cui ho ormai perso il conto. È veramente difficile cominciare a parlare di qualcosa in cui Murray non sia ferrato; ascoltare le sue riflessioni è un'esperienza molto istruttiva e divertente. A lui si deve la nascita e il successo del Santa Fé Institute, nel quale è riuscito a far lavorare tanti giovani brillanti fianco a fianco con scienziati ormai affermati.

alan guth Con Richard Feynman e Steven Weinberg, Gell-Mann è senza dubbio uno dei più importanti teorici di fisica delle particelle elementari. Il suo più grande successo è stata la scoperta del modello quark. Ormai tutti i fisici sono convinti che le centinaia di particelle legate da interazioni forti - come i protoni e i neutroni - siano formate da costituenti elementari noti sotto il nome di quark. Quando venne avanzata questa ipotesi, mancavano ancora prove chiare della loro esistenza; esistevano solo modelli di distribuzione della massa delle particelle. Mettendo insieme tutte le conoscenze a disposizione, Murray concluse che ammettendo l'esistenza dei quark tutto avrebbe avuto un aspetto molto più semplice. La proposta, ardita ed elegante, ebbe notevoli ripercussioni. Egli infatti non si limitò a ipotizzare l'esistenza di particelle più piccole - idea di per sé non nuova - ma elaborò anche la teoria dettagliata delle proprietà dei quark e di come, interagendo fra loro, questi determinano il comportamento delle particelle più grandi. Oggi questa teoria sta a fondamento della fisica delle particelle: un modello esplicativo, detto standard, ormai condiviso da tutti.

Naturalmente Gell-Mann non fu l'unico autore del modello standard. Se ne cominciò a parlare nel 1947, ma fu nel 1967 che cominciò a muovere i primi passi con la teoria elettrodebole di Weinberg. Fra il 1971 e il 1973 furono pubblicati vari lavori, fra cui quelli di Gell-Mann, che aggiunsero al modello la parte relativa alle interazioni forti di queste misteriose particelle.

Il modello standard non è l'ultima parola della fisica: la sua spiegazione è ancora troppo complicata e differenziata per essere giudicata pienamente soddisfacente. La maggioranza dei fisici ritiene che tale modello sia una buona approssimazione, nel campo delle basse energie, di una teoria più completa e fundamentalmente più

semplice, sulla quale stiamo indagando ormai da anni. Ma anche in questa nuova ricerca Murray Gell-Mann ha dato contributi originali, scrivendo sulla grande teoria unificata (in cui si cerca una sintesi di interazioni elettrodeboli e forti), così come sulla supergravità e sulle superstringhe. Ultimamente Murray ha abbandonato la fisica delle particelle e si occupa della complessità: argomento che per me e per molti altri fisici rimane un mistero .

lee smolin Murray è il più grande fisico teorico americano vivente. I suoi contributi alla teoria delle particelle elementari sono stati davvero decisivi. La sua prodigiosa immaginazione ha partorito l'idea di stranezza, i quark, l'ipotesi della "ottuplice via" e la cosiddetta SU(3).

Con questa sigla si intende una particolare forma di simmetria in base alla quale tutte le particelle elementari conosciute sarebbero manifestazioni diverse di un solo tipo di particella. Il risultato di questa simmetria è che possiamo rimpiazzare un tipo di particella con un altro senza mutare di molto l'esperimento. Murray propose la simmetria all'inizio degli anni Sessanta. Questo non vuol dire che tutte le particelle sono identiche, quanto che la loro somiglianza è più significativa delle loro reciproche differenze. La simmetria è un'idea profonda, che da allora è stata la forza propulsiva della fisica delle particelle elementari. Può darsi che ormai questa idea abbia fatto il suo tempo, ma per trent'anni è stata dominante.

Geil-Mann ha avuto un ruolo determinante nello stabilire il modello standard. Insieme ad altri scienziati ha sostenuto l'idea di un altro tipo di simmetria - detta di gauge - per spiegare le forze che legano fra loro i quark nel protone e nel neutrone. Pur non essendone l'autore, ha contribuito anche all'affermarsi della teoria della supergravità insieme a John Schwartz. Così anche nel caso delle superstringhe, Murray ha letteralmente mantenuto in vita Schwartz e alcuni altri fisici facendoli lavorare quando nessuno mostrava interesse per questo argomento. Il fatto che dopo tutto questo Murray s'interessi ora di complessità ha dello strabiliante, perché anche questa volta il tempo gli darà ragione. La fisica deve cambiare direzione e con ogni probabilità il futuro sta proprio nello studio dei sistemi complessi. Occuparsi per tutta la vita di particelle elementari e a un certo punto fare una capriola e decidere che l'importante sono i sistemi complessi è il segno di una grande ispirazione e gli fa onore.

Secondo Murray, la fisica potrà progredire se non insisterà nella direzione dello studio delle particelle elementari, alla ricerca di una improbabile teoria del tutto, ma se comincerà a esplorare la complessità presente nell'universo. Questo cambiamento di prospettiva è un segno dell'originalità di pensiero di Gell-Mann.

Martin rees Grande uomo, Gell-Mann. Il suo successo nel campo delle particelle elementari è innegabile, mentre le sue ricerche attuali, svolte insieme al fisico teorico Jim Hartle, stanno influenzando una delle scuole principali della gravità quantistica. Murray è particolarmente sensibile al contrasto fra la semplicità della fisica delle particelle e la complessità del mondo che ci circonda.

Davanti a una realtà così variegata bisogna adottare diversi stili di pensiero. Come cosmologo, mi piace suddividere la storia dell'universo in tre parti. La prima dura una frazione evanescente di secondo ed è difficile da capire, perché la sua microfisica non può essere riprodotta nei nostri acceleratori. Dopo il primo microsecondo, l'universo diventa invece abbastanza semplice. Si possono calcolare le quantità di elio, deuterio e litio presenti all'inizio, così come si può studiare lo spettro della radiazione di fondo. Tuttavia, dopo alcuni milioni di anni cominciano a nascere le prime strutture e questa semplicità viene meno. Ecco allora che entriamo nella terza

puntata della storia dell'universo, caratterizzata da una crescente complessità.

Tutto, dalla meteorologia alla biologia, è manifestazione complessa di leggi semplici. La maggioranza dei cosmologi studia la prima e la seconda parte della storia dell'universo, la cui fisica è simile a quella delle particelle. La mia cosmologia (che alcuni hanno definito "cosmogonia", cioè lo studio dell'origine delle strutture e del perché l'universo è diventato quello che è) comprende il sorgere della complessità dopo i primi milioni di anni. Con il mutare dell'oggetto di studio dobbiamo allora anche cambiare il metodo: non possiamo più sperare di sintetizzare tutto quanto in poche equazioni, e in taluni casi dobbiamo accontentarci di una conoscenza puramente qualitativa dei fenomeni, come avviene nelle scienze naturali e ambientali.

Murray Gell-Mann ha posto l'accento sul contrasto fra la semplicità della fisica delle particelle e la complessità delle strutture reali, cogliendo la sfida scientifica presente in entrambi i campi. Questo lo rende un fisico davvero particolare. Di solito i suoi colleghi pensano che la fisica delle particelle rappresenti il paradigma per tutte le altre scienze, mentre Gell-Mann ritiene che sia sbagliato attribuire minore dignità scientifica alle discipline meno matematiche. La fisica delle particelle è una scienza piuttosto atipica, poiché è l'unica da cui ci si può aspettare che poche equazioni possano descrivere i fenomeni in modo esauriente. La cosa sarebbe del tutto impossibile se, invece delle particelle, si volesse descrivere la deriva dei continenti. Qui servono idee unificanti, non equazioni.

j. doyne farmer Al contrario di tutti i suoi contemporanei, compresi Feynman, Weinberg e Hawking, Murray Gell-Mann ha capito che la complessità sarebbe stato il tema centrale della fisica del futuro. Pur avendo raggiunto risultati importanti nella fisica delle particelle negli anni Sessanta, Murray si era reso conto che solo cambiando prospettiva avrebbe potuto continuare a progredire. Ascoltando le sue prime conferenze sui sistemi complessi ero rimasto piuttosto deluso. Anni dopo, invece, la sua capacità di descriverli era molto migliorata. Il suo contributo alla divulgazione della teoria della complessità si sta rivelando solo ora in tutta la sua importanza.

daniel c. dennett Murray mi sembra dotato di un enorme talento scientifico e di una grande capacità di cogliere la sostanza del problema. Spesso scienziati anche ottimi hanno paraocchi che gli impediscono di riconoscere approcci nuovi. La grande virtù di Murray è di non avere paraocchi.

stuart kauffman Murray è molto intelligente, sensato e informato. Ho l'impressione che conosca più cose di qualsiasi altro essere umano. Per molti versi ha avuto un ruolo di primo piano nello sviluppo del Santa Fé Institute: ha saputo scegliere le persone giuste, anche se ha una certa difficoltà nel riconoscerne i meriti. Senza di lui l'istituto non si sarebbe aperto a una tale varietà di argomenti. In secondo luogo, Murray ha saputo dare prestigio alla scienza della complessità, spendendo la sua reputazione nel sostenere davanti all'opinione pubblica le attività dell'istituto. Più che dare contributi originali alla scienza della complessità, ha saputo sintetizzare le idee altrui in un quadro coerente.

Marvin minsky Cosa posso dire? È un genio della levatura di Feynman. Conosce molte cose, anche nel campo dell'intelligenza artificiale e ha la lingua più tagliente che conosca. Se qualcuno dice una castroneria, è capace di fulminarlo con una battuta. Ho sentito dire che negli ultimi tempi si sta addolcendo: questo sarebbe davvero una perdita incomparabile per l'umanità. Un'antologia di suoi apprezzamenti sugli altri

scienziati non avrebbe prezzo.

paul davies Murray Gell-Mann è una delle figure di spicco della fisica del xx secolo. La storia lo ricorderà come uno degli ideatori della teoria dei quark, i costituenti elementari delle particelle. Recentemente si è occupato di scienza della complessità. Giunto a un certo punto della sua attività scientifica, ha riconosciuto che esistono due modi di studiare il mondo. Il primo è il modo riduzionista, che consiste nello sminuzzare le cose fino ai loro costituenti più elementari, come i quark o le superstringhe. La seconda via è quella della sintesi, ossia un modo di guardare alla complessità delle cose e alle loro leggi specifiche.

20. Stuart Kauffman

L'ordine gratuito

stuart kauffman biologo, insegna biochimica all'Università della Pennsylvania e al Santa Fé Institute. Ha scritto *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution* (1993) e, insieme a George Johnson, *At Home in the Universe* (1995).

Quali sono i sistemi complessi che possono evolversi mediante l'accumulo di una serie di variazioni utili? È solo il meccanismo della selezione che produce sistemi complessi capaci di adattamento? Quali sono le loro proprietà specifiche? Si potrebbe dare una prima risposta a queste domande dicendo che i sistemi complessi in bilico fra l'ordine e il caos sono quelli più capaci di adattamento attraverso la mutazione e la selezione.

Il caos è un sottoinsieme della complessità. I sistemi cosiddetti dinamici continui (come quelli dell'idrodinamica o della meteorologia) e discreti mostrano configurazioni ricorrenti e un'alta sensibilità alle condizioni iniziali, tale per cui anche piccole variazioni iniziali possono condurre il sistema a comportarsi in modo molto diverso. Per spiegare questa caratteristica si dice che il battito d'ali di una farfalla a Rio può far cambiare il tempo a Chicago. Il che equivale a dire che bastano cambiamenti infinitesimali nelle condizioni di partenza perché le possibili evoluzioni di un sistema siano divergenti. A evoluzioni diverse diamo il nome di traiettorie. Ma se esistessero solo traiettorie divergenti, la vita non avrebbe potuto svilupparsi sul nostro pianeta. Ecco allora porsi il quesito: cos'altro c'è all'opera? Quali tipi di sistemi complessi consentono di accumulare variazioni utili?

Nell'evoluzione della vita ci accorgiamo che sistemi molto complessi hanno una direzione convergente. Ciò significa che, pur partendo da condizioni distanti fra loro, si assiste a un reciproco avvicinamento. Questa caratteristica naturale di molti sistemi complessi prende il nome di principio di omeostasi (o di stabilità contro la perturbazione). Ho descritto per la prima volta questo fenomeno 25 anni fa, esaminando quelli che adesso vengono chiamati "modelli di Kauffman".

Tali sistemi, nel corso della loro evoluzione, hanno imparato a mantenersi in equilibrio fra la convergenza e la divergenza, fra l'ordine e il caos. Essi sono in grado di svolgere i compiti più complessi in modo simultaneo e di crescere facendo tesoro delle variazioni utili. Inoltre si evolvono insieme ad altri sistemi complessi, come se fossero in grado di comunicare fra loro e di stabilire le condizioni più vantaggiose. Ho il sospetto che vi siano leggi emergenti che regolano il funzionamento di questi sistemi complessi. Presi nella loro globalità, essi si sviluppano parallelamente e si portano al margine del caos, fino a trovare uno stato di equilibrio. È un'idea molto suggestiva, e potrebbe perfino essere giusta.

Ho cercato di spiegare questo comportamento con la teoria dell'ordine spontaneo, o gratuito. Se si hanno centomila geni e questi si attivano e disattivano l'uno con l'altro, vuoi dire che questi sono collegati in una sorta di circuito. Ogni gene riceve dagli altri un impulso che lo accende o lo spegne. Ma quale sarà, allora, il sistema dotato di migliaia di geni che interagiscono fra loro e che continua a evolversi mediante la creazione di nuovi geni e di nuovi nessi fra loro?

Supponiamo di ignorare quasi tutto di questi circuiti. Supponiamo di conoscere solo il numero dei geni e alcune altre cose, come il modo in cui i geni si attivano e disattivano a vicenda, nonché il fatto che il sistema è dotato di una natura connettiva. Partendo da queste informazioni, mi sono chiesto se era possibile ricreare con metodi statistici un sistema simile a quello biologico, capace di evolversi spontaneamente e di trovare un suo equilibrio interno. Devo dire che non nutro molte speranze che potesse formarsi un ordine dal nulla, quasi senza una ragione. Eppure è proprio quello che è avvenuto.

Indubbiamente, quello che ho trovato è un ordine profondo. Infatti, se i sistemi dinamici che stanno alla base della vita fossero assolutamente caotici, le cellule e gli organismi non potrebbero funzionare; a meno di non ipotizzare una selezione enorme di forme di vita, finalizzata a ottenere sistemi in grado di funzionare in modo affidabile e regolare. Senza un ordine preesistente, probabilmente il meccanismo della selezione naturale non avrebbe mai potuto avviarsi.

Proviamo a considerare uno schema di impianto elettrico formato da diecimila lampadine, ciascuna delle quali riceve un segnale da altre due. Senza sapere nient'altro, colleghiamo fra loro le lampadine assegnando a ognuna di esse, in modo casuale, una "regola di interruttore". Si potrebbe decidere, per esempio, che una lampadina si accende solo quando le due lampadine a cui è connessa sono accese; oppure solo quando sono entrambe spente.

A lume di buon senso arriveremo alla conclusione che tale sistema funziona in modo caotico, cioè imprevedibile. Il nostro è un circuito elettrico casuale, una rete enormemente complessa, dotata di una logica disordinata. Perché l'impianto funzioni, dovremmo costruirlo secondo regole ordinate e precise concatenazioni logiche. Niente di più sbagliato: in qualche modo il nostro circuito funzionerà proprio in virtù di un suo ordine apparentemente inspiegabile, gratuito.

Su questo ordine possono essere condotte molte riflessioni epistemologiche. Nei prossimi anni intendo rispondere al seguente quesito: come devono essere organizzati i sistemi complessi perché possano conoscere i loro mondi? Con il termine "conoscere" non voglio indicare un fatto di coscienza: il batterio *Escherichia coli*, per esempio, conosce il suo mondo pur non essendo cosciente. Ma in che senso si può dire allora che lo "conosce"? Semplice: esso scambia variabili molecolari con il suo mondo e nuota controcorrente in un gradiente di glucosio. Ciò significa che in un certo senso il batterio possiede una rappresentazione interna del suo ambiente. Allo stesso modo si può affermare che l'IBM "conosce" il proprio mondo. Nessun singolo dipendente della IBM conosce alla perfezione la sua azienda, eppure l'IBM tiene saldamente le redini del suo ambiente economico. Qual è la logica strutturale di questi sistemi, e dei mondi nei

quali si trovano a vivere, che rende possibili comportamenti coerenti di questo genere?

Abbiamo detto che l'ibm è un'organizzazione che conosce se stessa. Non credo che ciò sia dovuto a una sorta di selezione naturale darwiniana, operante come forza esterna. Sebbene Darwin intendesse la selezione in questo modo, noi qui stiamo parlando di organismi che vivono in un ambiente formato per la maggior parte da altri organismi. Ciò significa che negli ultimi quattro miliardi di anni l'evoluzione ha generato organismi che sono riusciti a evolversi insieme. Senza dubbio, la selezione naturale è un ingranaggio importante del motore, ma non l'unico: deve entrare in gioco anche un ordine gratuito.

Con questo termine intendo la tendenza propria dei sistemi complessi di progredire verso un flusso convergente anziché divergente, secondo un principio di omeostasi. Aggiungo che la selezione naturale agisce sulla struttura dei sistemi in modo da mantenerli fra questi due flussi, fra l'ordine e il caos. Proprio da sistemi di questo genere saremo in grado di trarre una legge macroscopica che spiega il funzionamento degli ecosistemi e forse anche dei sistemi economici.

La mia teoria dell'ordine spontaneo o gratuito non vuole confutare il darwinismo. Darwin aveva tutt'altro che torto: la selezione naturale è un'idea brillante, una forza essenziale dell'evoluzione. Tuttavia ci sono aspetti che il naturalista inglese non poteva immaginare. I darwinisti non si sono mai chiesti, per esempio, come possono formarsi sistemi complessi autorganizzati se la selezione naturale è sempre all'opera. I biologi non sanno sciogliere questo mistero e nemmeno i fisici, perché nella fisica non c'è selezione ma solo autorganizzazione.

Ciò che allora dobbiamo fare è allargare la teoria evuzionista in modo da descrivere quello che succede quando la selezione agisce su sistemi che già possiedono consolidate proprietà autorganizzative. Questo corpus teorico è ancora di là da venire.

Da Darwin in poi i biologi hanno creduto che l'unica fonte di ordine nel mondo degli organismi fosse la selezione. Si spiega così la frase del biologo francese Francois Jacob, secondo cui "gli organismi sono marchingegni rimaneggiati". In questa prospettiva la selezione è una sorta di *bricoleur* che fa funzionare il tutto assemblando opportunisticamente diversi ingranaggi fra loro. Se invece esiste l'ordine gratuito, la coerenza che si osserva nella vita degli organismi ha un'altra origine, da ricercare nei costituenti fondamentali della vita. Se l'ipotesi è corretta, cambia radicalmente il nostro modo di concepire l'evoluzione.

L'origine stessa della vita potrebbe essere dovuta a questo ordine gratuito. Possedendo sistemi sufficientemente complessi di polimeri, capaci di azione catalitica, essi possono a loro volta organizzarsi in un sistema autocatalitico: in altre parole, possono dare luogo alla vita. Probabilmente, realizzare sistemi viventi è più facile di quanto si creda.

Nel campo dell'evoluzione molecolare applicata, queste teorie possono trovare immediata applicazione. Nel 1985 io e Marc Ballivet abbiamo presentato un brevetto per generare un numero altissimo di sequenze casuali o quasi casuali di dna, rna e proteine, in modo da capire come si evolvono una serie di biopolimeri da utilizzare come farmaci, vaccini ed enzimi. L'idea è di costruire miliardi di geni in modo casuale - geni mai esistiti in natura - e provare a inserirli in un organismo. In questo modo si potrebbero ottenere nuove molecole di rna e proteine da cui sintetizzare nuovi farmaci da impiegare contro qualsiasi malattia. Credo che fra cinque anni si cominceranno a vedere i primi risultati di questo progetto di ricerca.

Seguendo un metodo simile potremmo rivoluzionare anche la chimica e la biotecnologia ottenendo secondo combinazioni casuali un centinaio di milioni di molecole: in questo modo avremmo una collezione di "attrezzi" universali con i quali catalizzare qualsiasi tipo di reazione. Basta estrarre dalla cassetta degli "attrezzi"

l'enzima più appropriato, affinarlo mediante opportune mutazioni e catalizzare la reazione desiderata.

Infine la teoria evuzionista può essere proficuamente fatta interagire con la scienza economica. Uno dei problemi fondamentali dell'economia è quello della cosiddetta razionalità vincolata. La questione si potrebbe porre in questi termini: come possono funzionare nei loro mondi dei soggetti che non sono dotati di razionalità e risorse computazionali infinite? Adottando un'ottica evuzionista è possibile ottimizzare il grado di intelligenza di questi soggetti: se sono troppo razionali o troppo stupidi, infatti, il sistema non si evolve come dovrebbe.

Attualmente sto discutendo con alcuni colleghi economisti l'evoluzione di una rete tecnologica nella quale vengano creati nuovi beni e servizi e in cui la razionalità vincolata si esprima all'interno di una teoria di non-equilibrio della formazione dei prezzi. Per elaborare un modello di questo tipo, dobbiamo comprendere come fanno i sistemi complessi a crearsi delle mappe del loro mondo e come possono intraprendere azioni a loro beneficio, mantenendo la giusta dose di razionalità e complessità al sistema. Così facendo forse capiremo come fanno i sistemi complessi a conoscere il loro mondo.

brian goodwin Stuart è interessato soprattutto all'emergere dell'ordine nei sistemi evuzionistici. È la sua idea fissa ed è anche la mia. I nostri approcci sono però diversi e in qualche modo complementari. Quello che interessa a entrambi è dare una risposta al quesito: come devono essere interpretate le novità che si producono nell'ambito dell'evoluzione? Come si configura un ordine emergente? I contributi che Stuart ha dato a questo settore di ricerca sono molto interessanti.

L'idea di vita al margine del caos è in perfetto accordo con il suo lavoro. Sebbene non sia stato lui a dare il via alle moderne teorie del caos, le sue ricerche sono la migliore dimostrazione di tale principio: egli fa interagire sistemi altamente complessi secondo una logica che non sembra portare da nessuna parte, ma ecco che d'improvviso emerge una struttura ordinata.

Le sue scoperte più interessanti risalgono agli anni Sessanta, quando era studente di medicina e si divertiva a giocherellare con i computer. Fu allora che provò a inserire nel calcolatore alcuni principi elaborati da François Jacob e Jacques Monod, ottenendone le reti neurali. Anch'io ho coltivato più o meno le stesse idee, ma abbiamo preso due strade diverse. Io ho studiato l'organismo nei termini di un'organizzazione dinamica, mentre lui ha seguito Warren McCulloch cercando di applicare la teoria delle reti logiche alla genetica. Pur partendo da approcci complementari, io e Stuart siamo sempre approdati alle medesime conclusioni sul modo in cui l'ordine emerge dalla dinamica del caos. Ho imparato molto da lui e dal suo straordinario modo di ragionare.

w. daniel hillis Stuart Kauffman è uno strano personaggio; basti dire che è un biologo teorico, cioè una contraddizione in termini. I fisici si dividono in teorici e sperimentali e tale divisione ha indubbiamente un senso. Nella fisica ciò che conta è la teoria; gli esperimenti servono per confermarla o confutarla. Quando ci troviamo di fronte a un risultato sbagliato, probabilmente si tratta di un errore sperimentale. La teoria è la pietra di paragone, a meno che non si riesca a escogitare un esperimento in grado di gettarla nella polvere. Quando, durante un'eclisse solare, Eddington misurò la deflessione della luce stellare provocata dal Sole, in modo da provare la teoria della relatività generale di Einstein, chiesero a quest'ultimo cosa avrebbe provato se le misure di Eddington non avessero confermato la sua teoria, Einstein rispose: "Avrei provato pena per il buon Dio, la teoria è corretta".

In biologia accade l'esatto opposto. La parte sperimentale è ben più importante della teoria; quello che veramente importa sono i dati sperimentali. Per guadagnarsi il rispetto dei colleghi bisogna lavorare anni e anni in laboratorio, farci lavorare i propri studenti e ricercatori in modo da accumulare una massa sterminata di dati. Solo allora si ha il permesso di elaborare teorie, guardandosi bene dallo sfruttare i dati altrui senza prima averne raccolti a sufficienza per conto proprio.

Stuart appartiene a quella specie rara che teorizza senza essere uno sperimentatore. Il suo modo di procedere è davvero originale, poiché preferisce apprendere le nuove teorie della fisica - come quella dei sistemi dinamici - e innestarle sulla biologia.

daniel c. dennett Stuart Kauffman e il suo collega Brian Goodwin sono particolarmente ansiosi di screditare la suggestiva metafora, coniata dai grandi biologi francesi Monod e Jacob, che vede madre natura come una sorta di *bricoleur*. Secondo Kauffman la biologia è più un mondo di scoperte newtoniane che di creazioni shakespeariane. In effetti è riuscito a escogitare eccellenti dimostrazioni per puntellare questa sua pretesa. Kauffman è un metaingegnere e temo che il suo attacco alla metafora del *bricoleur* dia fiato ai nemici del pensiero di Darwin. A questi dà l'illusione che quello che si vede all'opera nella natura non sia la mano approssimativa del *bricoleur* bensì quella perfetta di Dio. In questo Kauffman si è fatto influenzare da Goodwin. John Maynard Smith sta cercando di tirarlo dalla parte opposta, a mio parere molto saggiamente.

stephen jay gould Sia Stuart Kauffman sia Brian Goodwin stanno cercando di rivalutare la grande tradizione strutturalista, a cui il funzionalismo darwiniano non ha mai prestato grande attenzione. Tuttavia, al contrario di Brian, che studia la morfologia degli organismi, Stuart s'interessa di questioni quali l'origine della vita e delle organizzazioni molecolari: cose con le quali ho ben poca dimestichezza. Faccio un po' fatica a seguirlo nelle sue teorie perché sono zeppa di matematica. In sostanza, Kauffman sta cercando di capire quali aspetti del mondo organico discendono dai principi fisici della materia. Secondo lui non tutto ciò che è organico è frutto della selezione naturale.

Il suo tentativo di sviluppare in questo campo la tradizione strutturalista non dovrebbe essere visto come contrario al darwinismo ma come una necessaria integrazione. I principi dello strutturalismo impongono dei vincoli, all'interno dei quali dovrebbe agire la selezione naturale. Il suo ordine gratuito è il risultato di una serie di costrizioni: dimostra che una grande quantità di ordine può essere generato esclusivamente dagli attributi fisici della materia e dalle leggi di organizzazione. Questo è ciò che vuol dire quando parla di ordine gratuito. È una formula davvero felice, perché un darwiniano puro pensa che ogni ordine sensato debba derivare dalla selezione naturale. Il che non è vero.

j. doyne farmer Kauffman faceva parte di un gruppo di biologi teorici all'Università di Chicago, capeggiati da Jack Cowan. Il gruppo era composto da Arthur Winfree, Leon Glass e diversi altri che sarebbero diventati fra i più famosi biologi teorici. Il fatto che almeno uno di questi tipi riceva ancora uno stipendio da scienziato la dice lunga sulla loro abilità: l'*establishment* biologico detesta i teorici e sopravvivere come biologo teorico è un'impresa mica da poco. Stuart ce l'ha fatta, forse anche perché non ha abbandonato del tutto l'attività sperimentale.

francisco varela Stuart ha saputo individuare i meccanismi che regolano l'emergere dei livelli nelle organizzazioni biologiche. Nei suoi primi lavori sulle reti genetiche ha raggiunto risultati molto interessanti: è riuscito a trasformare una nozione vaga e imprecisa in qualcosa di concreto e utilizzabile.

Mi trovo invece un po' in difficoltà col suo ultimo libro: il mostruoso *The Origins of Order*. Benché qua e là ci siano spunti interessanti, non mi sembra che l'opera abbia una sua coesione interna. Per i miei gusti ci sono troppi "supponiamo questo" e "supponiamo quest'altro" e "se questo fosse vero, allora...". Ma la tesi di fondo, secondo la quale l'evoluzione è vincolata a fattori interni, mi pare condivisibile.

Stuart è un'autorità in materia di reti biomolecolari. È sicuramente uno dei padri fondatori di questa disciplina, accanto a Gould, Eldredge, Lynn Margulis e Goodwin. Se posso fargli una piccola critica, mi sembra che lui non sia così propenso a riconoscere il contributo degli altri. Sicuramente nella biologia è in atto una grande rivoluzione che va oltre Darwin. Stuart è uno dei protagonisti, non l'unico.

niles eldredge Kauffman è una persona straordinaria. La prima volta che l'ho incontrato, mi ha fatto piegare in due dal ridere facendo il verso a tutti i professori di filosofia di Oxford. È un tipo molto simpatico, spiritoso e brillante. Nei confronti dell'evoluzionismo ha un atteggiamento che io ho definito trasformazionalista.

Gli ortodossi vedono l'evoluzione in termini di trasformazione delle proprietà fisiche degli organismi. Per spiegare l'esplosione avvenuta nella prima fase del cambriano, Stuart fa saltare dei modelli da un picco adattativo a un altro. Fra me e lui ci sono molte differenze e devo dire che non abbiamo mai trovato un vero punto di contatto. L'ho indirizzato ad altri studiosi che come lui simulano i modelli evolutivi al computer, ma c'è davvero una differenza di vedute troppo grande fra noi due perché possa nascere un dialogo fruttuoso.

nicholas humphrey Attualmente Kauffman è meno radicale di Goodwin. Un tempo non avrebbe ammesso che la selezione gioca un ruolo importante. Oggi invece lo accetta. Se è vero infatti che le possibilità di gioco di cui dispone la biologia sono determinate dalle proprietà dei sistemi complessi, è altrettanto vero che tali possibilità sono il frutto di una selezione. Come in una lotteria, il mondo produce una serie di possibilità, ma è la selezione naturale a decidere quali di queste sopravviveranno.

Kauffman sta svolgendo un lavoro formidabile e di certo ha tirato il sasso nella piccionaia del neodarwinismo di vecchio stampo. Ha costretto molti a riconoscere che la selezione potrebbe non essere l'unica forza all'opera nella natura. Non è il nuovo Darwin, ma certo non pretende di esserlo. E, d'altronde, oggi non abbiamo bisogno di un nuovo Darwin.

21. Christopher G. Langton

Un modello dinamico

christopher g. langton informatico, è visiting professor al Santa Fé Institute, dove dirige il programma sulla vita artificiale. È autore del libro *Artificial Life* (1995) e dirige una rivista sull'argomento.

Qual era l'algoritmo di Darwin? L'idea dell'evoluzione era nell'aria già da tempo: Spencer, Lamarck e altri ancora avevano proposto l'idea dell'evoluzione, senza però individuarne il meccanismo. Si trattava quindi di scoprire questo, ossia l'algoritmo che potesse spiegare fin nei dettagli la straordinaria varietà che si osserva in natura. Ma cos'è un algoritmo? È una procedura che in un numero finito di passi risolve una serie di input in una serie di output. Il genio di Darwin sta nell'aver ricondotto l'enorme varietà di specie presenti sul pianeta a un meccanismo semplice ed elegante, a un algoritmo che potesse spiegarne l'esistenza.

Il ragionamento di Darwin individua due meccanismi fondamentali dell'evoluzione: (1) un produttore di varietà e (2) un filtro di varietà. Nei primi capitoli dell'*Origine delle specie* egli osserva quello che era sotto gli occhi di tutti: la natura produce variabilità nella discendenza degli organismi. L'allevamento di piante e animali era la dimostrazione di questo fatto. Gli allevatori sapevano perfettamente che la riproduzione tra organismi genera variabilità, la quale può essere indirizzata dove si vuole. Tanto è vero che facendo accoppiare due ovini che producono più lana rispetto agli altri si ottengono individui dotati delle stesse caratteristiche. Benché la varietà sia prodotta dalla natura, è l'allevatore che gestisce gli accoppiamenti. Poiché il filtro della varietà era un artefatto della volontà umana, Darwin parlò quindi di "selezione artificiale".

Una volta introdotto il tema con esempi familiari ai suoi lettori, l'autore dedicò il resto del libro a dimostrare come "la Natura Ella stessa" poteva agire da filtro di varietà. Dato che certe caratteristiche aumentavano le probabilità di sopravvivenza degli organismi che le possedevano, era ovvio pensare che questi organismi avrebbero avuto più occasioni di sopravvivere e di riprodursi.

La logica di questo processo evolutivo può essere resa evidente astraendo dalle particolarità della storia naturale e limitandosi a far girare su un calcolatore un "algoritmo genetico". Il primo che provò a implementare l'algoritmo di Darwin sul computer fu John Holland, dell'Università del Michigan, nei primi anni Sessanta. Da allora, molti altri hanno lavorato con algoritmi genetici, senza ottenere peraltro grandi risultati. La procedura in sé non era sbagliata, ma non era inserita nel giusto contesto biologico. Essa simulava in realtà la selezione artificiale, non quella naturale. Negli algoritmi genetici tradizionali era l'uomo che assegnava esplicitamente i criteri di sopravvivenza alle singole specie. Nel mondo reale, invece, è la selezione naturale che agisce: è cioè la "natura" delle interazioni fra gli organismi e di questi con l'ambiente fisico che determina chi sopravviverà per accoppiarsi e riprodursi. C'è voluto un bel po' di sperimentazione per capire come la selezione naturale avrebbe potuto funzionare nel mondo artificiale del computer.

Finalmente abbiamo imparato a farlo, soprattutto grazie al lavoro di Danny Hillis, Tom Ray e di altri. La prima regola è di non specificare i criteri di selezione dall'esterno: lasciando che tutti gli "organismi" interagiscano l'uno con l'altro, all'interno di un ambiente dinamico, il criterio selettivo emerge infatti da solo, in modo spontaneo. Per ciascuno di questi "organismi", la "natura" è l'insieme dinamico degli altri organismi presenti nel computer. Lasciandoli interagire in modo che possano porsi vicendevolmente dei quesiti, noi assistiamo all'emergere della natura all'interno del computer, la cui logica si sviluppa nel tempo al di là delle nostre capacità di previsione.

Di solito, una collezione di organismi in un mondo artificiale sviluppa un'ecologia, che rimane stabile per qualche tempo, per poi collassare. Dopo una

transizione caotica si forma una nuova ecologia e il processo continua. La capacità di adattamento e la pressione selettiva sono determinate appunto dall'attività collettiva, in perenne evoluzione, di questi organismi. Sono convinto che questo ecosistema virtuale - ciò che ho definito vita artificiale - costituisca una vera e propria natura in vitro, molto utile per studiare i meccanismi della natura reale.

L'idea che l'uomo possa creare una natura al computer desta all'inizio un po' di sconcerto. I computer hanno a che fare con algoritmi, che paiono quanto di più lontano si possa immaginare dal mondo naturale. La natura è confusa e imprevedibile, mentre gli algoritmi sono precisi e prevedibili. Tuttavia chi conosce l'informatica sa che perfino gli algoritmi più semplici possono generare comportamenti nuovi e del tutto imprevedibili. Il mondo di un computer può essere tanto sregolato e bizzarro quanto quello esterno.

Il calcolatore può essere concepito in due modi diversi: come una macchina che fa girare un programma e calcola un numero, oppure come un universo logico-digitale che si comporta in molti modi diversi. Nel primo seminario sulla vita artificiale che ho organizzato ai National Laboratories di Los Alamos nel 1987, abbiamo fatto il punto sui vari tentativi di simulare la vita al computer. Ci siamo accorti che tutti questi esperimenti condividevano uno stesso schema: molte entità elementari interagivano per dare vita a qualcosa di collettivamente complesso. Continuando nei nostri esperimenti su questa elaborazione distribuita, siamo riusciti a creare nei nostri computer universi sufficientemente complessi per sostenere processi viventi. In altri termini, si può dire che questi processi si comportano nei loro universi nel modo in cui gli esseri viventi si comportano nel nostro.

Se in teoria l'intelligenza artificiale e la vita artificiale sono abbastanza simili, nella pratica sono molto diverse. Ambedue cercano di riprodurre al computer processi naturali. Chi si occupa di intelligenza artificiale simula le attività più astratte della mente umana, quelle che a prima vista sembrerebbero più difficili da riprodurre, come il gioco degli scacchi. Paradossalmente, è stato più facile spiegare al computer questo genere di cose che istruirlo a fare quelle apparentemente più semplici, come afferrare una palla da baseball o riconoscere la faccia di un amico nella folla.

Gli studiosi di vita artificiale hanno lasciato perdere l'uomo per concentrarsi sulle forme di vita più semplici, come gli organismi unicellulari o gli insetti, e su forme di organizzazione sociale come i formicai. Al contrario di chi si occupa d'intelligenza artificiale, noi partiamo dal basso per arrivare in alto, possibilmente alla stessa coscienza umana. Invece di descrivere un fenomeno partendo dal suo livello di organizzazione, cerchiamo di capire come viene generato dai livelli inferiori.

La cosa risulterà più chiara con un esempio: le equazioni di Navier-Stokes descrivono la dinamica dei fluidi in modo eccellente. Tuttavia questa descrizione, altamente complessa, viene calata dall'alto in basso al sistema, nel senso che il fluido non è ovviamente in grado di calcolare le equazioni di Navier-Stokes. Se osserviamo il comportamento del fluido, vediamo piuttosto che esso è determinato dall'interazione di tutte le particelle che lo compongono (per esempio, le molecole d'acqua). Pertanto la sua dinamica può essere descritta anche in termini di urti tra le sue particelle. Questo è un esempio di approccio "dal basso all'alto", che ha il vantaggio di essere più aderente al modo in cui un fenomeno viene generato in natura.

Il modo tradizionale di studiare l'intelligenza è simile all'approccio di Navier-Stokes alla dinamica dei fluidi. Con la differenza che per fenomeni come la vita e l'intelligenza umana una spiegazione "dall'alto al basso" sembra non funzionare. Secondo me, se non abbiamo ancora trovato regole di questo genere è perché non è possibile formularle.

Nella fase pionieristica dell'intelligenza artificiale, i ricercatori si raffiguravano il cervello come un calcolatore universale, prescindendo del tutto dalla sua particolare

architettura biologica formatasi in millenni di evoluzione. Tuttavia le differenze tra cervello e computer non possono essere ignorate: i nostri calcolatori sono dotati di un controllore centrale che lavora secondo regole che vanno "dall'alto al basso". Il cervello, invece, opera secondo schemi distribuiti, paralleli e che procedono "dal basso all'alto". È necessario, allora, che i nostri computer simulino questa logica parallela e distribuita che la natura ha selezionato e adoperato a suo vantaggio facendone l'elemento costitutivo della intelligenza e della coscienza umane. Solo in questo modo potremo sperare di penetrarne il raffinato funzionamento.

Se analizziamo l'architettura di gran parte dei sistemi complessi che esistono in natura - il sistema immunitario, le cellule viventi, ma anche l'economia, gli stati, le aziende - notiamo che non c'è un singolo elemento che controlla tutto il sistema. Vi sono certamente parti più importanti di altre, come il nucleo della cellula, o il consiglio dei ministri in uno stato; ciononostante il sistema nel suo complesso si evolve in modo autonomo. Anzi, questi sistemi non potrebbero sopravvivere se tutto dovesse essere controllato da un unico organo centrale. La natura ha imparato a produrre organizzazione senza aver bisogno di un unico capo; le sue creazioni sono molto più robuste, adattative, flessibili e innovative delle nostre, che dipendono da un controllore centrale.

Il formicaio è uno splendido esempio di organizzazione orizzontale e distribuita. Non c'è una formica che comandi le altre o che abbia una visione d'insieme sulla base della quale scegliere cosa fare. Ogni formica ha in realtà un repertorio molto limitato di comportamenti e ognuna svolge la sua mansione interagendo con le altre formiche e con la situazione dell'ambiente che la circonda. Considerando l'attività del formicaio nel suo complesso, restiamo colpiti dalla coerenza e dall'intelligenza del tutto. Questo non dipende da una singola formica, ma da una sorta di modello dinamico a cui si uniforma la popolazione: il comportamento collettivo del formicaio in qualche modo eccede la somma dei comportamenti delle singole formiche.

Questo esempio mostra come si possa essere vitalisti e meccanicisti allo stesso tempo. All'inizio vi sono individui che si scontrano fra loro e compiono azioni risultanti dalle loro interazioni locali. Questo microcosmo dà luogo a un modello collettivo di dinamica globale. A loro volta questi modelli globali determinano il contesto entro il quale interagiscono gli individui. Questo contesto può avere effetti stabilizzanti; se però la stabilizzazione è eccessiva, il sistema perde il suo dinamismo, diventa come un cristallo e non può più reagire a stimoli esterni. Il sistema deve rispondere a pressioni esterne più come un fluido che come un cristallo, rimpiazzando un modello organizzativo con un altro a seconda delle circostanze. In questo senso i modelli globali di organizzazione possono essere causali, come vuole il vitalismo, e nel contempo dipendere dalla dinamica del microcosmo e degli individui che lo costituiscono, come esige il meccanicismo.

Alla fine del secolo XIX il fisico austriaco Ludwig Boltzmann spiegò molte proprietà termodinamiche dei sistemi macroscopici in termini di attività collettiva degli atomi che li compongono. Il suo contributo più importante alla nostra comprensione del rapporto tra il microcosmo degli atomi e il mondo macroscopico è la sua definizione di entropia: $S = k \log W$. Negli anni Cinquanta il matematico Claude Shannon generalizzò la formula di Boltzmann dal dominio della termodinamica a quello più ampio della teoria della probabilità, dando un significato più preciso e quantitativo al concetto di "informazione". È stato un passo fondamentale. Tuttavia credo che vi siano anche altri concetti della termodinamica e della meccanica statistica che possono essere estesi all'ambito della biologia e dei sistemi complessi.

Come ha fatto rilevare Doyno Farmer, la nostra attuale comprensione dei sistemi complessi ricorda quello che sapevamo della termodinamica a metà dell'Ottocento, quando gli scienziati cominciarono a farsi un'idea dei concetti di base ma non si raccapezzavano ancora con le grandezze da misurare. Fino a quando non

capiremo quali sono le grandezze da misurare non potremo sperare di costruire una teoria soddisfacente.

Il fisico francese Sadi Carnot fu il primo a individuare le grandezze fondamentali, come il calore e il lavoro. I suoi studi furono seguiti da quelli di Rudolf Clausius e Josiah Willard Gibbs, fino a che Boltzmann non escogitò la formula dell'entropia.

La mia ricerca si è concentrata su alcune proprietà generali dei sistemi termodinamici che sembrano importanti per la comprensione dei sistemi complessi. Si prendano per esempio le transizioni di fase che vengono studiate dalla meccanica statistica. Un sistema fisico subisce una transizione di fase quando cambia il suo stato, per esempio quando l'acqua si trasforma in ghiaccio o in vapore. È proprio durante questi passaggi che la materia esibisce i suoi comportamenti più complessi e fa entrare in gioco i processi di informazione. Si sarebbe tentati di dire che durante le loro transizioni di fase i sistemi sono impegnati in calcoli complessi per riuscire a determinare il loro stato fisico. Più ancora dell'energia, mi pare che sia l'informazione ciò che determina il comportamento dei sistemi in questi delicati passaggi da uno stato all'altro. Da molto tempo l'accordo tra fisica e teoria dell'informazione è visto come il Santo Graal della ricerca scientifica. Io non posso dire di averlo trovato, ma credo di avere localizzato quantomeno la regione in cui si trova.

Tutte le volte che si è cercato di riprodurre la vita in laboratorio, si è voluto imitare qualche organismo specifico, come un'anatra o un topo. Il matematico ungherese John von Neumann fu il primo a pensare che, anziché riprodurre materialmente un processo biologico dell'auto-riproduzione, era più importante scoprirne il fondamento logico.

Egli dimostrò così che era possibile costruire una macchina - più precisamente un algoritmo - in grado di riprodursi. I biologi non erano affatto interessati alla cosa, poiché l'auto-replicazione di un oggetto matematico sembrava non avere nulla in comune con quella biologica, basata sul modello dei cromosomi. A dispetto di tanto scetticismo, da questa teoria von Neumann fu in grado di derivare alcuni principi generali del processo di auto-riproduzione. Per esempio, scoprì che in una descrizione genetica l'informazione deve essere utilizzata in due modi: (1) deve essere interpretata come una serie di istruzioni per costruire se stessa o la sua discendenza; (2) deve essere copiata pedissequamente, senza interpretazione di sorta. Questo risultato si rivelò esatto per l'informazione contenuta nel dna, quando James Watson e Francis Crick ne descrissero la struttura nel 1953. Von Neumann aveva visto lontano studiando la biologia con strumenti puramente logici.

In fondo questo non è altro che il metodo della vita artificiale, che studia la logica della natura andando al di là della semplice osservazione naturalistica. Questa disciplina non va confusa però con la cosiddetta "biologia computazionale", che cerca di stabilire corrispondenze matematiche, per esempio, tra sequenze di proteine e sequenze di geni. La vita artificiale va molto al di là di questo tipo di biologia. Un suo tipico campo d'interesse è lo studio dell'evoluzione di "popolazioni" di programmi informatici: niente, quindi, che possa nemmeno lontanamente somigliare a genuini organismi naturali.

Per molti biologi noi stiamo semplicemente simulando l'evoluzione. Ma che differenza c'è tra l'evoluzione che si svolge dentro il computer e quella che avviene fuori di esso? Le entità che si stanno evolvendo sono fatte di materiale diverso, ma il processo è lo stesso. Col tempo penso che i biologi si ricrederanno su di noi. Condurre queste simulazioni al computer consente quel livello di astrazione necessario per poter rispondere a certe domande sull'evoluzione, per le quali né i fossili né la drosophila possono essere d'aiuto.

La vita creata artificialmente pone molti interrogativi in ogni settore della filosofia, dall'ontologia all'epistemologia, dall'etica alla scienza sociale. Che accada fra

dieci, cento o mille anni, poco importa: stiamo entrando in una fase in cui sarà possibile creare esseri viventi simili a noi non tanto nel materiale quanto nel tipo d'informazione. È facile cedere al fascino della fantascienza cercando d'immaginare come potrebbe essere la vita artificiale del futuro. Se creassimo robot autonomi da noi e in grado a loro volta di costruire i loro discendenti con materiali più evoluti dei loro, sarebbe impossibile prevedere il loro futuro e le interazioni fra i loro e i nostri figli.

Prima di dar vita a questo processo, bisognerebbe pensarci bene. Una volta un giornalista mi chiese cosa penserei se i miei figli vivessero in un mondo pieno di vita artificiale. Io risposi: "A quali figli si riferisce? Ai miei figli biologici o a quelli artificiali?". In un certo senso, entrambi sarebbero miei figli.

Sarà dura da accettare l'idea che le macchine possano essere altrettanto vive delle persone, e che la nostra vita non abbia nulla di così speciale da escludere una sua riproduzione in laboratorio. Sarà un passo tanto difficile quanto fu per i contemporanei di Galileo accettare il fatto che la Terra non fosse al centro dell'universo. Secondo il vitalismo, la vita non può essere ridotta al rango di una macchina; questo però implica, come disse il filosofo e scienziato britannico C.H. Waddington, che si sappia cosa sia una macchina e cosa sia capace di fare.

La ricerca sulla vita artificiale solleva anche una serie di questioni sulla natura della nostra esistenza e sulla realtà dell'universo in cui viviamo. Dopo aver passato molto tempo a creare universi artificiali, chiedendomi se su di essi sarebbero possibili forme di vita che si pongono le nostre stesse domande, mi domando se non esista un livello superiore in cui c'è qualcuno che si sta ponendo domande su di noi. Da un senso di vertigini pensare a questa eventualità. Secondo Edward Fredkin, per esempio, l'universo come noi lo conosciamo potrebbe essere l'output di un calcolatore presente in un universo più "reale". Ovviamente si tratta solo di un esperimento mentale, che ci consente tuttavia di aumentare il nostro grado di obiettività nei confronti della realtà in cui siamo immersi.

Fino a oggi la biologia si è esercitata a capire il vivente smontandone i meccanismi. Oggi stiamo scoprendo che è possibile anche acquisire nuove informazioni cercando di ricostruire la vita partendo dal nulla. Passando dall'analisi di "ciò che è" alla sintesi di "ciò che potrebbe essere", siamo obbligati a considerare l'universo non come una realtà data ma come una collezione di possibilità diverse.

La fisica si è configurata come la scienza della necessità, che scopre le leggi fondamentali della natura e asserisce ciò che deve essere vero a partire da queste leggi. La biologia, invece, è la scienza del possibile, che indaga processi possibili ma non necessari, date queste leggi. La biologia è quindi molto più complessa della fisica, ma anche molto più ricca di potenzialità, non solo per comprendere la storia della vita, ma anche per capire l'universo e il suo destino. La fisica è il passato, la biologia il futuro.

stuart kauffman Chris Langton è una persona disordinata, dispersiva, dotata di poco senso critico ma molto creativa e soprattutto straordinariamente intuitiva. Le sue tesi sul caos e le transizioni di fase sono suggestive e interessanti. È lui che ha lanciato l'idea degli automi cellulari e che ha azzardato l'ipotesi secondo cui i sistemi complessi possono generare e far circolare informazione. Il fatto che questo fenomeno sia più evidente durante le transizioni di fase può essere sbagliato, ma è molto convincente.

j. doyne farmer Chris Langton è un ingegnere degli automi cellulari. Sulla scia di John von Neuman, sta studiando il modo di realizzare sistemi autoriproducenti: in grado, cioè, di riprodursi in assenza dell'intervento umano. Von Neumann aveva mostrato la possibilità di costruire un universo autoriproducenti elaborando un

automa cellulare dotato di un certo numero di regole. In seguito aveva dimostrato come in quell'universo vi fossero modelli in grado di riprodurre qualsiasi altro modello e di eseguire qualsiasi operazione eseguibile da un computer.

Da un punto di vista teorico, è indubbiamente un risultato importante, ma nessuno è riuscito ancora a scorgere quali potrebbero essere le sue conseguenze pratiche. La nasa ha tentato di mettere a frutto queste conoscenze progettando escavatori lunari autoriproduttori. Ma ha dovuto arrendersi di fronte ad alcuni limiti di fondo. Pur possedendo alcune proprietà dei sistemi viventi, l'automa di von Neumann non è vivo. Per realizzare un automa vivo bisogna superare ancora molti ostacoli teorici e ingegneristici. Gli organismi naturali, infatti, non si limitano a riprodursi; sanno anche autoripararsi. Questa è una qualità essenziale per poter sopravvivere in un ambiente difficile com'è quello del mondo reale. Inoltre, gli organismi naturali non sono stati paracadutati sulla Terra già perfettamente sviluppati e plasmati in ogni minimo particolare da un dio cosciente: essi si sono evoluti spontaneamente attraverso un processo di autorganizzazione. Secondo von Neumann la vita può essere ricondotta a una serie di schemi logici astratti, ma fino a quando il modello non comprenderà anche questi aspetti, il tentativo sarà destinato allo scacco. Io credo che la soluzione di questi problemi non stia nei dettagli ma nel cambiare radicalmente punto di vista.

Chris e altri studiosi stanno cercando di dimostrare che i sistemi viventi hanno una natura puramente logica, descrivibile in termini matematici. Se riusciranno nell'impresa, il significato della vita subirà una profonda revisione.

w. daniel hillis Chris Langton è il guru della vita artificiale. Mi sembra che abbia ragione quando dice che la vita si trova in un punto di transizione fra l'ordine e il disordine o, come dice lui, al margine del caos, fra la temperatura in cui l'acqua diventa ghiaccio e quella in cui diventa vapore. Proprio lì in mezzo, dove l'acqua è liquida. Noi viviamo tra i due estremi del troppo strutturato e del poco strutturato.

Chris ha ottenuto risultati originali applicando concetti della fisica, come la transizione di fase e i sistemi dinamici, al mondo degli organismi biologici. Certo, nel campo della vita artificiale c'è molta fuffa, ma ci sono anche molte idee nuove e promettenti. Soprattutto grazie a Chris.

daniel c. dennett Chris è un'ottima levatrice intellettuale, nel senso che ha un talento formidabile nel far capire alle persone le conseguenze delle loro idee. Attualmente sta svolgendo un ruolo molto importante nell'ambito della vita artificiale, dove c'è chi sostiene tutto e il contrario di tutto. In questa confusione, Chris Langton tiene aperto il dialogo fra le varie scuole di pensiero e porta un po' di chiarezza.

francisco varela Non sono d'accordo con l'interpretazione funzionalista della vita artificiale sostenuta da Langton. Secondo lui, il modello è tutto. C'è invece un altro genere di biologia, che insiste sul carattere irripetibile degli organismi e della loro storia, sia quella individuale sia quella filogenetica.

Il funzionalismo ha dominato a lungo gli studi di intelligenza artificiale, ma ora è in corso una reazione a esso, come si vede, per esempio, nei lavori del cibernetico del mit Rodney Brooks. Secondo questa nuova tendenza, il modo in cui si sviluppa un particolare stile di vita dipende dal fatto che essa ha costruito delle regolarità che operano proprio per creare una storia autosufficiente. Nella *Vita meravigliosa*, Stephen J. Gould racconta i molti modi in cui la vita avrebbe potuto svilupparsi sulla Terra; e il fatto che alcuni organismi siano sopravvissuti e altri no non dipende dalla

razionalità di un modello logico ma dalla storia. In questo senso, Chris appartiene alla vecchia guardia funzionalista.

murray gell-mann Christopher Langton è stato fra i primi a capire che l'adattamento degli organismi trova le sue condizioni più favorevoli in una regione di transizione tra l'ordine e il disordine. Questa conclusione sarebbe confermata dalle teorie matematiche degli automi cellulari, che Langton ha sviluppato insieme a Norman Packard.

Nel frattempo Chris è diventato uno dei principali esponenti della vita artificiale. Personalmente non condivido questo modo radicale di studiare i fenomeni della vita. Secondo me è più produttivo considerare insieme i sistemi adattativi naturali e artificiali; mi sembra che facciano parte di uno stessa realtà. Inoltre non mi pare corretto separare quei sistemi artificiali che imitano gli organismi biologici da quelli che simulano altri sistemi adattativi, come le società umane. Cionondimeno le teorie di Chris hanno avuto molto seguito e oggi la categoria di vita artificiale va per la maggiore. Adesso sta lavorando anche su una nuova tecnica di calcolo generale chiamata *swarm*, che serve a simulare alcune proprietà dei sistemi adattativi complessi naturali. Sembra molto promettente.

22. J. Doyne Farmer

La seconda legge dell'organizzazione

j. doyne farmer, fisico, è professore esterno al Santa Fé Institute. Ha fondato la Prediction Company, una società di investimenti finanziari.

Nella seconda metà del nostro secolo si è affermata l'opinione che la vita e la coscienza sono emanazioni naturali e necessarie delle proprietà emergenti del mondo fisico. Questo cambiamento di prospettiva modifica anche le nostre credenze, il modo in cui concepiamo noi stessi e il ruolo che ci attribuiamo nell'universo.

In realtà, il processo è ancora in corso e sulla nuova idea di vita e di coscienza manca ancora un accordo generale. La nostra comprensione scientifica del fenomeno è ancora molto frammentaria e attende una sistemazione teorica più generale. Non si sa fino a che punto questo nuovo punto di vista abbia influenzato la filosofia e le scienze sociali, ma è indubbio che si sta diffondendo molto rapidamente condizionando il dibattito culturale anche al di fuori della scienza.

Da bambino ero ossessionato dal perché delle cose, e soprattutto dal perché sulla Terra ci sono esseri che si pongono questa domanda. Ed ero molto stupito nell'apprendere che interrogativi così importanti non avessero risposte soddisfacenti. L'unica conclusione che ho tratto dalla mia breve esperienza religiosa infantile è che la gente ha un disperato bisogno di rispondere a queste domande e che preferisce credere a Babbo Natale piuttosto che ammettere di non sapervi rispondere.

A Stanford mi iscrissi a filosofia, la materia che più delle altre prometteva di soddisfare le mie curiosità. Tuttavia mi accorsi ben presto d'essermi sbagliato: più che rispondere alle domande che mi interessavano, la filosofia si perdeva in interminabili dibattiti sul significato delle singole parole. Compresi allora che agli interrogativi che iniziano con un "perché" non si può dare una risposta diretta utilizzando l'arma spuntata del linguaggio naturale. Quindi abbandonai la filosofia per dedicarmi alla fisica, che non risponde ai "perché" ma ai "come".

L'inizio non fu facile: mi aspettavo di studiare i principi che stanno a fondamento dell'universo e invece dovevo mandare a memoria un sacco di formule sul moto dei gravi su di un piano inclinato. Porta pazienza, mi dicevo. Si vede che i gravi, le masse e i piani inclinati sono una sorta di rito di iniziazione alle cose più importanti. In effetti, a mano a mano che mi portavo avanti col programma, cominciavo a imparare qualcosa sui principi fondamentali, soprattutto grazie alle discussioni con i miei compagni di corso. Ed è proprio studiando il fenomeno della visione periferica nel corso di astronomia che compresi la ragione per cui bisognava seguire una strada indiretta, attraverso la fisica, per arrivare alla metafisica. La teoria della visione periferica sosteneva che per osservare una stella debole non bisogna fissarla direttamente, altrimenti sparisce alla vista.

Benissimo, ma dove guardare allora? Fuor di metafora, i miei studi di fisica mi hanno insegnato un metodo ma non mi hanno detto dove applicarlo. Nella sua ricerca del semplice, la fisica si è occupata degli aspetti più immediati della materia e dell'energia. Si chiede cosa fa muovere gli oggetti, e cosa li fa diventare caldi o freddi. E a queste conoscenze giunge spingendo, tirando, frantumando e facendo scontrare fra loro gli oggetti. Manipolando la materia, la fisica è approdata alla curvatura dello spazio-tempo, alla teoria dei quanti e al principio di indeterminazione: teorie necessarie ma non sufficienti per rispondere ai grandi quesiti, che vertono di fatto sulla natura della vita e dell'intelligenza. La fisica moderna si è spinta a riconoscere che la scienza è costituita da un elemento soggettivo, ma non è in grado di dire niente sulle origini della vita e della coscienza.

Occupati a scoprire quanti quark possono ballare sulla capocchia di uno spillo, i fisici delle alte energie si ostinano in una direzione che non porta da nessuna parte. Le ricerche dei cosmologi, che discettano su diverse configurazioni dell'universo, mi sembrano avere più a che fare con la religione che con l'osservazione di dati empirici. La fisica continua a preoccuparsi delle proprietà materiali dell'universo ignorando quelle informazionali. Per proprietà informazionali intendo quelle che hanno a che fare con l'ordine e il disordine.

Facendo il post-dottorato all'Università della California di Santa Cruz, ho avuto la fortuna di entrare in contatto con ricercatori del calibro di Jim Crutchfield, Norman Packard e Robert Shaw. Ho passato molto tempo insieme a loro speculando sulle proprietà informazionali della natura e sulle origini naturali dell'organizzazione. Le discussioni avute allora hanno esercitato una influenza decisiva sulla mia formazione intellettuale.

Con Norman ero amico fin dall'infanzia, quando abitavamo a Silver City, nel New Mexico. Già allora sognavamo di mettere in piedi una attività commerciale tutta nostra. L'idea si ripresentò più avanti: avevo appena preso la specializzazione e non ero molto soddisfatto dei miei studi sulla formazione delle galassie nelle cosmologie atipiche. Decisi allora di prendermi un anno di aspettativa e realizzare insieme a Norman e qualche altro amico un'idea pazzesca: applicare la fisica newtoniana al gioco delle roulette. Eravamo sicuri di vincere miliardi. Avevamo scoperto che, con un piccolo calcolatore nascosto nelle suole delle scarpe e azionato da un interruttore manovrato con un dito del piede, potevamo misurare la velocità della ruota e della pallina, in modo da prevedere dove si sarebbe fermata.

Fu un periodo pazzo, avventuroso e squattrinato. L'idea funzionava abbastanza bene e spesso abbiamo vinto nei casinò, senza riuscire però a fare tutti quei soldi che speravamo. Questa attività mi ha obbligato a imparare tutto sui computer; anzi, si può dire che siamo stati fra i primi a costruirne uno miniaturizzato e nascondibile. Il gioco della roulette, poi, mi ha insegnato molte cose sulla predizione e in particolare su come sia difficile prevedere il comportamento di un sistema fisico apparentemente semplice.

Così, quando un bel giorno Robert Shaw ha cominciato a parlarmi delle nuove teorie del caos, ho capito subito di cosa si trattava e l'importanza che poteva avere nella descrizione di sistemi fisici come quello della roulette. Pochi giorni dopo, io, Rob, Norman e Jim abbiamo fondato il Collettivo dei sistemi dinamici e ci siamo tutti laureati a Santa Cruz con tesi sul caos. Ragazzi, anni indimenticabili!

Il bello della teoria del caos è che spiega come piccoli cambiamenti possono dar luogo a effetti molto grandi nel futuro e come cose semplici possono essere difficili da prevedere. La mia fortuna è stata di imbartermi nella teoria del caos ai suoi inizi, quando si presentava ancora come un terreno tutto da esplorare.

Alla fine del mio post-dottorato non ero molto sicuro di trovare un lavoro. Non avevo voglia di fare l'impiegato, ma con una laurea in "caos" - argomento del quale ben pochi avevano già sentito parlare - non avevo molte possibilità di trovare un lavoro come scienziato. Ma un giorno lessi per caso che il Los Alamos National Laboratory bandiva un concorso per alcuni posti di Oppenheimer Fellowship. Sapevo chi era Oppenheimer, e in più Los Alamos era nel New Mexico dove ero cresciuto e dove mi sarebbe piaciuto tornare. Così, anche se non mi entusiasmava l'idea di andare a lavorare in un laboratorio dove si progettavano armi, feci ugualmente domanda.

Fin dalla prima visita, Los Alamos mi impressionò profondamente. Incontrai molte persone stimolanti, entusiaste del loro lavoro e tutt'altro che conservatrici sul piano scientifico. Il fatto che non facessi fisica tradizionale non fu un ostacolo: a Los Alamos c'era un'atmosfera di libertà intellettuale che non avevo mai trovato in nessun altro posto. Cominciai a lavorare sia al Centro per gli studi non-lineari sia al Dipartimento teorico. Mi diedero subito molte responsabilità e la massima libertà di ricerca. Ogni giorno, poi, ricevevamo visite di ricercatori impegnati nei settori più all'avanguardia della fisica e della matematica e dai quali imparai molte cose semplicemente ascoltandoli e ponendo domande.

Dopo alcuni anni passati a lavorare sul caos, cominciai a sentire l'esigenza di occuparmi dell'altra faccia del problema: l'organizzazione dell'universo. Nel 1983 il Centro per gli studi non-lineari mi consentì di organizzare, insieme a Tomas Toffoli e Stephen Wolfram, un congresso sugli automi cellulari. Tre anni dopo io, Alan Lapedes, Norman Packard e Burton Wendroff organizzammo un altro congresso su "Evoluzione, giochi e apprendimento".

Furono occasioni irripetibili per conoscere ricercatori e inventori di ogni genere, alcuni dei quali erano giunti a proporre la simulazione virtuale della vita. Allora erano davvero molto pochi coloro che si occupavano di queste cose, e fu molto importante incontrarci, conoscerci e scambiarsi le proprie opinioni.

Anche a Los Alamos c'erano persone che si occupavano di simili argomenti: Alan Lapedes e Dave Sharp studiavano le reti neurali, alcuni ricercatori di biologia teorica si dedicavano a studi informatici sul dna e anche su alcuni aspetti del sistema immunitario. Nel 1988 fondammo il Gruppo dei sistemi complessi nel quale entrarono a far parte anche Steen Rasmussen e Walter Fontana.

Nel frattempo nasceva il Santa Fé Institute, dove altri scienziati cominciarono a occuparsi di materie come l'economia, a cui non avevamo ancora prestato molta attenzione.

Fu in quegli anni che io e Norman Packard iniziammo a lavorare su due progetti di ricerca collegati fra loro: il primo consisteva in una simulazione al computer dei processi di riconoscimento ed evoluzione nel sistema immunitario. Nel secondo, insieme a Stuart Kauffman, cercammo di simulare l'evoluzione prebiotica.

I due progetti condividevano la stessa idea di fondo: ideare regole che permettessero alle parti di un sistema di evolversi e di interagire. Nel caso del sistema immunitario quelle parti erano rappresentate da concentrazioni di diversi tipi di anticorpi, mentre per l'evoluzione prebiotica entravano in gioco concentrazioni di proteine e altre molecole. Lo scopo della nostra ricerca era dimostrare come un metabolismo potesse sorgere in modo spontaneo, senza l'ausilio di molecole autoreplicanti come il dna. In effetti entrambe le simulazioni mostravano come le interazioni tra le parti di questi sistemi mutavano nel corso della loro evoluzione. Tutto ciò scaturiva da alcune semplici regole. Il computer faceva tutto da solo; noi ci eravamo limitati a introdurre nel programma le leggi basilari della chimica o, per meglio dire, delle approssimazioni molto rozze di queste leggi. Per comprendere il senso delle nostre ricerche, è necessario chiarire il meccanismo fondamentale dell'origine della vita. Riducendo il problema all'osso, si può dire che un sistema vivente - un organismo - consiste in una relazione simbiotica tra un metabolismo e un replicatore. Il metabolismo, composto da proteine e altro, estrae energia dall'ambiente, mentre il replicatore contiene l'informazione necessaria alla crescita e alla riproduzione dell'organismo. L'uno ha bisogno dell'altro: il replicatore possiede l'informazione per costruire le proteine e altre molecole indispensabili al metabolismo (l'rna); da parte sua, il metabolismo fornisce l'energia e le materie prime necessarie alla creazione e al funzionamento del replicatore.

A questo punto ci chiediamo: come è potuto nascere questo meccanismo di "io dò una cosa a te e tu dai una cosa a me"? E ancora: chi è venuto prima, il metabolismo o il replicatore? Non è forse vero che nessuno dei due può fare a meno dell'altro e quindi si sono sviluppati insieme?

Negli anni Cinquanta, il chimico Harold Urey e il biologo Stanley Miller ipotizzarono che i costituenti fondamentali delle proteine - gli amminoacidi - si formassero spontaneamente da "terra, fuoco e acqua". Tuttavia molto meno chiara era la sintesi delle molecole più complesse, necessarie per formare i replicatori e i metabolismi. Noi cercammo di dimostrare che un metabolismo poteva nascere ed evolversi spontaneamente a partire dagli amminoacidi, senza l'intervento di un replicatore.

In altre parole, il metabolismo poteva replicare se stesso utilizzando l'informazione immagazzinata nel cosiddetto brodo primordiale. Partendo dai semplici amminoacidi volevamo ottenere proteine complesse, ossia catene lunghe e altamente diversificate di amminoacidi. Potremmo esprimere questa capacità di autoreplicazione con il principio della rete autocatalitica, secondo cui tutto ciò che si trova nella pentola del brodo prebiotico ha almeno una reazione che lo crea, e tale reazione interessa solo elementi contenuti nella pentola. Ci troviamo di fronte a un sistema simbiotico, nel quale ogni cosa coopera al buon funzionamento del metabolismo. Se la replicazione normale si può paragonare a un rapporto monogamo, la riproduzione autocatalitica è come un'orgia. Ciò che ci interessava capire era se questo poteva essere simulato nel mondo artificiale di un calcolatore.

Nella nostra prima simulazione non successe un granché. Il brodo di amminoacidi era rimasto tale e quale. Ma dopo alcuni anni di lavoro, il nostro collega Rik Bagley riuscì ad accelerare la simulazione di un fattore 100 e a perfezionare la chimica inserita nel programma. Le cose cominciarono a girare per il verso giusto. Stabilendo con più precisione i parametri del sistema, il brodo prebiotico si trasformava spontaneamente in un insieme complesso e specifico di grandi molecole. Ma non di tutte le molecole. Benché la scelta fosse fra miliardi di tipi diversi, solo

qualche decina o centinaia venivano effettivamente sintetizzati. Proprio quello che succede nel metabolismo di un essere vivente. Nella successiva ricerca condotta insieme a Walter Fontana, siamo riusciti a dimostrare che il sistema poteva evolversi: con la comparsa di nuove proteine, il metabolismo si sviluppava spontaneamente.

Quello che abbiamo fatto nel campo della biologia virtuale viene utilizzato oggi da ricercatori come Chris Langton e Danny Hillis nello studio dei sistemi complessi. I grandi progressi della fisica sono stati realizzati quando si è riusciti a individuare sistemi semplici capaci di cogliere l'essenza di qualcosa. La meccanica quantistica, per esempio, è nata studiando l'atomo di idrogeno, il più semplice da trattare da un punto di vista matematico.

Per studiare i sistemi complessi bisogna seguire la stessa via: individuare un sistema depurato da tutte le complicazioni della realtà, ma che sia dotato delle proprietà comuni a tutti i sistemi. Qual è l'essenza dei sistemi complessi? Nessuno lo sa con precisione. Si discute ancora su cosa significhi "organizzazione" e se l'evoluzione debba tendere necessariamente verso livelli via via più organizzati.

Il nostro scopo è di trovare quella che potremmo definire la "seconda legge dell'autorganizzazione"; la chiamiamo così per opporla alla seconda legge della termodinamica, secondo cui i sistemi fisici tendono verso l'entropia, cioè il disordine. Chiunque consideri la seconda legge della termodinamica resta colpito da un paradosso: se infatti i sistemi fisici tendono verso il disordine, come si spiega l'ordine che vediamo intorno a noi? Deve esserci qualche altra forza in azione che spinge nella direzione opposta. La storia dell'universo ne tradisce la presenza. A partire dal big bang, il caos cede spazio a strutture ordinate: molecole via via più complesse, nubi di gas, stelle, galassie, pianeti, formazioni geologiche, oceani, metabolismi autocatalitici, vita, intelligenza, società ... Con il passare del tempo aumenta la complessità e l'organizzazione; forse questo processo non è universale e nemmeno irreversibile, ma è indubbio che all'aumento complessivo di entropia fa da contrappunto un'organizzazione sempre più raffinata della materia.

Molti spiegano questo paradosso affermando che la comparsa della vita e di forme evolute di organizzazione nell'universo sono fatti accidentali e altamente improbabili. Secondo questa visione, la vita non potrebbe svilupparsi altrove, perché ha bisogno delle stesse condizioni fisico-chimiche che si sono verificate sul nostro pianeta.

Non sono d'accordo. Perché mai la nostra situazione dovrebbe essere così speciale? Mi pare più ragionevole ammettere che se un fatto accidentale si è verificato una volta, esso possa ripetersi ancora. Lo stesso che accade con gli incidenti automobilistici: se ne consideriamo uno solo, esso ci apparirà come il frutto del caso. Ciò non toglie che entro la fine dell'anno ce ne saranno molti altri, di cui possiamo prevedere addirittura l'ordine di grandezza.

Il progredire della complessità dalle nubi gassose alle forme di vita non può essere visto come un evento casuale. C'è una logica che guida la materia ad assumere spontaneamente una certa organizzazione.

Questo punto di vista non è nuovo. È stato enunciato nel secolo scorso da Herbert Spencer, che ancora prima di Darwin parlò di evoluzione e di "sopravvivenza del più adatto". Tuttavia, pur avendo intuito che un processo di autorganizzazione era all'opera nella natura e nella società, Spencer non fu in grado di formulare in termini matematici questa idea, e tanto meno Darwin e i suoi epigoni. Ancora oggi questo resta il difficile compito della scienza dei sistemi complessi.

Molti di noi pensano che l'autorganizzazione sia una proprietà non solo dell'intero universo, ma anche dei sistemi matematici noti come "sistemi adattativi complessi". Fatti girare sul computer, questi sistemi si evolvono da stati caotici e indifferenziati a stati organizzati, differenziati e interdipendenti. Il progresso dal

disordine all'organizzazione avviene per salti e talvolta può cambiare di segno, proprio come succede nell'evoluzione naturale. Tuttavia, la tendenza generale è verso l'autorganizzazione.

I sistemi adattativi possono essere di due specie: deboli o forti. I sistemi deboli danno luogo solo a forme molto semplici di autorganizzazione. Quelli forti, invece, generano forme più complesse, come la vita. La distinzione fra sistemi deboli e forti può dipendere anche dall'ordine di grandezza in gioco: sebbene la *connection machine* (vedi capitolo successivo - *n.d.r.*) messa a punto da Danny Hillis sia molto grande, resta ben poca cosa al confronto del numero di Avogadro di processori che la natura ha a disposizione.

Ammettiamolo: sappiamo ancora molto poco di questi argomenti, ma forse è proprio questo a renderli così affascinanti. Ci sfugge la vera natura dell'organizzazione, ignoriamo perché alcuni sistemi siano adattativi e altri no, né possiamo dire oltre quale soglia di complessità un sistema può essere definito adattativo complesso. Ciò che sappiamo è che questi sistemi devono essere non-lineari e capaci di immagazzinare informazione; che le loro parti devono essere in grado di scambiarsi una certa quantità d'informazione. Al di sotto e al di sopra di questa quantità, la complessità viene meno. Come l'acqua al di sopra o al di sotto di una certa temperatura si trasforma in gas o ghiaccio, così la complessità vive di un delicato equilibrio.

Torniamo ora a chiederci chi e che cosa siamo: se si accetta il fatto che la vita e l'intelligenza sono risultati della naturale tendenza dell'universo a organizzarsi, il nostro stato attuale non è che un gradino di questo progresso. Ovviamente si deve andare con i piedi di piombo nel generalizzare da un tipo di evoluzione a un altro. Il pensiero di Spencer cadde in disgrazia a causa del darwinismo sociale, che giustificava la divisione fra ricchi e poveri in termini di maggiore o minore capacità di adattamento. Non si può trasportare di peso nell'evoluzione sociale ciò che è valido nell'evoluzione biologica. La prima è molto più rapida della seconda ed è caratterizzata da un tasso più elevato di altruismo e cooperazione.

Un altro concetto fondamentale della teoria dell'evoluzione è che l'uomo non è il capolinea della storia naturale. Attualmente noi siamo gli unici organismi in grado di esercitare un dominio sull'ambiente. Se decideremo di farlo, potremo utilizzare l'ingegneria genetica per mutare le caratteristiche della nostra discendenza. A mano a mano che aumenta la nostra conoscenza sul genoma umano, cercheremo di modificarlo per prevenire certe malattie e forse anche per perfezionare la nostre capacità intellettuali. Sta nascendo un grande dibattito intorno a questi temi, ma è certo che fenomeni come la sovrappopolazione e il bisogno crescente di lavoro qualificato ci spingeranno a seguire questa strada.

Le intelligenze cibernetiche sono il prossimo gradino dell'evoluzione dei sistemi complessi adattativi. Se le tecnologie informatiche continueranno a progredire al ritmo attuale, entro il 2025 avremo computer con capacità di elaborazione superiori a quelle del cervello umano. Inoltre è probabile che il numero dei computer sorpasserà quello degli esseri umani.

È difficile immaginare un mondo popolato da cyber-intelligenze simili all'uomo; è come chiedere a un cane di spiegare la relatività generale. Tuttavia credo che arriveremo proprio a un mondo di questo genere, perché è nella logica evolutiva dei sistemi adattativi complessi. Tutto questo avverrà molto più in fretta di quanto crediamo, diciamo un centinaio d'anni. Una delle caratteristiche più sorprendenti dell'evoluzione è che procede sempre più in fretta. E una volta che riusciremo a modificare il nostro genoma in modo lamarckiano, il cambiamento diventerà vertiginoso.

In quanto a me, cerco semplicemente di andare avanti mantenendomi sano di

mente, di crescere i miei figli e guadagnarli da vivere. Nel luglio 1991 lasciai Los Alamos: troppa burocrazia, troppa politica. Si perdeva più tempo in maneggi diplomatici per ottenere fondi che per fare ricerca. Il laboratorio destinava alla ricerca pura una percentuale dei finanziamenti ottenuti per progettare nuovi sistemi d'arma. Ma col venir meno della guerra fredda, i fondi per gli armamenti diminuivano e di conseguenza anche quelli per la ricerca pura. A Los Alamos l'età dell'oro della scienza era finita: gli apostoli della *confrontation* raschiavano ormai il fondo del barile alla disperata ricerca di qualche spicciolo; il Congresso diventava sempre più avaro con gli scienziati dei laboratori, spostando i fondi verso altre istituzioni scientifiche. Guidare un settore "inutile" e di frontiera non dava più soddisfazione, perché richiedeva più talento politico che abilità scientifica.

Così salutai tutti e tornai a lavorare con il mio vecchio amico Norman Packard sul progetto del casinò cibernetico. Raccogliemmo un piccolo capitale e fondammo a Santa Fé la Prediction Company, una società di trading finanziario. La nuova attività ha un certo successo: Jim McGill, un laureato in fisica all'Università di Santa Cruz, segue l'amministrazione; io e Norman, invece, mettiamo a frutto le nostre conoscenze sul caos per fare soldi con le transazioni finanziarie.

Qual è il senso ultimo della teoria del caos? Scoprire le regole semplici che sottendono un comportamento apparentemente casuale, in modo da poterne prevedere gli sviluppi. In un saggio scritto nel 1987, io e Sid Sidorowich abbiamo mostrato come è possibile prevedere l'andamento di certe forme di caos senza conoscere la dinamica che ne sta alla base, ma utilizzando un modello basato esclusivamente sui dati storici. Applicando quest'ipotesi a fenomeni come la dinamica dei fluidi, le macchie solari e le ere glaciali, abbiamo ottenuto risultati confortanti.

I mercati finanziari si comportano in modo non troppo dissimile da altri sistemi caotici e alcuni dei nostri modelli predittivi sembrano funzionare. La Prediction Company non fa altro che accumulare i dati storici di questi mercati, come i tassi di cambio delle varie divise, per cercare di proiettarli nel futuro in base a certi algoritmi. Ogni giorno i dati delle principali piazze finanziarie raggiungono i nostri computer, che in meno di un minuto elaborano previsioni ed effettuano scambi con le banche. Attualmente abbiamo un contratto con la Swiss Bank Corporation: loro ci forniscono il denaro per gli scambi e noi abbiamo una percentuale sugli utili. Ho l'impressione che le cose girino per il verso giusto, ma bisognerà aspettare ancora un paio d'anni per capire come butta.

In fondo stiamo conducendo un esperimento scientifico in piena regola: io e Norman stiamo cercando di dimostrare che, a dispetto delle teorie economiche che vanno per la maggiore, si può sbancare il mercato. I nostri modelli predittivi si basano sulla psicologia di massa, poiché gli operatori reagiscono alle informazioni economiche in modo prevedibile. Quindi, se riusciamo a indovinare l'andamento dei mercati finanziari, vuol dire che il comportamento di gruppi di esseri umani è prevedibile. È importante sottolineare che noi non basiamo le nostre previsioni su una certa visione dell'uomo, ma semplicemente su dati e modelli. Il tempo ci dirà se abbiamo avuto ragione.

Oggi gli scienziati sono trattati come mendicanti che dipendono dalla beneficenza delle agenzie governative. Se riusciremo ad arricchirci potremo concederci il lusso di fare gli scienziati senza chiedere la carità. Spero di rientrare nella mischia della ricerca sui sistemi complessi prima di essere troppo vecchio e rimbambito. Sono ancora molte le domande importanti che attendono una risposta e io sarò là, pronto a raccogliere le nuove sfide.

francisco varela Doyme Farmer proviene dalla tradizione della matematica pura. È molto bravo ad applicare a campi concreti teorie molto astratte come quelle dei

sistemi dinamici e del caos. Attualmente sta ottenendo buoni risultati nel settore economico, dove ha dimostrato che si possono fare previsioni a breve termine su sistemi intrinsecamente caotici. In questo senso Doyne è un genio della matematica applicata.

Egli è un nome di spicco del Santa Fé Institute e la sua reputazione supera di gran lunga quella degli altri ricercatori. Tanto che il suo nome ricorre con insistenza nei principali libri di scienza usciti recentemente, come *The Eudemonic Pie*, di Thomas A. Bass; *Caos*, di James Gleick; *Artificial Life*, di Steven Levy; *Complexity*, di Roger Lewin; *Complexity*, di Mitchell Waldrop; *Out of Control* di Kevin Kelly e *Who got Einstein's Office*, di Ed Regis.

È noto ciò che lui e Norman Packard stanno facendo con la Prediction Company; ma nessuno ha capito se hanno successo o no. Se riescono a imbroggiare le previsioni un po' meglio dei broker di Wall Street, c'è il rischio che guadagnino davvero migliaia di miliardi, almeno fino a quando gli altri non capiranno il loro metodo. Hanno circa due anni per sfondare.

brian goodwin Quando lo incontrai per la prima volta a Los Alamos, mi diede subito l'impressione di uno molto in gamba. A quei tempi lavorava sull'origine della vita. Doyne è un tipo sveglio, brillante e che vola alto. È un peccato che sia uscito di scena. Ma non importa: in fondo sta facendo quello che gli piace.

w. daniel hillis Mi dispiace che Doyne si sia messo in affari, perché era davvero bravo come ricercatore e come divulgatore della fisica. Doyne faceva parte di quel gruppo di fisici che a Los Alamos cominciò a occuparsi di complessità, fenomeni non-lineari e sistemi adattativi. Dalle loro riflessioni emerse che cose come gli "attrattori strani" non erano confinati alla fisica ma presenti ovunque, dai sistemi economici a quelli biologici. Questa fu una idea davvero molto importante, perché inaugurò il dialogo fra studiosi di discipline diverse. Da allora Stuart Kauffman cominciò a collegare la fisica con la biologia, e l'economista Brian Arthur fece lo stesso con l'economia e la biologia. In qualche modo Farmer diede a costoro un contesto di idee indipendenti dalle singole discipline, il che è molto importante.

murray gell-mann Doyne Farmer è uno scienziato di prim'ordine, che ha esordito nel campo della fisica teorica. Ha passato molto tempo al National Laboratory di Los Alamos, dove ha svolto un lavoro eccellente al Centro per gli studi non-lineari. A lui si deve l'apertura d'interesse verso i fenomeni caotici non prettamente fisici, come dimostra la teoria dei sistemi adattativi complessi. Molti ricercatori del Centro per gli studi non-lineari che hanno assistito alle discussioni sull'evoluzione, i giochi e l'apprendimento, si sono trasferiti in seguito al Santa Fé Institute.

Poi Farmer e Norman Packard hanno fondato una società di investimenti, sfruttando le loro scoperte sul carattere non del tutto casuale delle fluttuazioni di prezzo sui mercati finanziari. Gli economisti neoclassici più ortodossi continuano a sostenere che le fluttuazioni intorno ai cosiddetti "fondamentali" dei mercati finanziari equivalgono a una "passeggiata" del tutto casuale. Ma negli ultimi anni è stato dimostrato - credo in modo abbastanza convincente - che tali fluttuazioni non sono del tutto casuali. La possibilità di sfruttare questa pseudocasualità dipende però dall'entità della sua componente non casuale: se è grande, ogni previsione è impossibile. Se invece è ragionevolmente piccola, c'è qualche speranza.

Doyne e Norman sono arrivati alla conclusione che questa non-casualità è prevedibile e per questo hanno fondato la Prediction Company. Per i primi mesi di

attività hanno giocato con soldi finti, come si fa con il Monopoli. E hanno ottenuto buoni risultati. Allora un finanziere di Chicago li ha messi in contatto con una banca svizzera, e da allora giocano con soldi veri.

Richard dawkins Ho incontrato Doyne Farmer nel 1987 al congresso sulla vita artificiale organizzato dal suo collega Chris Langton. Ho anche letto *The Eudemonic Pie* di Thomas A. Bass e mi hanno molto divertito le imprese di Farmer e dei suoi amici. È un uomo molto interessante.

stuart kauffman Ho lavorato con Doyne Farmer sugli insiemi auto-catalitici di polimeri, proprio quando la scienza della complessità muoveva i primi passi. Ha dato un grande contributo alla teoria del caos. Peccato che adesso si occupi di finanza, perché è il tipo di scienziato che può mettere a segno un colpo storico. Mi rattrista che pensi più ai soldi che alla complessità, dove avrebbe ancora molto da dire.

christopher g. langton Doyne Farmer è stato un mentore scientifico e un buon amico, anche se ultimamente non lo vedo più così spesso come vorrei. Il suo talento era sprecato a Los Alamos, ha fatto bene ad andarsene e ad applicare le sue tecniche predittive al campo della finanza. La sua aspirazione è di non dipendere più da qualche testa di legno di Washington per svolgere le sue ricerche scientifiche. Se riuscirà a sbancare la roulette di Wall Street potrà finalmente fondare il proprio istituto per lo studio dei sistemi complessi e della vita artificiale. Gli auguro la miglior fortuna: senza barare, naturalmente.

Parte quinta

Qualcosa che va al di là di noi stessi

Nuova tecnologia vuoi dire nuove percezioni. Via via che creiamo nuovi strumenti e teorie ricreiamo noi stessi a loro immagine. La meccanica newtoniana ha dato vita alla metafora del cuore come una pompa. Una generazione fa, con l'avvento della cibernetica, dell'informatica e dell'intelligenza artificiale, abbiamo cominciato a pensare al cervello come a un computer. Con i recenti progressi nel campo dei calcolatori fortemente paralleli, la nostra immagine muta ancora. Finalmente siamo riusciti a superare la strozzatura rappresentata dai computer seriali di von Neumann.

W. Daniel Hillis sintetizza molte idee emerse in questo libro: la società della

mente di Marvin Minsky, la vita artificiale di Christopher Langton, la "visione a occhio di gene" di Richard Dawkins e la scienza della complessità che si studia a Santa Fé. Hillis ha sviluppato gli algoritmi che hanno reso possibile il calcolatore fortemente parallelo. Ha esordito come fisico per poi passare all'informatica, che è riuscito a scuotere dalle fondamenta. Ora ha cominciato ad applicare i suoi algoritmi allo studio dell'evoluzione. Secondo lui, l'effetto autocatalitico dei computer veloci - che ci consente di progettare a ritmo sempre più serrato computer via via più rapidi - non fa che mimare l'evoluzione dell'intelligenza.

Verso la fine degli anni Settanta Hillis ha costruito al mit la cosiddetta *connection machine*, un calcolatore costituito da circuiti integrati le cui operazioni parallele riflettono da vicino il funzionamento della mente umana. Tra le altre cose, nel 1983 ha fondato la Thinking Machines Inc., che ha prodotto il supercomputer più veloce al mondo, dotato di architettura parallela.

I computer superveloci di Hillis riescono a simulare il processo evolutivo. Essi, infatti, sono in grado di far competere fra loro diversi programmi scelti a caso, in modo da far scaturire da questa competizione nuove generazioni di programmi più evoluti. Come si vede, non siamo molto lontani da una vera e propria macchina pensante. Il lavoro di Hillis dimostra che quando i sistemi, anziché essere progettati in modo rigido, sono liberi di costruire se stessi, producono risultati superiori alla somma delle loro parti. Lavorando insieme, entità semplici generano qualcosa di complesso che le trascende. Le conseguenze di questa scoperta sulla biologia, l'ingegneria e la fisica saranno ragguardevoli.

23. W. Daniel Hillis

Vicini alla singolarità

w. daniel hillis è un informatico; ha fondato e dirige la Thinking Machines Inc. Ha al suo attivo 34 brevetti statunitensi e collabora con numerose riviste scientifiche, fra cui "Artificial life", "Complexity", "Complex Systems" e "Future generation computer systems". Ha scritto *The Connection Machine* (1985).

Mi piace costruire cose che hanno comportamenti complicati. Naturalmente, in questo campo nulla supera la mente. Il Santo Graal dell'ingegneria degli ultimi mille anni è stato di riuscire a costruire un artefatto capace di parlare, imparare, ragionare e creare. Per avvicinarsi a una cosa del genere i computer sequenziali che usiamo normalmente non vanno bene, perché non sono abbastanza potenti: più cose fanno e più lenti diventano. Proprio il contrario di ciò che succede alla mente umana. La maggior parte dei computer è progettata per fare un'operazione alla volta: un quadro lo guardano pezzo dopo pezzo, un database lo analizzano dato per dato. La mente umana, invece, considera prima tutto l'insieme e solo allora estrae la parte di informazione che le interessa. Io ho cercato di progettare un calcolatore dotato di questa capacità.

Per farlo mi sono servito della tecnologia dei circuiti integrati, grazie alla quale è possibile realizzare un computer che riesce a fare molte cose nello stesso tempo invece

di passarle in rassegna una a una. La mente funziona così perché il suo hardware è il cervello, peraltro molto lento se confrontato al calcolo digitale.

Con i circuiti integrati moderni è possibile replicare un'operazione molte volte e a costi molto bassi. Quindi ho iniziato a progettare un calcolatore reiterando il più possibile semplici circuiti e lasciando poi che si connettessero con gli altri modelli interrogatori.

Ma c'è un altro aspetto interessante della mente umana: se si seziona un cervello, ci si accorge che è costituito di tantissime connessioni fra neuroni. L'impresa più complicata sta proprio nel mettere nel computer la centralina che connette tutti quei piccoli elementi di elaborazione. Ecco perché ho chiamato il mio calcolatore *connection machine*. L'ho progettato al mit, ma ben presto mi sono reso conto che l'università non mi poteva dare tutte le risorse che sarebbero state necessarie per costruire una macchina così complessa. Così nel 1983 ho fondato la Thinking Machine Inc. e nei dieci anni successivi abbiamo costruito i computer più grandi e veloci del mondo.

Questa corsa alla quantità mi ha distolto da quello che era il mio primo obiettivo, cioè compiere progressi significativi nel campo del calcolo pensante. Oggi l'errore mi risulta chiaro: per anni abbiamo pensato che ogni parte dell'intelligenza potesse essere progettata. In linea di principio la cosa è possibile, ma ci vorrebbero almeno trecento anni per farlo. Sono talmente numerosi gli aspetti da considerare in una macchina intelligente che, se utilizzassimo i metodi costruttivi normali, saremmo ben presto sopraffatti dalla complessità. Dunque la cosa va impostata diversamente, anche perché vorrei vedere il frutto dei miei progetti prima di morire.

In questi anni ho capito anche quanto sia difficile far lavorare insieme molte persone a uno stesso progetto. In un certo senso, la *connection machine* è il marchingegno più complicato che gli uomini abbiano mai costruito. Essa è costituita da alcune decine di miliardi di parti attive e il modo in cui interagiscono non è ben chiaro nemmeno a coloro che le hanno progettate. L'unico modo per costruire un oggetto di questo genere è di frazionarlo in più parti. A ogni gruppo di lavoro va assegnata la progettazione di un modulo, ma ognuno di questi non può essere iniziato prima di decidere come interfacciarlo con gli altri.

Immaginiamo allora di metterci al lavoro. Qualcuno come Marvin Minsky direbbe: "Va bene, bisogna costruire un modulo per la visione, uno per il ragionamento formale, uno per la grammatica" e via elencando. Niente di più facile: Tommaso Poggio, ricercatore al mit, potrebbe dedicarsi al modulo della visione; Steve Pinker potrebbe fare quello della grammatica; Roger Schank quello del racconto (*story*). Poi Poggio prenderebbe il modulo della visione e direbbe: "Ok, adesso ci serve un modulo per la percezione tridimensionale e uno per il riconoscimento dei colori" e così via. A sua volta il gruppo che lavora sulla percezione tridimensionale replicherebbe: "Vabbè", ma prima ci serve un modulo che percepisca la percezione della profondità in base a dei *focus clues* e un altro che la percepisca in base alla visione binoculare".

Immaginate decine di migliaia di persone che si inseguono tutto il giorno con queste richieste. Il metodo costruttivo ortodosso non può fare altro che suddividere il progetto in tanti moduli quante sono le funzioni che abbiamo individuato nel cervello. Ma così facendo non credo che si arriverebbe molto lontano.

Tuttavia, una macchina così complessa può essere progettata anche con un approccio di tipo evolutivo, proprio come la natura ha fatto con noi. Ormai possediamo calcolatori sufficientemente veloci per poter simulare un processo di questo genere: nulla vieta, quindi, di fare in modo che programmi intelligenti si evolvano all'interno di un computer.

Sono riuscito in questo modo a ottenere programmi piuttosto complessi partendo praticamente dal nulla. Si inizia inserendo nel computer istruzioni casuali:

questi programmi cominciano a interagire, a competere, a fare sesso fra loro e quindi a produrre nuove generazioni di programmi. Se vengono inseriti in un mondo dove per sopravvivere bisogna risolvere un problema, in poche generazioni cominciano a sviluppare abilità per risolverlo e in alcune centinaia di migliaia di generazioni riescono a risolverlo perfettamente. A me sembra che questo sia il metodo giusto per realizzare una macchina pensante.

È curioso, poi, notare come dall'interazione di entità semplici emergano cose più grandi e complesse. Immaginiamo come potrebbe apparire un organismo multicellulare agli occhi di un organismo unicellulare: credo che risulterebbe del tutto incomprensibile. Allo stesso modo un essere umano che non ha mai avuto rapporti con i suoi simili non sarebbe in grado di comprendere il comportamento di una mente umana ben sviluppata. Molte delle attività mentali dell'uomo - e tra queste anche l'elaborazione di informazioni - sono frutto della cultura, cioè dell'interazione con i suoi simili. Così anche una macchina pensante, per essere veramente tale, dovrebbe essere parte della cultura e della società umana.

Da un punto di vista biologico, resta da capire come possono formarsi organismi complessi attraverso un semplice processo evolutivo. Da un punto di vista tecnologico, questo equivale a chiedersi come semplici transistor, di cui conosciamo le proprietà, possono generare comportamenti complessi che non comprendiamo. Infine, la fisica si pone la domanda più generale di come fenomeni semplici diano origine a fenomeni più complessi.

Queste discipline stanno cercando di rispondere essenzialmente alla stessa questione partendo da diverse angolazioni: come è possibile che il tutto sia maggiore della somma delle sue parti? O, detto altrimenti, che le relazioni fra individui elementari e incoscienti possano generare una realtà che li trascende? Di ciò si stanno occupando Marvin Minsky con la sua teoria della "società della mente" e Chris Langton quando parla di "vita artificiale". Questo interrogativo riecheggia anche nelle ricerche sull'evoluzione di Richard Dawkins e nella teoria dei quark di Murray Gell-Mann. È questa la domanda centrale della cultura scientifica contemporanea.

Mi ha sempre affascinato l'idea che facendo leva su alcuni principi generali dell'organizzazione possiamo cercare di produrre qualcosa che va al di là di noi stessi. In fondo tutta la storia della vita si inserisce in questo modello: le particelle elementari si sono organizzate in molecole chimiche, le quali a loro volta hanno dato luogo a organismi capaci di riprodursi. Da questi sono nate forme di organizzazione sociale e di comunicazione linguistica. Ora le società si stanno costituendo in unità più grandi, superando il loro isolamento attraverso connessioni di tipo tecnologico. Il prossimo gradino della scala è la creazione di macchine pensanti.

Il mio obiettivo attuale è di instillare nelle macchine un'intelligenza capace di evolversi. Le nostre ricerche sono ancora agli esordi. Quello che siamo riusciti a ottenere finora è di far sì che il computer costruisca un programma a partire da sequenze casuali di istruzioni. Io gli chiedo: "Computer, potresti per favore produrre cento milioni di sequenze casuali di istruzioni? Bene, ora esegui tutte queste istruzioni e questi programmi e seleziona solo quelli che si avvicinano di più a ciò che volevo". In altre parole, ho definito quello che volevo compiere, ma non la maniera di compierlo.

Se devo ordinare delle parole in ordine alfabetico, posso ricorrere a questa evoluzione simulata per trovare un programma dotato di questa capacità. Ovviamente, partendo da istruzioni casuali, sarà difficile arrivare in breve tempo a un programma capace di tanto. Tuttavia, fra tutti i programmi prodotti spontaneamente dal computer potrebbe essercene uno che mette due parole nell'ordine giusto. Dirò allora al computer: "Salva il 10 per cento dei programmi casuali che hanno eseguito meglio il compito, uccidi tutti gli altri e fai in modo che i programmi scelti si riproducano con un metodo di ricombinazione analogo a quello sessuale. Ci siamo? Bene. Ora prendi

due programmi e genera dei figli facendo scambiare reciprocamente le loro sottoprocedure".

I "figli" erediteranno così le caratteristiche dei due programmi "genitori". Ora che dispongo di una nuova e più evoluta generazione di programmi, dico al computer: "Per favore, ripeti quel procedimento, valuta la loro capacità di eseguire il compito, introduci qualche mutazione casuale e ripeti il procedimento più volte, per molte generazioni".

Ogni generazione si avvicenda con la successiva in pochi millisecondi, e così in pochi minuti riesco a simulare al computer una evoluzione di milioni di anni. Alla fine otterrò un programma in grado di mettere le parole in ordine alfabetico con un'efficienza molto maggiore di qualsiasi programma ideato a tavolino da un matematico. È un algoritmo strano, misterioso: è capace di svolgere un compito, ma non sappiamo come. Possiamo solo dire che ha ereditato questa abilità dalle generazioni precedenti, che sono state selezionate in base al loro maggiore o minore adattamento a quel compito.

L'unico modo per vedere se un programma di questo genere fa il suo dovere è di metterlo alla prova. Accidenti! Ma se dobbiamo far volare un aereo come facciamo a fidarci, se non sappiamo come funziona? Eppure ci fidiamo di un pilota umano. Perché allora dovremmo dubitare di un programma automatico di volo che è stato prodotto secondo lo stesso schema evolutivo dell'uomo? Casomai dovremmo diffidare dell'aereo, che è stato progettato da un pool di ingegneri. Ricordo di aver volato una volta su un 747 con Marvin Minsky, il quale ha estratto dalla tasca della poltrona un dépliant che diceva: "Questo aereo si compone di centinaia di migliaia di parti, che lavorano tutte insieme per darvi un volo sicuro". Marvin mi ha detto: "Non ti dà fiducia?".

La progettazione tradizionale non funziona un granché quando è troppo complicata. Ora però stiamo cominciando a utilizzare calcolatori che sono in grado di generare programmi molto complessi con metodi diversi. Poiché non capiamo bene come fanno a girare, possiamo affermare che questo tipo di intelligenza ci sta sopravanzando. A mano a mano che costruiamo computer sempre più veloci, il processo sta diventando autocatalitico. Ci troviamo nella stessa condizione degli organismi unicellulari quando si stavano convertendo in organismi multicellulari. Proprio così, siamo come amebe che non capiscono in cosa diavolo si stanno trasformando.

Sarebbe molto pretenzioso credere di rappresentare il capolinea dell'evoluzione. In realtà noi siamo parte di un processo che ci sta traghettando oltre noi stessi. La cosa può apparire eccitante o deprimente, ma sta di fatto che ci stiamo avvicinando alla singolarità. Ripercorriamo mentalmente la storia chimica che dagli organismi unicellulari ha condotto all'intelligenza. Per fare il primo passo ci sono voluti miliardi di anni, per fare il secondo milioni di anni e così di seguito. Ora siamo a un punto in cui le cose cambiano di decade in decade, con la rapidità vertiginosa della tecnologia dei computer. Ci stiamo incamminando verso qualcosa che accadrà molto presto - nell'arco della nostra vita - e che è radicalmente diverso da ciò che si è verificato finora nella storia umana.

La gente ha smesso di pensare al futuro perché non riesce più a immaginarlo e a progettarlo. Quando ero bambino si era soliti parlare di ciò che sarebbe accaduto nel 2000. Oggi, al volgere del secolo, si continua a parlare di cosa succederà nel 2000. Da quando sono nato, il futuro prevedibile si è andato sempre più accorciando. Se cerco di immaginare quale direzione prenderà la tecnologia nei primi anni del prossimo secolo, vedo che avrà luogo qualcosa d'incomprensibile. Forse sarà la creazione di macchine intelligenti. Forse lo sviluppo delle telecomunicazioni ci fonderà in un organismo globale. Lo so, queste previsioni hanno il sapore del misticismo, e invece mi sembrano del tutto ragionevoli. Da qui a cinquant'anni avverrà qualcosa di imprevedibile e ciò mi

riempie di sgomento. E di curiosità.

marvin minsky Danny Hillis è uno degli scienziati più inventivi e profondi che abbia mai conosciuto. Ha contribuito con molte idee importanti allo sviluppo dell'informatica, in modo particolare nel settore della computazione parallela. È riuscito a far girare su computer in parallelo - dunque più velocemente - molti algoritmi che funzionavano solo su computer seriali. Per ogni nuova idea che gli viene in testa riesce a costruire una macchina e una serie di procedure matematiche per metterla alla prova. Dopo aver raggiunto splendidi risultati nell'informatica, ha cominciato a interessarsi di evoluzione. E credo che sia sulla buona strada per diventare uno dei massimi teorici in questo campo. È anche un ottimo affabulatore e un eccellente ingegnere. Non solo perché sa assemblare fra loro i materiali necessari alla realizzazione di un progetto, ma anche perché li sa scovare ovunque, con la fantasia e l'intuito di un artista. Anch'io credo di essere dotato di questo talento, ma non come Danny.

daniel c. dennett Mi ricordo quando ho conosciuto Danny. Si era appena laureato al mit con una tesi sulla intelligenza artificiale ed era chiaro fin d'allora che aveva idee molto originali. Fu allora che ideò la *connection machine*, un computer in grado di eseguire calcoli secondo una nuova logica. Questo ha aperto una nuova strada all'informatica.

Il matematico britannico Alan Turing fu il primo a definire lo spazio logico di tutti i possibili calcoli eseguibili dal computer. La macchina sviluppata da John von Neumann - il calcolatore seriale, quello che abbiamo sui nostri tavoli - è l'applicazione pratica delle idee di Turing. In linea di principio, la macchina di von Neumann può eseguire qualsiasi calcolo. Ma per farlo ci vorrebbero miliardi di anni. Lo spazio logico realmente esplorabile da una macchina è piuttosto limitato. Per esplorare altre regioni di quello spazio bisognava inventare un'altra architettura. Ed è quello che ha fatto Danny Hillis con i suoi computer fortemente paralleli. Questo ha scatenato una sorta di corsa all'oro. Potevamo disporre, infatti di un nuovo veicolo per esplorare territori della computazione ancora vergini. Danny è stato abilissimo nel conquistare a questa idea scienziati di discipline diverse e a mostrare quanto fosse potente e innovativo questo veicolo.

christopher g. langton Sono stato influenzato dalle idee di Hillis a partire dai suoi primi appunti sulla *connection machine* fatti circolare al mit. Danny ha un'abilità straordinaria nel seguire nuove piste e nel valutarne l'importanza. È in grado d'impadronirsi in un attimo dei risultati d'avanguardia di un nuovo campo di studio e di dare contributi originali. Spero che riesca a distogliersi dalla parte commerciale della Thinking Machines Inc. per dedicarsi totalmente alla ricerca scientifica. Non ho dubbi che otterrà grandi risultati.

francisco varela Hillis è un maestro nell'elaborare sistemi complessi. Non solo ha rivoluzionato l'informatica, ma è riuscito anche a rendere redditizie le sue scoperte. Con la *connection machine*, poi, ha realizzato una sorta di evoluzione virtuale dei software che ha dell'incredibile. Non so quanto questa evoluzione abbia davvero a che fare con quella biologica, ma è certo che ha inaugurato un nuovo modo ibrido di pensare.

Attualmente Danny si sta occupando della creazione di mondi artificiali, di universi paralleli. Siamo appena agli inizi ma si intravedono già sviluppi interessanti

per la biologia. In questa simulazione del processo evolutivo, la cosa interessante è quella di considerare le entità biologiche e i loro mondi come un unico sistema. In esso non c'è un interno e un esterno; il sistema è un tutto che semplicemente vive e si sviluppa in un mondo assolutamente reale.

roger schank Il grande merito di Danny Hillis è stato di far funzionare le macchine fortemente parallele. Ma i suoi nuovi computer non hanno influenzato per nulla il mio lavoro. Non è ben chiaro quale sia la loro utilità. Mi sembrano una sorta di giocattolino di scarsa utilità pratica. Secondo me l'essenza dei computer non sta nella loro potenza di calcolo; l'importante è capire cosa si vuol fare con essi. Le macchine di Hillis si limitano a essere più veloci delle altre. Ma il punto non è la velocità, non lo è mai stato.

murray gell-mann Danny Hillis mi è molto caro e penso un gran bene di lui. Oltre a essere una persona amabile, credo che sia un pensatore di primo piano. Vorrei capire di più del suo lavoro e così spero di vederlo ancora a lungo e d'imparare ad apprezzare le cose che gli piacciono.

=====

Bibliografia

Parte prima

Cronin, Helena. *The Ani and the Peacock*. New York: Cambridge University Press (1992).

Darwin, Charles R. *On the Origin of Species*. Cambridge: Harvard University Press (1859/1964); tr. it. *L'origine delle specie*, Torino, Bollati Boringhieri (1985⁷).

Dawkins, Richard. *The Blind Watchmaker*. New York: W.W. Norton (1986); tr. it. *L'orologio cieco*, Milano, Rizzoli (1988).

The Extended Phenotype. New York: Oxford University Press (1982); tr. it. *Il fenotipo esteso*, Bologna, Zanichelli.

River out of Eden. New York: Basic Books (1995).

The Selfish Gene. 2^a ed., New York: Oxford University Press (1989); tr. it. *Il gene egoista*, Milano, Mondadori.

Dobzhansky, Theodosius. *Genetics and the Origin of Species*. New York: Columbia University Press (1951).

- *Mankind Evolving: The Evolution of the Human Species*. New Haven: Yale University

- Press (1962); tr. it. *L'evoluzione della specie umana*, Torino, Einaudi (1971³).
- Eigen, Manfred. *Steps Towards Life*. New York. Oxford University Press (1992); tr. it. *Gradini verso la vita*, Milano, Adelphi (1992).
- Eldredge, Niles. *Fossils*. New York: Harry N. Abrams (1991).
- The Miner's Canary*. New York: Prentice Hall (1991).
- The Monkey Business*. New York: Washington Square Press (1982).
- Reinventing Darwin*. New York: John Wiley (1995).
- Time Frames: The Rethinking of Darwinian Evolution and the Theory of Punctuated Equilibria*. New York: Simon & Schuster (1985); tr. it. *Strutture del tempo*, Firenze, Hopeful Monster (1991).
- Unfinished Synthesis*. New York: Oxford University Press (1985).
- Eldredge, Niles e Stephen J. Gould. "Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism", in T.J.M. Schopf, cur., *Models in Paleobiology*. San Francisco: Freeman Cooper (1972).
- Eldredge, Niles e Marjorie Grene. *Interactions*. New York: Columbia University Press (1992).
- Ewald, Paul W. "Cultural Vectors, Virulence, and the Emergence of Evolutionary Epidemiology". *Oxford Surveys in Evolutionary Biology* 5 (1988) 215-245.
- Fisher, Ronald A. *The Genetical Theory of Natural Selection*. Oxford: Clarendon Press (1930).
- Goldschmidt, Richard. *The Material Basis of Evolution*. New Haven: Yale University Press (1940).
- Gould, Stephen Jay. *Bully of Brontosaurus*. New York: W.W. Norton (1992); tr. it. *Bravo brontosauero*, Milano, Feltrinelli (1992).
- Ever Since Darwin*. New York: W.W. Norton (1977).
- The Flamingo's Smile*. New York: W.W. Norton (1985); tr. it. *Il sorriso del fenicottero*, Milano, Feltrinelli (1987).
- Hen's Teeth and Horse's Toes*. New York: W.W. Norton (1983); tr. it. *Quando i cavalli avevano le dita*, Milano, Feltrinelli (1991²).
- The Mismeasure of Man*. New York: W.W. Norton (1981).
- Ontogeny and Phylogeny*. Cambridge: Harvard University Press (1977).
- The Panda's Thumb*. New York: W.W. Norton (1980); tr. it. *Il pollice del panda*, Roma, Editori Riuniti (1992).
- Time's Arrow, Time's Cycle: Myth and Metaphor in the Discovery of Geological Time*. Cambridge: Harvard University Press (1987); tr. it. *La freccia del tempo*, Milano, Feltrinelli (1989).
- An Urchin in the Storm*. New York: W.W. Norton (1988); tr. it. *Un riccio nella tempesta*, Milano, Feltrinelli (1991).
- Wonderful Life*. New York: W.W. Norton (1989); tr. it. *La vita meravigliosa*, Milano, Feltrinelli (1990).
- Gould, Stephen Jay e Richard C. Lewontin. "The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme". *Proc. Roy. Soc. London B* 205 (1979), 581-598.

- Gould, Stephen Jay e Etisabeth S. Vrba. "Exaptation-A Missing Term in the Science of Form". *Paleobiology* 8 (1982), 4-15.
- Haldane, J.B.S. *The Causes of Evolution*. London: Longmans (1932).
- Hamilton, W.D. "The Genetical Evolution of Social Behaviour" (I e II). *Journal of Theoretical Biology* 7 (1964), 1-52.
- "The Moulding of Senescence by Natural Selection". *Journal of Theoretical Biology* 12 (1966), 12-45.
- Hull, David L. "Interactors versus Vehicles", in H.C. Plotkin, cur., *The Role of Behavior in Evolution*. Cambridge: mit Press (1988).
- Jones, Steve. *The Language of the Genes: Biology, History, and the Evolutionary Future*. London: Harper Collins (1993).
- Jones, Steve, Robert Martin e David Pilbeam, cur. *The Cambridge Encyclopedia of Human Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press (1992).
- Lewontin, Richard C, Steven Rose, e Leon J. Kamin. *Not in Our Genes*. New York: Pantheon (1984).
- Lovelock, James. *Gaia*. New York: Oxford University Press (1979); tr. it. *Gaia*, Bologna, Zanichelli (1992).
- Margulis, Lynn. *Early Life*. Boston: Jones & Bartlett (1981).
- The Origin of Eukaryotic Cells*. New Haven: Yale University Press (1970).
- Symbiosis in Cell Evolution*. 2^a ed., New York: W.H. Freeman (1993).
- Mystery Dance*. New York: Summit Books (1991); tr. it. *Danza misteriosa*, Milano, Mondadori (1992).
- Margulis, Lynn e Dorion Sagan. *Microcosmos*. New York: Simon & Schuster (1986); tr. it. *Microcosmo*, Milano, Mondadori (1989).
- *Origins of Sex* New Haven: Yale University Press (1986).
- Margulis, Lynn e Karlene V. Schwartz. *Five Kingdoms: An illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth*. T ed., San Francisco: W.H. Freeman (1988).
- Maynard Smith, John. *Did Darwin Get It Right?* London: Chapman & Hall (1989).
- *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge: Cambridge University Press (1982).
- *The Evolution of Sex*. Cambridge: Cambridge University Press (1978).
- *The Problems of Biology*. Oxford: Oxford University Press (1986); tr. it. *Le nuove frontiere della biologia*, Bari, Laterza (1988).
- Mayr, Ernst. *The Growth of Biological Thought*. Cambridge: Harvard University Press (1982); tr. it. *Storia del pensiero biologico*, Torino, Bollati Boringhieri (1990).
- *Toward a New Philosophy of Biology*. Cambridge: Harvard University Press (1988).
- Medawar, Peter. *The Limits of Science*. New York: Harper & Row (1984); tr. it. *I limiti della scienza*, Torino, Bollati Boringhieri (1985).
- *Memoir of a Thinking Radish*. Oxford: Oxford University Press (1988); tr. it. *Memorie di un ravanello pensante*, Roma, Armando (1993).
- Nesse, Randolph, M.D., e George C. Williams. *Why We Get Sick*. New York: Times Books (1995).
- Simpson, George Gaylord. *The Major Features of Evolution*. New York: Columbia

- University Press (1953).
- The Meaning of Evolution*. New Haven: Yale University Press (1949).
- Tempo and Mode in Evolution*. New York: Columbia University Press (1944).
- Snow, C.P. *The Two Cultures*. Cambridge: Cambridge University Press (1993); tr. it. *Le due culture*.
- Sober, Elliott. *The Nature of Selection*, Cambridge: mit Press (1984). Stanley, Steven M. *Children of the Ice Age*. New York: Crown (1995).
- *The New Evolutionary Timetable*. New York: Basic Books (1981).
- Stebbins, G.L. *Variation and Evolution in Plants*, New York: Columbia University Press (1950).
- Sturtevant, A.H. "On the Effects of Selection on Social Insects". *Quarterly Review of Biology* 13 (1938), 74-76.
- Thompson, D'Arcy W. *On Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press (1917).
- Trivers, Robert. *Social Evolution*. Menlo Park CA: Benjamin/Cummings (1985).
- Vrba, Elisabeth S. e Niles Eldredge. "Individuals, Hierarchies, and Processes: Towards a More Complete Evolutionary Theory". *Paleobiology* 10 (1984), 146-171.
- Waddington, C.H. *The Evolution of an Evolutionist*. Edinburgh: Edinburgh University Press (1975).
- *The Nature of Life*. London: Allen & Unwin (1962).
- *The Strategy of the Genes*. London: Allen & Unwin (1957).
- Weismann, August. "The All-Sufficiency of Natural Selection: A Reply to Herbert Spencer". *Contemporary Review* 64 (1893), 309-338, 596-610.
- Williams, George C. *Adaptation and Natural Selection: A Critique of Some Current Evolutionary Thought*. Princeton: Princeton University Press (1966).
- Natural Selection: Domains, Levels and Challenges*. New York: Oxford University Press (1992).
- Sex and Evolution*. Princeton : Princeton University Press (1975).
- Wilson, Edward O. *The Diversity of Life*. Cambridge: Harvard University Press (1992).
- *On Human Nature*. Cambridge: Harvard University Press (1978).
- Sociobiology: The New Synthesis*. Cambridge: Harvard University Press (1975); tr. it. *Sociobiologia. La nuova sintesi*, Bologna, Zanichelli (1979).
- Wright, Sewall. "Adaptation and Selection", in *Genetics, Paleontology, and Evolution*, G.L. Jepson, E. Mayr e G.G. Simpson, cur. Princeton: Princeton University Press (1949).
- "Evolution in Mendelian Populations". *Genetics* 16 (1931), 97-159.
- "Tempo and Mode in Evolution: A Critical Review". *Ecology* 26 (1945), 415-419.
- Wynne-Edwards, V.C. *Animal Dispersion in Relation to Social Behaviour*. Edinburgh: Oliver & Boyd (1962).

Parte seconda

- Chomsky, Noam. *Knowledge of Language*. New York: Praeger (1986); tr. it. *La conoscenza del linguaggio*, Milano, il Saggiatore (1985).
- Dennett, Daniel C. *Brainstorms*. Montgomery VT: Bradford Books (1978); tr. it. *Brainstorms*, Milano, Adelphi (1991).
- Consciousness Explained*. Boston: Little, Brown (1991); tr. it. *Coscienza. Che cosa è*, Milano, Rizzoli (1993).
- Content and Consciousness*. London: Routledge & Kegan Paul (1969); tr. it. *Contenuto e coscienza*, Bologna, il Mulino (1992).
- Elbow Room: The Varieties of Free Will Worth Wanting*. Cambridge: mit Press/Bradford (1984).
- The Intentional Stance*. Cambridge: mit Press/Bradford (1987); tr. it. *L'atteggiamento intenzionale*, Bologna, il Mulino (1993).
- Dreyfus, Hubert. *What Computers Can't Do*. 2^a ed., New York: Harper & Row (1979); tr. it. *Che cosa non possono fare i computer*, Roma, Armando.
- Dreyfus, Hubert e S.E. Dreyfus. *Minds Over Matter*. New York: The Free Press (1986).
- Hofstadter, Douglas R. e Daniel C. Dennett. *The Mind's I*. New York: Bantam (1982); tr. it. *L'io della mente*, Milano, Adelphi (1992).
- Humphrey, Nicholas. *Consciousness Regained*. Oxford: Oxford University Press (1983).
- A History of the Mina*. New York: Simon & Schuster (1992).
- The Inner Eye*. London: Faber & Faber (1986).
- " 'Interest' and 'Pleasure' ": Two Determinants of a Monkey's Visual Preferences". *Perception* 1 (1972), 395-416.
- Jacob, Francois. *The Possible and the Actual*. Seattle: University of Washington Press (1982).
- Levelt, Willem. *Speaking*. Cambridge: mit Press/Bradford (1989).
- Maturana, Humberto D. e Francisco J. Varela. *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. Boston: D. Reidel (1980); tr. it. *Autopoiesi e cognizione*, Padova, Marsilio (1985).
- *The Tree of Knowledge*. Boston: New Science Library (1987); tr. it. *L'albero della conoscenza*, Milano, Garzanti (1987).
- Minsky, Marvin. *The Society of Mind*. New York: Simon & Schuster (1986); tr. it. *La società della mente*, Milano, Adelphi (1989).
- Minsky, Marvin e Seymour Papert. *Perceptrons*. Nuova ed., Cambridge: mit Press (1987).
- Moravec, Hans. *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence*. Cambridge: Harvard University Press (1988).
- Papert, Seymour. *Mindstorms*. New York: Harper & Row (1981).
- Penrose, Roger. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. New York: Oxford University Press (1989); tr. it. *La mente nuova dell'imperatore*, Milano, Rizzoli (1992).
- *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*. New York:

- Oxford University Press (1994).
- Pinker, Steven. *The Language Instinct*. New York: William Morrow (1994).
- *Learnability and Cognition: The Acquisition of Argument Structure*. Cambridge: mit Press (1989).
- Pinker, Steven e Paul Bloom. «Natural Language and Natural Selection». *Behavioral and Brain Sciences* 13 (1990), 707-784.
- Schank, Roger. *The Connoisseur's Guide to the Mind*. New York: Summit Books (1991).
- Tell Me a Story*. New York: Scribners (1990).
- The Creative Attitude: Learning to Ask and Answer the Right Questions*. New York: Macmillan (1988).
- Schank, Roger e R. Abelson. *Scripts, Plans, Goals, and Understanding: An Inquiry into Human Knowledge Structures*. Hillsdale NJ: Erlbaum (1977).
- Schank, Roger e Peter Childers. *The Cognitive Computer*. Reading MA: Addison-Wesley (1988); tr. it. *Il computer cognitivo*, Firenze, Giunti, 1989.
- Searle, John. *Minds, Brains, and Science*. Cambridge: Harvard University Press (1984); tr. it. *Mente, cervello, intelligenza*, Milano, Bompiani (1987).
- *The Rediscovery of the Mind*. Cambridge: mit Press (1992); tr. it. *La riscoperta della mente*, Torino, Bollati Boringhieri (1994).
- Varela, Francisco J. *Principles of Biological Autonomy*. New York: Elsevier North Holland (1979).
- Varela, Francisco J., Evan Thompson e Eleanor Rosch. *The Embodied Mind*. Cambridge: mit Press (1992).

Parte terza

- Barrow, John D. e Frank J. Tipler. *The Anthropic Cosmological Principle*. New York: Oxford University Press (1986).
- Davies, Paul. *The Cosmic Blueprint*. New York: Simon & Schuster (1989).
- The Edge of infinity*. New York: Simon & Schuster (1981); tr. it. *Sull'orlo dell'infinito*, Milano, Mondadori (1994).
- God and the New Physics*. New York: Simon & Schuster (1983); tr. it. *Dio e la nuova fisica*, Milano, Mondadori (1986).
- The Last Three Minutes: Conjectures about the Ultimate Fate of the Universe*. New York: Basic Books (1994); tr. it. *Gli ultimi tre minuti*, Firenze, Sansoni (1994).
- "A New Science of Complexity". *New Scientist* 26 November 1988.
- Other Words*. London: Dent (1980); tr. it. *Universi possibili* (1981).
- The Physics of Time Asymmetry*. Berkeley: University of California Press (1974).
- Space and Time in the Modern Universe*. Cambridge University Press, Cambridge, 1977.
- Superforce*. New York: Simon & Schuster (1984); tr. it. *Superforza*, Milano, Mondadori (1986).
- Davies, Paul, a cura di. *The New Physics*. Cambridge: Cambridge University Press

- (1989); tr. it. *La nuova fisica*, Torino, Bollati Boringhieri (1992).
- Davies, Paul e John Gribbin. *The Matter Myth*. New York: Simon & Schuster (1992).
- Gribbin, John e Martin Rees. *Cosmic Coincidences: Dark Matter, Mankind, and Anthropic Cosmology*. New York: Bantam (1989).
- Guth, Alan. *The Inflationary Universe*. In stampa.
- Hawking, Stephen W. *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*. New York: Bantam (1988); tr. it. *Dal big bang ai buchi neri*, Milano, Rizzoli (1988).
- Pageis, Heinz R. *The Cosmic Code: Quantum Physics As the Language of Nature*. New York: Simon & Schuster (1982); tr. it. *Il codice cosmico*, Torino, Bollati Boringhieri (1984).
- *Perfect Symmetry*. New York: Simon & Schuster (1985); tr. it. *Universo simmetrico*, Torino, Bollati Boringhieri (1988).
- Rees, Martin. *Our Home Universe*. In stampa.
- Smolin, Lee. *The Life of the Cosmos: A New View of Cosmology, Particle Physics, and the Meaning of Quantum Physics*. New York: Crown (1995).
- Smoot, George e Keay Davidson. *Wrinkles in Time*. New York: William Morrow (1994); tr. it. *Le pieghe del tempo*, Milano, Mondadori (1994).
- Weinberg, Steven. *Dreams of a Final Theory*. New York: Pantheon (1992); tr. it. *Il sogno dell'unità dell'universo*, Milano, Mondadori (1993).
- *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. Updated cur. New York: Bontaur (1977); tr. it. *I primi tre minuti*, Milano, Mondadori (1977).

Parte quarta

- Farmer, J. Doyme, Tommaso Tortoli e Stephen Wolfram, cur. "Cellular automata". *Physica 10D* Amsterdam (1984).
- Farmer, J. Doyme, cur. "Evolution, games, and Learning: Models for Adaptation in Machines and Nature". *Physica 22D* Amsterdam (1986).
- GelS-Mann, Murray. *The Quark and the Jaguar*. New York: W.H. Freeman (1994).
- Holland, John H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press (1975).
- Kauffman, Stuart A. *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York; Oxford University Press (1993).
- Kauffman, Stuart A. e George Johnson. *At Home in the Universe*. New York: Oxford University Press (1995).
- Langton, Christopher G., cur. *Artificial Life*. Reading MA: Addison-Wesley (1989).
- Langton, Christopher G., Charles Taylor, J. Doyme Farmer e Steen Rasmussen, cur. *Artificial life II* Reading MA: Addison-Wesley (1992).
- Pageis, Heinz R. *Dreams of Reason; The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity*. New York: Simon & Schuster (1988); tr. it. *La cultura dei computer*, Torino, Bollati Boringhieri (1989).
- Toffoli, Tommaso e Norman Margolus. *Cellular Automata Machines*. Cambridge: mit Press (1987).

Parte quinta

Hillis, W. Daniel. *The Connection Machine*. Cambridge: mit Press (1985).

- "Intelligence as an Emergent Behavior", in *Artificial Intelligence*, Stephen Graubard, cur. Cambridge: mit Press (1988).

Ringraziamenti

Nel settembre 1991 ho pubblicato per la prima volta sulla mia newsletter "Edge" un breve saggio sul concetto di terza cultura. Successivamente una versione più lunga è stata pubblicata su "The Los Angeles Times", "The New Statesman" e sul quotidiano di Copenaghen "Information". Fra coloro che mi hanno dato suggerimenti preziosi voglio ricordare Murray Gell-Mann, Stephen Jay Gould, Daniel C. Dennett, Russel Jacoby, Stewart Brand e David Shipley.

Sono grato a Judy Herrick, che negli ultimi tre anni si è sobbarcato migliaia di pagine di accurate trascrizioni. Voglio anche ringraziare la mia redattrice Sara Lippincott per il tempo, la fatica, la diligenza e gli utili suggerimenti. A Bob Asahina, redattore della Simon & Schuster, esprimo la mia stima per l'attenta lettura del manoscritto e per la sua amicizia.

Grazie anche ai molti amici che hanno letto e commentato parti dell'opera: Wim Coleman, Pat Perrin, Clifford Stoll, Howard Rheingold, Stewart Brand e Kevin Kelly.

Infine, non posso dimenticare Richard Feynman. Nei primi anni Settanta ero stato invitato come moderatore di una tavola rotonda a un convegno di scienziati in California. Avevo appena pubblicato il mio primo libro, *By the late John Brockman*, in cui analizzavo le metafore della scienza. Aspettavo con ansia di incontrare e ascoltare il relatore principale, il leggendario fisico delle particelle Richard Feynman. Quando arrivai alla conferenza, mi accorsi che il grande fisico era malato e che io ero stato invitato a parlare al suo posto!

Fu durante quella settimana che scoprii un nuovo genere letterario. Fra i relatori, alcuni avevano abbandonato i laboratori e si dedicavano a scrivere bestseller, ma non potevano essere classificati in nessuna delle categorie editoriali allora esistenti: non erano né romanzieri, né giornalisti, né biografi. I loro erano libri di scienza vissuta.

Assistetti così al nascere di una nuova consapevolezza fra uomini che con le loro teorie si erano ripromessi di reinventare il mondo di sana pianta. Tornato a New York, la mia vita aveva ormai preso una nuova direzione, di cui questo libro è la testimonianza.

E tutto questo grazie a Richard Feynman, che non ho mai conosciuto.

Indice analitico

acceleratori

accidenti

- congelati

- cosmici

Adaptation and Natural Selection: A Critique of Some Current Evolutionary Thought (Williams)

adattamento

- due significati di

- linguaggio come

vedi anche selezione naturale adattazionismo

Adler, Mortimer,

afasia,

Agostino, santo,

aids,

Albero della conoscenza, L' (Maturana e Varela),

algoritmi,

- dal basso all'alto (ascendenti),

- dall'alto al basso (discedenti),

- di Darwin,

Allende, Salvador,

ammassi galattici

amminoacidi,

anima,

Animal Dispersion in Relation to Social Behavior (Winnie-Edwards),

Ant and the Peacock, The (Cronin),

antropologia,

Appleyard, Brian,

apprendimento,

- censura e,

- del linguaggio,

intelligenza artificiale e,

nella scuola,

architettura,

Aristofane

Aristotele,

arte,

- impressionismo francese,

Arthur, Brian,

Artificial Life (Langton),

Arturo,

Ashtekar, Abhay,

Asimov, Isaac,

astrofisica,

- delle alte energie,
astronomia,
At Home in the Universe (Johnson e Kauffman),
atomismo,
attrattori,
automi cellulari,
autopoiesi *vedi* autoproduzione
Autopoiesi e cognizione (Maturana e Varela),
autoproduzione (autopoiesi),
autorganizzazione,
- dell'universo,
- *vedi anche* ordine
Avogadro, legge o numero di,
Axelrod, Bob,

Bagley, Rik,
Ballivet, Marc,
Barbour, Julian,
Bass, Thomas A.,
batteri,
Beethoven, Ludwig van,
Bell, teorema di,
bellezza,
Benford, Gregory,
Benzer, Seymour,
big bang,
biologia,
- complessità nella,
- funzionalismo,
- i cinque regni e,
- ingegneria e,
- materia e informazione in,
- nuova,
- ruolo della fisica in,
- simbiogenesi e,
- strutturalismo in,
- *vedi anche* evoluzione; geni

Birrell, Nick,
Blau, Steven,
Bloom, Paul.
Bohr, Niels,
Boltzmann, Ludwig,
Brainstorms (Dennett),
Brand, Stewart,
Bravo brontosauo (Gould),
Brin, David,
Brooks, Rodney,
Brown, Donald,
buchi bianchi,
Buddhismo,
Bunch, Tim,

Cain, Arthur,
calcolo proposizionale,
calvinismo,

Cambridge Encyclopedia of Human Evolution, The (Jones, Martin, Pilbeam),
Campbell, John,

campi quantistici,

caos,

Caos (Gleick),

capitalismo,

Carnot, Sadi,

Carr, Bernard,

Cartesio,

- teatro cartesiano,

caso,

casualità,

cecità, da distruzione della corteccia visiva,

cellula,

cellula eucariotica,

Cemin, Saint Clair,

Cepaea nemoralis,

cervello,

- come collezione di marchingegni da bricolage,

- evoluzione del,

- linguaggio e,

- modello informatico del,

- Sé e,

- sistema nervoso e,

- *vedi anche* coscienza; mente chimica,

Childers, Peter,

chioccioline,

Chomsky, Noam,

cibernetica,

cinque regni, concetto dei,

cistroni,

cladisti,

Clarke, Arthur C,

Clarke, Bryan,

Clausius, Rudolf,

cobe (Cosmic Background Explorer),

"Cognitive Psychology",

Cohen, Jack,

Coleman, Sidney,

competizione e conflitto, in natura,

complessità,

- dell'universo,

- effettiva,

- ordine gratuito e,

- potenziale,

- sistemi complessi,

- transizione di fase e,

- *vedi anche* ordine; autorganizzazione

Complexity (Lewin),

Complexity (Waldrop),

comportamento cooperativo, in natura,

computazione,

computer, modelli di,

- a guida visiva,

- cervello come,

- intelligenza artificiale *vedi* intelligenza artificiale
- marcio nel software e,
- microtubuli e,
- nella scuola,
- paralleli,
- pensiero,
- programma dell'Orologiaio cieco,
- programmi evolutivi nei,
- quantistici,
- sistemi adattativi complessi,
- vita artificiale,

Connection Machine, The (Hillis),

Connoisseur 's Guide to the Mind, The (Schank),

Consciousness Regained (Humphrey),

conservazione dell'energia, universo inflazionario e,

Contenuto e coscienza (Dennett),

Copernico, Nicola,

corteccia visiva, distruzione della,
coscienza,

- evoluzione della,
- momento denso della,
- origine della,
- riflessiva,
- sensazioni e,

Coscienza. Che cosa è (Dennett),

Cosmic Blueprint, The (Davies),

Cosmic Coincidences: Dark Mailer, Mankind, and Anthropic Cosmology (Gribbin e Rees),

cosmogonia,

cosmologia,

- *vedi anche* universo

Cowan, George,

Cowan, Jack

Coyne, Jerry,

Creative Attitude, The: Learning, to Ask and Answer the Right Questions (Schank e Childers),

creatività,

- della vita,
- tipi di,

creazionismo,

Crescita e forma (Thompson),

Crick, Francis,

Cronin, Helena,

cronobiologia,

Crow, James F.,

Crutchfield, Jim,

cultura,

Cummings, E.E.,

Cybernetics (Wiener),

Dal big bang ai buchi neri (Hawking),

Danielli, James,

Danza misteriosa (Margulis e Sagan),

Darwin, Charles,

- algoritmo di,

- genetica e,

darwinismo,

- attacchi al,
- competizione e conflitto nel,
- medicina e,
- neodarwinismo,
- sociale,
- stretto,
- su altri pianeti, 67, 72
- teologia e,
- teoria del gene egoista e,

ultradarwinismo,
vedi anche adattamento; adattazionismo; evoluzione; geni; selezione naturale

David Copperfield (Dickens),

Davies, Paul,
su Gell-Mann,
su Smolin,

Dawkins, Richard,
- su Dennett,
- su Farmer,
- su Goodwin,
- su Jones,
- su Margulis,
- su Penrose,
- su Williams,

Degler, Cari,

Del Rey, Lester,

Dennett, Daniel C,
- su Dawkins,
- su Eldredge,
- su Gell-Mann,
- su Goodwin,
- su Gould,
- su Hillis,
- su Humphrey,
- su Kauffman,
- su Langton,
- su Margulis,
- su Minsky,
- su Penrose,
- su Pinker,
- su Schank,
- su Varela,
- su Williams,

De Sitter, Willem,
determinismo biologico,

Deutsch, David,

DeWitt, Bryce,

Dicke, Robert,

Dickens, Charles,

Dio,
- *vedi anche* religione

Dio e la nuova fisica (Davies),

Dirac, Paul A.M.,
discorso,

- *vedi anche* linguaggio
diversità genetica,
extranucleare, 120
- *vedi anche* geni
Dobzhansky, Theodosius,
Dover, Gabriel,
Dreyfus, Hubert,
droga,
drososofila,
Due culture, Le (Snow),
Dynamic Memory (Schank),

Early Life (Margulis),
economia,
ecosistema (i),
- Terra come,
virtuale, *vedi* vita artificiale
Eddington, Arthur,
educazione,
università,
Edwards contro Aguilard,
effetto farfalla,
Eigen, Manfred,
Einstein, Albert,
Elbow Room: The Varieties of Free Will Worth Wanting (Dennett),
Eldredge, Niles,
- su Dawkins,
- su Gould,
- su Humphrey,
- su Kauffman,
- su Margulis,
- su Varela,
- su Williams,
embriologia,
- caleidoscopica,
- evoluzione e,
emergenza,
Emerson, Alfred,
emozioni,
Enciclopedia Britannica,
endosimbiosi *vedi* simbiosi, simbiogenesi
Enrico VIII, re d'Inghilterra,
equilibri punteggiati,
Escherichia coli,
estetica,
estinzioni,
Eudemonic Pie, The (Bass),
evoluzione,
- caso nella,
- come danza,
- culturale,
- dei programmi informatici,
- del cervello,
- della coscienza,
- della evolvibilità,

- della vecchiaia,
- dello sviluppo,
- dell'universo,
- discontinuità nella
- e informazione contro materia,
- equilibri punteggiati nella,
- eventi a lungo termine nella,
- forme biologiche e,
- insegnamento della, nelle scuole,
- negazione della,
- progresso nella,
- prospettiva limitata nello studio della,
- ruolo della morte nella,
- simbiogenesi nella,
- vita artificiale e,
- *vedi anche* adattamento;
- darwinismo; geni; selezione naturale

"Evolution",
Ewald, Paul,
ex-attamento,

Fadiman, Clifton,

fantascienza,

Farhi, Edward,

Farmer, J. Doyne,

- su Gell-Mann,

- su Gold,

- su Kauffman,

- su Langton,

fenotipi,

- estesi,

Fenotipo esteso, Il (Darwkins),

Feynman, Richard,

filogenesi,

filosofia,

- gergo,

- scienza come,

Finkelstein, David,

Fischler, Willy,

Fisher, R.A.,

fisica,

- classica,

- delle particene,

- delle particelle, modello standard,

- filosofia e, 20

- invidia della,

- quantica, *vedi* teoria quantistica

- relatività,

- ruolo della, in biologia,

- teoria unificata della,

Five Kingdoms: An Illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth (Margulis e Schwartz),

Flores, Fernando,

Fontana, Walter,

forma biologica,

Forster, E.M.,
fossili,
Fossils (Eldredge),
Fredkin, Edward,
Freud, Sigmund,

Gaia *vedi* ipotesi Gaia
galassie,
Galileo, Galilei,
Galton, Francis,
Gambini, Rodolfo,
Gardner, Martin,
gas atmosferici,
Gell-Mann, Murray,
- su Farmer,
- su Goodwin,
- su Gould,
- su Hillis,
- su Langton,
- su Penrose,
- su Schank,
- su Smolin,

Gene egoista, Il (Dawkins),
genetica,
- delle popolazioni (neodarwinismo),
Genetics and The Origin of Species (Dobzhansky),
geni,
- come replicatori,
- egoisti,
- a causa della forma,
- e informazione contro materia,
- fenotipo esteso e,
- fisica e, 7
- virus paragonati ai,
vedi anche dna; selezione naturale

genomi,
genotipi,
gergo,
Gernsback, Hugo,
Gibbs, Josiah Willard,
Giulio Cesare,
Glass, Leon,
Gleick, James,
Gödel, Kurt, teorema di,
Goodwin, Brian,
- su Dawkins,
- su Dennett,
- su Farmer,
- su Gould,
- su Kauffman,
- su Varela,
Gould, Stephen Jay,
- su Eldredge,
- su Goodwin,
- su Jones,

- su Kauffman,
- su Pinker,
- su Williams,

gradualismo,
gravità,

- buchi neri e,
- supergravità,

gravità quantistica,

- non perturbativa,

gravitoni,
Grene, Marjorie,
Gribbin, John,
Guendelman, Eduardo,
Guth, Alan,

- su Davies,
- su Gell-Mann,
- su Penrose,
- su Rees,
- su Smolin,

Guven, Jemal, 254

Haig, David,
Haldane, J.B.S.,
Hall, John,
Hameroff, Stuart,
Hamilton, William D.,
Harrison, Harry,
Hartle, Jim,
Hawking, Stephen,
Hobb, Donald,

- sinapsi di,

Hegel, Friedrich
Heidegger, Martin,
Heinlein, Robert,
Heisenberg, Werner,
Hilbert, decimo problema di,
Hillis, W. Daniel,

- su Dawkins,
- su Dennett,
- su Eldredge,
- su Farmer,
- su Kauffman,
- su Langton,
- su Margulis,
- su Penrose,
- su Pinker,
- su Schank,
- su Varela,

History of the Mind, A (Humphrey),
hiv,
Hobbes, Thomas,
Hofstadter, Douglas R.,
Holism (Smuts),
Holland, John,
Hopfield, John,

How the Leopard Changed its Spots (Goodwin),

Hoyle, Fred,

Hubble, Edwin,

Hubel, David,

Hull, David,

Human Universals (Brown),

Hume, David,

Humphrey, Nicholas,

- su Dennett,

- su Goodwin,

- su Gould,

- su Kauffman,

- su Penrose,

- su Rees,

Hut, Piet,

identità virtuali,

Illusion of Beauty, The (Humphrey),

impressionismo francese,

imprinting genetico,

Inflationary Universe, The (Guth),

ingegneria

- al contrario,

- biologia e,

Inner Eye, The (Humphrey),

insetti sociali,

intellettuali,

- letterati,

- ruolo degli,

intelligenza,

- doppia dissociazione e,

- risoluzione dei problemi,

- *vedi anche* apprendimento; mente

intelligenza artificiale,

- linguaggio e,

Pandemonio, programma,

- programma connessionista,

- reti neurali,

- *intentional Stance, The* (Dennett),

interattori (veicoli),

Io della mente, L' (Dennett e Hofstadter),

ipotesi Gaia,

Isham, C.J.,

Jacob, Francois,

Jacoby, Russell,

Jeans, James,

Johnson, George,

Jones, Steve,

palle di,

su Dawkins,

su Goodwin,

su Gould,

su Humphrey,

su Penrose,

Kant, Immanuel,
Kauffman, Stuart,
- modelli di,
- su Dawkins,
- su Farmer,
- su Gell-Mann,
- su Gould,
- su Langton,
- su Varela,

Kelly, Kevin,
Kluver, Heinrich,

Lamarck, Jean-Baptiste,
Langton, Christopher G.,
su Farmer,
su Gell-Mann,
su Hillis,
su Varela,

Language Instinct, The (Pinker),
Language Learnability and Language Development (Pinker),
Language of the Genes: Biology, History, and the Evolutionary Future (Jones),

Lapedes, Alan,

Last Intellectuals, The (Jacoby),
Learnability and Cognition (Pinker),

Leibniz, Gottfried Wilhelm,

Levelt, Willem,

Levin, Bernard,

Levy, Steven,

Lewin, Roger,

Lewontin, Richard,

Licklider, Joseph,

*Life of the Cosmos, The: A New View of Cosmology, Particle Physics,
and the Meaning of Quantum Physics* (Smolin),

Linde, Andrej,

linguaggio,

- come adattamento,
- afasia e,
apprendimento del,
- cervello e,
- Chomsky e,
- come istinto,
- come sottoprodotto dell'evoluzione,
- creolizzazione del,
- discorso e,
- disturbi del,
- doppia dissociazione e,
- gergo scientifico e,
- interesse nel,
- memoria e,
- segni e,
- universalità del,
- visioni errate del,

Lovelock, James E.,

Luck, David,

lumache *vedi* chioccioline
Luterò, Martin,

malattie,
autoimmuni,
dinamica,

Margulis, Lynn,

- su Dawkins,
- su Eldredge,
- su Goodwin,
- su Varela,
- su Williams,

Martin, Robert,

Marx, Karl,

matematica,

materia oscura,

Mathematical Biophysics (Rashevsky),

Matijasevič, Jurij,

Matter Myth, The (Davis e Gribbin),

Maturana, Humberto D,

Maynard Smith, John,

Mayr, Ernst,

McCarthy, John.

McCulloch, Warren,

McGill, Jim,

Medawar, Peter B.,

medicina,

- darwiniana,
- *vedi anche* malattie

meme,

- culturale,

memoria,

memoria dinamica,

- linguaggio e,

Mendel, Gregor Johann

mente,

- razionalista,
- reti neurali, modello della,
- script nella,

vedi anche apprendimento; cervello; coscienza; linguaggio; memoria

Mente nuova dell'imperatore, La (Penrose),

Mereschkovsky, Konstantin S.,

Microcosmo (Margulis e Sagan),

microtubuli,

Miller, George,

Miller, Stanley,

Miner's Canary, The (Eldredge),

Minsky, Marvin

- su Dawkins,
- su Dennett,
- su Gell-Mann,
- su Gould,
- su Hillis,
- su Margulis,
- su Penrose,

su Schank,
Mismeasure of Man, The (Gould),
misura quantistica,
mitocondri,
molecole,
- destrogire,
- sintesi delle,
Monet, Claude,
Monod, Jacques,
Moravec, Hans,
morfoinesi,
- idrodinamica paragonata alla,
morfologia,
morfospazio,
Morgan, Daniel,
Morgan, Thomas K,
Morowitz, Harold,
morte,
moscerini della frutta,
Moilyn Donna,
Muller, Hermann J.,
mutazione (variazione casuale),
mutoni,

Natural Language and Natural Selection (Pinker e Bloom),
Natural Selection (Williams),
"Nature",
Nesse, Randolph,
neuroni,
- microtubuli e,
Newell, Allen,
Newton, Isaac,
Nielsen, Holgar,
Nietzsche, Friedrich Wilhelm,

Oettinger, Anthony,
olismo,
omega,
Ontogeny and Phylogeny (Gould),
ontologia,
ordine,
- (gratuito) spontaneo,
- *vedi anche* autorganizzazione
Origine delle specie, L' (Darwin),
Origin of Eukaryotic Cells, The (Margulis),
Origin of Mitosing Eukaryotic Cells, The (Margulis),
Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution (Kauffman),
Origins of Sex (Margulis e Sagan),
Orologiaio cieco, L' (Dawkins),
Orologiaio cieco, programma di computer,
Our Home Universe (Rees),
Out of Control (Kelly),

Packard, Norman,
Pagels, Heinz,

paleontologia, 26,
Pandemonio,
Papert, Seymour,
paradigmi, nella scienza,
Paramecium aurelia,
parentela,
- selezione di,
Partridge, Linda,
Pasteur, Louis,
Penrose, Roger,
- su Dennett,
- su Smolin,
Penzias, Arno,
perceptrons (percettroni),
Perceptrons (Minsky e Papert),
Physics of Time Asimmetry, The (Davies),
Piaget, Jean,
Picasso, Pablo,
Pilbeam, David,
Pinker, Steven,
- su Dawkins,
- su Dennett,
- su Gould,
- su Minsky,
- su Penrose,
- su Schank,
- su Williams,
Pitts, Walter,
Platone,
plectics,
Poggio, Tommaso,
Polchinski, Joseph,
Polyachov, Alexander,
pompe di intuizione,
Prediction Company,
Prigogine, Ilya,
principio antropico
- forme debole e forte,
Principles of Biological Autonomy (Varela),
procarioti (cellule procariotiche),
proteine,
- della motilità,
psicocinesi,
psicologia,
punto cieco,
punto di vista relazionale,

Quantum Concepts in Space and Time (Isham e Penrose),
Quantum Fields in Curved Space (Birrell e Davies),
Quantum Gravity 2: A Second Oxford Symposium (Isham, Penrose e Sciama,
a cura di)
quark,
Quark and the Jaguar, The: Adventures in the Simplex and the Complex (Gell-Mann),

radiazione

- accelerazione,
- cosmica di fondo (radiazione fossile),

Raffaello,
ragionamento,

- basato su casi,

Rashevsky, Nicholas,
Rasmussen, Steen,
Raup, Dave,
Ray, Tom,
realtà,
reconi,
Rees, Martin,

- su Davies,
- su Gell-Mann,
- su Guth,
- su Smolin,

Regis, Ed,
Reinventing Darwin (Eldredge),
relatività,
religione,
darwinismo e,
principio antropico e,
vedi anche Dio
replicatoli,
metabolismo e,
reti neurali,
riduzionismo,
gerarchico,
Rindler, W.,

- riproduzione
- modello dell'allocazione ottimale delle risorse e,
- sessuata,

ritmi biologici,
River out of Eden (Dawkins),
rna,
Roberts, Larry,
robot,
Robson, Simon,
Rosch, Eleanor,
Rosenblatt, Frank,
rottura spontanea di simmetria,
Rovelli, Carlo,
Royal Society,

- motto della,
- simposio del 1978,

Russell, Bertrand,
Ryle, Gilbert,

Sagan, Dorion,
Salthe, Stan,
San Marco,

- pennacchi di,

Santa Fé Institute,
Schank, Roger,

- su Dennett,

- su Hillis,
- su Minsky,
- su Penrose,

Schopf, Tom,
Schwartz, John,
Schwartz, Karlene V.,
Sciama, Dennis W.,
scienza,

- cattive applicazioni della,
- come cultura pubblica,
- come filosofia,
- ignoranza della,
- postmoderna,
- qualitativa, contro scienza
- quantitativa,
- rilevanza della,
- umanesimo contro,

scienziati, 7-9,17

- come divulgatori,
- Gell-Mann sugli,
- libri degli,
- reazione contro gli,
- terza cultura e,

scimmie

- ieché,
- preferenze estetiche delle,

Sé,

- assenza del Sé, 193
- *vedi anche* coscienza

Searle, John
Sé emergenti (identità virtuali),
selezione *vedi* selezione naturale,
selezione di gruppo,
selezione naturale,

- come spiegazione per tutti gli aspetti,
- degli universi,
- e informazione contro materia,
- embriologia e,
- e ordine gratuito,
- gene,
- gerarchie (livelli) nella,
- gruppo,
- intelligenza e,
- ipotesi Gaia e,
- malattie e,
- mutazioni casuali nella,
- parenti e,
- potenza e importanza della,
- principio dei pennacchi e,
- scetticismo dei paleontologi,
- tratto di gruppo,
- vedi anche* adattamento;
- darwinismo; evoluzione; geni

Selfridge, Oliver,
semplicità,

sensazioni,
 figure ancestrali,
Sex and Evolution (Williams),
Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness (Penrose),
Shakespeare, William,
Shannon, Claude,
Sharp, Dave,
Shaw, J.C.,
Shaw, Robert,
Sheppard, Phillip,
Sidorowich, Sid,
Simberloff, Dan,
simbiosi, simbiogenesi,
simmetria,
Simon, Herbert,
Simpson, George Gaylord,
sintesi,
sistema immunitario
 - malattie autoimmuni e,
sistema nervoso,
sistemi adattativi complessi *vedi* complessità; computer,
sistemi critici,
sistemi termodinamici,
Skinner, B.F.,
Slagle, Jim,
mith, Peter Godfrey,
Smolin, Lee,
 - su Gell-Mann,
 - su Guth,
 - su Margutis,
 - su Penrose,
 - su Rees,
Smoot, George,
Smuts, Jan,
snarc (Stochastic Neural Analog Reinforcement Calculator),
Snow, Charles P.,
Sober, Elliot,
Società della mente, La (Minsky),
società della mente, teoria,
sociobiologia,
Sociobiologia (Wilson),
Sorriso del fenicottero. Il (Gould),
Southern, Ed,
Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm, The:
 A Critique of the Adaptationist Program (Gould e Lewontin), spazio,
 - reticolo di spin e,
 - struttura ad anelli dello,
 - teoria dei "twistor" e,
 - tunnel (*whormholes*) nello,
specie,
come individui,
selezione delle,
Spencer, Diana,
Spencer, Herbert,
Sperber, Dan,

Spinors and Space-time (Penrose e Rindler),
Stanley, Steven,
stato solido, teoria,
Stebbins, Ledyard,
Steps Toward Artificial intelligence (Minsky),
Steps Towards Life (Eigen),
Stewart, Ian,
stringhe (superstringhe), teoria delle,
strutturalismo in biologia,
Strutture della sintassi, Le (Chomsky),
Strutture del tempo (Eldredge),
Sturtevant, A.H.,
Superforza (Davies),
supergravità,
Symbiosis in Cell Evolution (Margulis),
Synopticon, The (Adler),

tassellatura,
Techniques of Differential Topology in Relativity (Penrose),
Tell Me a Story (Schank),
tempo,
- freccia del,
- reticoli di spin e
- teoria dei "twistor" e,
- viaggio nel,

Tempo and Mode in Evolution (Simpson),
teoria quantistica,
teoria unificata,
terza cultura,
Thinking Machines Inc.,
Thom, René,
Thompson, D'Arcy,
Thompson, Evan,
Thorac, Kip,
Tinbergen, Niko,
Toffoli, Tomas,
Tommaso d'Aquino,
topologia,
transizione di fase,
Trivers, Robert,
tubulina,
tunnel (*wormholes*),
viaggio temporale,
Turing, Alan
"twistor", teoria dei,

uccelli, 198
ali di,
Ultimi tre minuti, Gli (Davies),
Understanding the Present (Appleyard),
Universi possibili (Davies),
università,
universo,
- autorganizzazione dell',
- buchi bianchi nell',

- buchi neri e,
- collasso dell',
- complessità dell'
- creazione dell',
- definizioni di,
- densità di materia nell',
- espansione dell',
- evoluzione dell',
- inflazionario,
- materia oscura e,
- metauniverso (insieme di universi),
- origine dell',
- principio antropico e,
- quantistico,
- radiazione cosmica di fondo,
- selezione naturale e,
- semplicità e uniformità dell',
- singolarità iniziale dell',
- teoria del big bang e,
- teoria dello stato solido dell',
- tunnel (*wormholes*) nell',

Unruh, Bill,
Urey, Harold,

vaccini,

- aids,

Varela Francisco,

- su Dennett,
- su Farmer,
- su Goodwin,
- su Gould,
- su Hillis,
- su Humphrey,
- su Kauffman,
- su Langton,
- su Margulis,
- su Minsky,
- su Penrose,

variazione casuale (mutazione),

veicoli (interattori),

Via di mezzo della conoscenza, La (Rosch, Thompson, Varela),

Vinge, Vernon,

virus,

Visione in una scimmia priva delta corteccia striata (Weiskrantz e Humphrey),

vita

- artificiale,
- origine della,

vitalismo,

Vita meravigliosa, La (Gould),

Von Neumann, John,

Vrba, Elisabeth,

vuoto, falso vuoto,

Waddington, C.H.,

Wallace Alfred Russel,

Wallin, Ivan Emanuel,
Watson, James,
Weinberg, Steven,
Weiskrantz, Larry,
Weismann, August,
Welles, Sam,
Wendroff, Burton,
Wheeler, John Archibald,
Whitehead, Alfred North,
Why We Get Sick (Nesse e Williams),
Wiener, Norbert,
Wiesel, Torsten,
Williams, George C,
 su Dawkins,
 su Eldredge,
 su Gould,
 su Margulis,
 su Pinker,
Wilson, David Sloan,
Wilson, Edward O.,
Wilson, Robert,
Winfrey, Arthur,
Winograd, Terry,
Wolfram, Stephen,
Wright, Sewall,
Wynne-Edwards, V.C.,
