

# LA NASCITA DELLA MENTE

## ORIGINI, CRESCITA E APPRENDIMENTO

*Quattro anni dopo il sequenziamento del genoma umano, e ad oltre 50 anni dalla scoperta della struttura molecolare del DNA, è tempo d'inventario. I geni possono raccontarci tutto sulla nascita della mente umana? Nell'era moderna nessuno metterebbe in dubbio l'importanza dei geni per l'organismo, ma i geni sono davvero importanti per la mente?*

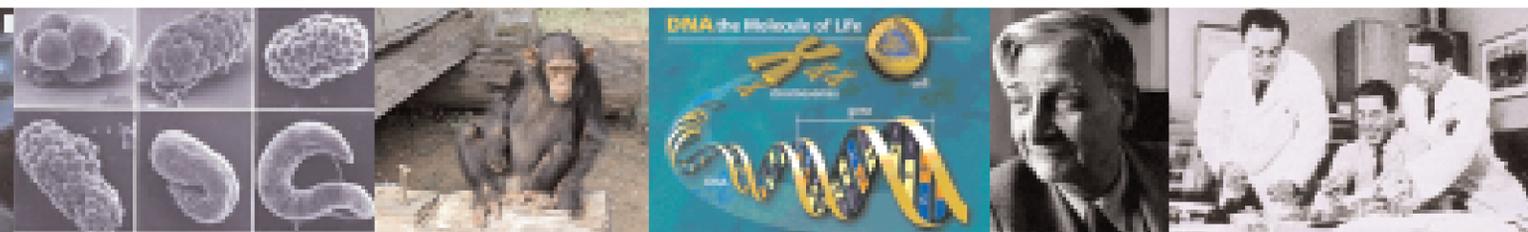
DI GARY MARCUS

*Illustrazione basata su una foto realizzata con un microscopio elettronico a scansione, che mostra numerosi neuroni multipolari che crescono in un tessuto di coltura.*

Un impressionantemente vasto gruppo di studiosi sembra voler rispondere "No". Louis Menand, critico del *New Yorker*, per esempio, ha scritto recentemente che "ogni aspetto della vita ha fondamenta biologiche in senso stretto, vale a dire che se non fosse biologicamente possibile non esisterebbe. Dopodiché, ciascuno è libero di comportarsi come vuole" – suggerendo che la biologia non ha nulla da insegnarci sulla mente, sul comportamento o sulla condizione umana. Paul Ehrlich, antropologo di Stanford, ha sostenuto che il ridotto numero di geni presenti nel ge-

noma permetterebbe loro di esercitare solo una vaga influenza. Il nostro genoma contiene soltanto circa 25.000 geni, mentre il cervello – l'organo del pensiero – presenta miliardi di cellule nervose (neuroni). "Considerato il rapporto tra le due grandezze – ha suggerito Ehrlich – sarebbe davvero un bel trucco se i geni riuscissero a controllare qualcosa di ben più consistente dei semplici aspetti generici del comportamento umano". Un terzo gruppo di studiosi ha sostenuto che i geni non possono essere così dannatamente importanti, perché il cervello in via di sviluppo è notevolmente

flessibile. Per esempio, anziché avere già scolpito il proprio destino nell'istante in cui nascono, le cellule nervose di nuova formazione – i neuroni – modificano talvolta la loro funzione in base al loro contesto: una cellula che normalmente (nelle corrette circostanze) ci aiuterebbe a percepire il senso del tatto, può essere ad esempio reclutata dal sistema visivo e accettare i segnali provenienti dall'occhio. Considerate le poche armi a loro disposizione, alcuni studiosi ritengono che i geni vengano messi in disparte, come spettatori di scarso rilievo. Le teorie che minimizzano l'im-



*La Sindrome di Down è una anomalia cromosomica che produce handicap mentale e un aspetto fisico caratteristico. Il difetto genetico riguarda il cromosoma numero 21, del quale sono presenti tre elementi invece dei normali due. Ragazzi affetti da Sindrome di Down hanno normalmente un QI compreso fra 30 ed 80. Una particolare cura volta ad attuare una educazione speciale può aiutare le persone affette da Sindrome di Down a vivere in modo pieno e felice.*

portanza dei geni sembrano confortanti. **Meno concediamo ai nostri geni, più sentiamo di possedere il libero arbitrio – ma alla natura non importa nulla di ciò che troviamo confortante.** Sebbene i nostri neuroni siano notevolmente superiori rispetto ai nostri geni, i nostri geni hanno di fatto un'enorme influenza sullo sviluppo delle nostre personalità, dei nostri tratti somatici, delle nostre capacità e dei nostri limiti. Ma forse lo sapevate già. Lo scopo di questo articolo non è quello di persuadervi che i geni contano qualcosa, ma di spiegarvi quanto contano, e dimostrarvi che il loro contributo all'equazione dello sviluppo umano può essere ben diverso da ciò che pensate.

## NON AVERNE PAURA

*In che misura la nostra personalità sia frutto dell'assortimento di geni di cui siamo stati dotati è un quesito che appassiona da tempo lo studioso ma anche l'uomo comune.*

La nostra paura dei geni deriva, credo, da un falso timore di impotenza. John Gray, filosofo britannico, si è per esempio lamentato affermando che noi non siamo altro che "derivate nella corrente dei nostri geni". Un paio di decenni fa, un gruppo di universitari di Harvard arrivò persino ad inzuppare il sociobiologo E. O. Wilson con un secchio d'acqua – per aver

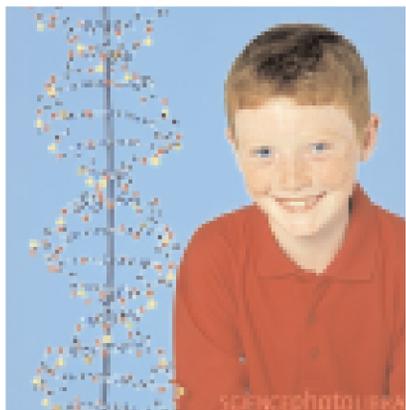


*I gemelli geneticamente identici (monozigoti) nascono quando un singolo ovulo fertilizzato si divide in due cellule, dando luogo alla formazione di due bambini.*

semplicemente ipotizzato che la natura umana potesse essere plasmata in maniera importante dal contenuto dei nostri geni. Le cattive notizie sono che i geni influenzano *realmente* le nostre personalità, e non possiamo farci nulla. Il nostro cervello, come il resto del nostro organismo, non esisterebbe nemmeno se non fosse per i nostri geni. Il motivo, in poche parole, del perché i gemelli omozigoti si assomigliano l'un l'altro, persino quando vengono allevati in case separate, è che condividono gli stessi geni, e per geni condivisi si intende che il loro cervello è strutturato in maniera simile. **Le prove della profonda influenza dei geni sulla nostra vita mentale, di fatto, sono tutte attorno a noi,** non solo nella misteriosa rassomiglianza delle personalità dei gemelli omozigoti, ma in patologie quali la Sindrome di Down, nella quale la funzione cerebrale è fortemente alterata dalla mutazione genetica, e negli esperimenti di laboratorio in cui gli animali possono essere geneticamente manipolati trasformandoli in esseri ansiosi, sociali o ipersessuali. Per quanto possa sembrare doloroso ad alcuni, attribuire un poco delle nostre personalità a un ammasso di molecole microscopiche, con il senno di poi non dovremmo in realtà rimanerne sorpresi. Le nostre vite mentali hanno chiaramente la loro origine nella materia fisica dei nostri cervelli. La quotidiana esperienza del mondo moderno ci insegna che la funzione cerebrale può essere alterata o modificata. Sappiamo che colpi apoplettici e ferite da arma da fuoco possono interferire

con il linguaggio, distruggendo parti del nostro cervello, e che Prozac e Ritalin possono influenzare l'umore alterando il flusso dei neurotrasmettitori. Le componenti fondamentali del cervello – i neuroni e le sinapsi che li connettono – possono essere considerati come sistemi fisici, con proprietà chimiche ed elettriche legate alla loro composizione. Sebbene gli antichi potessero aver compreso la mente in termini mistici, distinta dal mondo fisico, è oggi fuori discussione che i nostri pensieri, le nostre credenze e i nostri desideri siano mediati da molecole.

**Sostenere l'importanza dei geni per la mente è affermare semplicemente che le molecole del nostro cervello sono cresciute da un uovo fertilizzato come qualsiasi altro organo corporeo.** Contrariamente alla teoria del XVII secolo nota come pre-formazionismo, gli organi del corpo non si trovano preformati in miniatura nell'uovo fertilizzato; al momento del concepimento non è presente alcun minuscolo cuore né alcun minuscolo cervello. L'uovo fertilizzato contiene invece informazioni: i tre miliardi di nucleotidi del DNA che costituiscono il genoma umano. Queste in-



Un ragazzo di nove anni ritratto vicino ad un modello di DNA (acido desossiribonucleico). Questa sostanza chimica è alla base della trasmissione genetica dei caratteri ereditari.

formazioni, copiate nel nucleo di ogni cellula di nuova formazione, guidano il graduale ma potente processo della successiva approssimazione che plasma ciascuno degli organi corporei. Guardate crescere un embrione, e vi sembrerà di osservare lo stesso processo di crescita del cuore o del cervello: strati di cellule, che si dividono e specializzano, formando lamine semplici che quindi si incurvano e si arricciano a formare tubi, germogliando protuberanze che a loro volta germogliano protuberanze, assomigliando sempre di più, ogni giorno di gestazione che passa, alle forme in miniatura di quegli organi che diventeranno.

In retrospettiva, questo non sarebbe affatto sorprendente. Sebbene i neuroni – le principali cellule del cervello – appaiano molto diverse dalle altre cellule, con i loro lunghi assoni affusolati che possono raggiungere la lunghezza del corpo e i loro dendriti ramificati che raccolgono messaggi da altri neuroni, in fondo sono semplicemente delle specializzazioni di un tema cellulare universale. Come gran parte delle altre cellule, i neuroni contengono un nucleo riempito di DNA, impianti di alimentazione mitocondriali, membrane per tenere lontani gli invasori, e così via. Persino le specializzazioni distintive di un neurone sono in realtà soltanto variazioni di temi biologici comuni; gli assoni, per esempio, dipendono essenzialmente dalle stesse proteine citoscheletriche di molte altre cellule. Tutto ciò significa che il ciclo vitale di un neurone è molto simile al ciclo vitale di qualsiasi altra cellula.

Alla nascita, prima che il neonato abbia avuto la possibilità di inalare profondamente il mondo, il cervello di un embrione possiede virtualmente l'intera struttura es-

senziale di cui poi potrà disporre: virtualmente tutti i suoi neuroni (le cellule basilari di cui è composto il cervello) e tutte le caratteristiche fondamentali – gli emisferi cerebrali asimmetrici, le pieghe e le circonvoluzioni, note come solchi e circonvoluzioni cerebrali. L'educazione svolge realmente un ruolo importante nella nostra vita mentale – e tra poco parleremo in dettaglio del come e del perché – ma, anche senza educazione, la natura è in grado di creare una bozza grossolana di un cervello rimarchevolmente completo.

## QUALE COMPITO HANNO REALMENTE I GENI

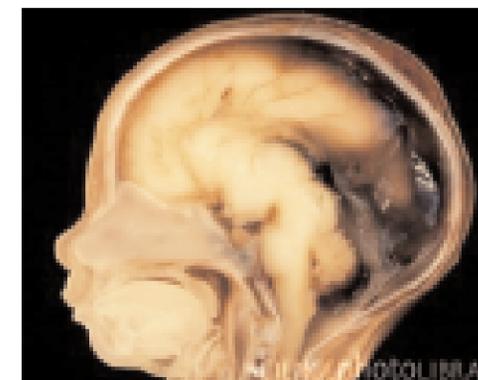
*Spesso si commette l'errore di attribuire al gene un'importanza prioritaria, al di là del contesto in cui esso "agisce". Si osserva in realtà una complessità di interazioni gene-ambiente.*

Non dovremmo confondere la potenza con l'inevitabilità. Anche se i geni sono sufficientemente potenti da guidare la struttura di base dei nostri cuori, dei nostri fegati e dei nostri cervelli, non dovremmo in alcun modo pensare a noi stessi come pedine. Per quanto siano potenti i nostri geni, non sono categoricamente dei dittatori ciechi. Gran parte delle persone immaginano il genoma come una copia cianografica predestinata, una immagine che delinea la mappa del nostro destino (o almeno del destino del nostro cervello) in ricchi e vividi dettagli. Ma anche se la metafora di un genoma è così diffusa da rappresentare un

cliché del giornalismo scientifico, la metafora della copia cianografica è profondamente fuorviante. Infatti, il genoma non contiene immagini e non possiede la forza della predestinazione. Contiene invece istruzioni, istruzioni di incantevole bellezza e (come vedremo tra un attimo) di enorme flessibilità.

Costretti ad allontanare la metafora dei geni come copie cianografiche, gran parte delle persone tornerebbe alla nozione – vera, ma essenzialmente incompleta – che il reale compito dei geni è quello di fornire gli stampi per la costruzione delle proteine. Il gene del collagene, per esempio, fornisce uno stampo per la costruzione della sequenza amminoacidica che comprende la proteina collagene, proprio come il gene dell'insulina fornisce uno stampo per la costruzione della sequenza amminoacidica che comprende la proteina insulina.

Ma questa è solo metà della storia; se il genoma si riducesse a un elenco principale di ingredienti chimici avremmo ancora un mistero tra le mani. Corpi e cervelli non sono soltanto zuppe casuali di



Sezione della testa di un feto umano di 3 mesi. Lo sviluppo del cervello ha raggiunto lo stadio nel quale il feto è in grado di sentire i suoni prodotti dalla madre. In basso a destra si può vedere il cervelletto (responsabile del controllo delle funzioni motorie) e il ponte di Varoli, al centro, da cui si dipartono i nervi cranici V, VI, VII e VIII.

proteine – le proteine, che compongono metà del peso secco del nostro corpo, sono disposte in maniera sistematica; ciò che rende il cuore diverso dal fegato non è solo il tipo di proteine di cui questi organi dispongono, ma il modo in cui queste proteine vengono disposte. **Lo stesso vale per le differenze tra un cervello umano e un cervello di scimmia: il nostro cervello e il loro sono entrambi costituiti da proteine, lipidi ed acqua, per lo più come qualsiasi altro organo, ma ciò che realmente conta è il modo in cui queste proteine sono assemblate.** E si scopre che i geni svolgono un ruolo anche in questo, non solo nel disporre una data serie di proteine in un organo, ma nel come e dove queste proteine vengono formate.

Si è infatti scoperto che, in realtà, ciascun gene possiede due componenti, lo stampo proteico ben noto e una meno nota "regione di regolazione" che controlla quando e dove queste proteine vengono formate. I programmi dei computer si basano su linee di codice che utilizzano istruzioni del tipo "SE (IF) una cosa è vera ALLORA (THEN) compie qualche altra cosa"; nella loro natura bipartita, i geni fanno qualcosa di diverso "SE una cellula è ubicata nel pancreas, ALLORA (e solo allora) produce insulina".

Se parliamo del cervello o di altre parti del corpo, anche le modificazioni di un singolo gene – che portano a un nuovo SE o a un nuovo ALLORA – possono avere grandi conseguenze. Proprio come una piccola alterazione del gene dell'emoglobina è in grado di indurre una predisposizione all'anemia drepanocitica, una singola alterazione dei geni coinvolti nel cervello

può causare gravi conseguenze, come è possibile osservare in laboratorio e nella variazione genetica naturale. In laboratorio, per esempio, un team di ricercatori della Emory University ha recentemente trasferito la regione di regolazione "SE" del gene del recettore della vasopressina di topi campagnoli socievoli nel genoma di una specie meno socievole, il topo ordinario – creando in tal modo topi mutanti più socievoli (anche se un po' meno di quelli campagnoli) rispetto alla norma. Con altre piccole modificazioni genetiche, i ricercatori hanno creato ceppi di topi ansiosi, timorosi, topi che progressivamente incrementano il consumo di alcol sotto stress, topi che mancano dell'istinto educativo, e persino topi che si puliscono costantemente, tirando e strappando il proprio pelo fino a depilarsi. In natura, le mutazioni dei SE e degli ALLORA che costituiscono il genoma umano inducono patologie come il ritardo mentale.

Ma ciò che importa non è solo che le alterazioni al genoma abbiano una considerevole conseguenza. Comprendere la natura bipartita del gene – il SE accompagnato da un ALLORA – altera anche profondamente la nostra comprensione dell'interazione esistente tra natura ed educazione. Perché è qui – a livello dei singoli geni – che entra innanzitutto in gioco l'ambiente. Sebbene l'ALLORA di un dato gene sia largamente codificato, stabilito al momento del concepimento, il SE è una condotta dinamica, che permette ai geni di esercitare diverse conseguenze in base ai microambienti delle cellule che li contengono.

Questa logica di base è stata elaborata nei primi anni '60 da due biologi francesi, François Jacob e Jacques Monod, in una serie di

## OLTRE IL CONFLITTO NATURA VS EDUCAZIONE

Gli sforzi compiuti per affrontare la questione natura-educazione vacillano tipicamente a causa della falsa ipotesi secondo cui natura ed educazione sono incompatibili. Gli "anti-nativisti" – i critici della visione secondo cui potremmo essere nati con una struttura mentale significativa prima di maturare una esperienza – tentano spesso di sminuire l'importanza dei geni basandosi su quella che ho precedentemente chiamato "la tesi della plasticità": essi sottolineano la resilienza del cervello in reazione ai danni e la sua capacità di modificarsi in risposta all'esperienza. I nativisti sembrano talvolta pensare che la loro posizione si basi soltanto sullo sminuire o sul dimostrare i limiti della plasticità. In realtà, plasticità e innatezza sono quasi logicamente distinti. L'innatezza è all'incirca la misura in cui il cervello è pre-cablato, la plasticità è all'incirca la misura in cui può essere ricablato. Alcuni organismi possono essere dotati in un aspetto ma non nell'altro: gli scimpanzé, per esempio, possono avere un cablaggio innato intricato ma, in confronto agli esseri umani, un numero relativamente scarso di meccanismi per ricablare il proprio cervello. Altri organismi possono essere carenti in entrambi gli aspetti: i vermi *Caenorhabditis elegans* hanno una struttura iniziale limitata e un numero relativamente scarso di tecniche per ricablare il proprio sistema nervoso in base all'esperienza. Mentre alcuni organismi, come l'uomo, sono ben dotati in entrambi gli aspetti, con un'architettura iniziale enormemente intricata e mezzi straordinariamente potenti e flessibili per ricablarla in base all'esperienza. Il punto fondamentale è che qualsiasi tecnica di ricablaggio del cervello ha le sue origini, in un modo o nell'altro, nel genoma. La memoria, per esempio, è un modo di ricablare le connessioni tra i neuroni (o alterare qualcosa all'interno dei neuroni) che dipende chiaramente dalla funzione dei geni: interferite con il processo della sintesi proteica dei geni e interferirete con la memoria. Organismi strettamente correlati (per esempio la *Aplysia*, la lumaca di mare che è stata l'animale sperimentale fondamentale per il premio Nobel Eric Kandel, e la sua cugina alquanto ottusa, *Dolabrifera dolabrifera*) possono differire significativamente in termini di apprendimento, apparentemente in funzione di piccole differenze nel genoma. Negli organismi semplici, scientificamente maneggiabili, gli scienziati hanno cominciato a mappare una gamma di diverse capacità di apprendimento e le serie di geni che li sottintendono. I vermi *Caenorhabditis elegans*, per esempio, hanno almeno una dozzina e mezza di geni correlati all'apprendimento, con un ruolo specifico per un particolare tipo di apprendimento. Ciò che un microrganismo apprende dipende in non piccola parte dal tipo di geni correlati all'apprendimento con cui è nato. Riusciremo a superare la controversia natura-educazione non oscurando (né negando) la distinzione tra i geni e l'ambiente, ma comprendendola meglio, e questo significa, tra l'altro, indagare la funzione precisa dei nostri geni e come rendono possibile il ricablaggio e l'apprendimento.



*Lo sviluppo che condurrà fra molti anni il bambino a saper usare davvero la tastiera del computer dipenderà certamente dalla sua educazione, ma sarà reso possibile dalle capacità innate di apprendere, esclusive della nostra specie. Una scimmia non potrebbe mai imparare a scrivere una lettera o un romanzo.*

studi approfonditi sulla dieta di un semplice batterio – si applica tanto agli uomini quanto ai batteri, e vale tanto più per il cervello quanto per qualsiasi altra parte dell'organismo. Monod e Jacob volevano comprendere come i batteri *Escherichia coli* fossero in grado di passare quasi istantaneamente da una dieta di glucosio (la favorita) a una dieta di lattosio (un alimento di riserva in caso di emergenza). Ciò che scoprirono fu che questo brusco cambiamento della

dieta era possibile attraverso un processo che attivava e disattivava certi geni. Per metabolizzare il lattosio, il batterio aveva bisogno di costruire una determinata serie di enzimi a base proteica che per semplicità indicheremo collettivamente come lattasi, il prodotto di un gruppo di geni della lattasi. Ogni *Escherichia coli* disponeva di questi geni in uno stato di attesa, ma venivano solamente espressi – cioè attivati – quando un pezzo di lattosio riusciva a legarsi (attaccar-

si) a certi punti del DNA che giacciono in loro prossimità, e questo a sua volta poteva avvenire solo se non c'era disponibilità di glucosio: SE-ALLORA (IF-THEN). Qual è dunque il risultato? Anziché essere delle entità statiche che decidono in anticipo il destino di ciascuna cellula, i geni – grazie alla sequenza di regolazione – sono dinamici e possono guidare le cellule in diversi modi, in tempi diversi, in base all'equilibrio delle molecole presenti nel

loro ambiente: un genoma opera in base all'ambiente che lo circonda. E persino una singola traccia ambientale può riplasmare radicalmente il corso dello sviluppo. Nella farfalla africana *Bicyclus anynana*, per esempio, la presenza di elevate temperature durante lo sviluppo (associate alla stagione delle piogge nel suo clima tropicale nativo) porta alla formazione di farfalle dai colori più brillanti; la presenza di basse temperature (associata a un autunno secco) porta alla formazione di farfalle dal colore marrone opaco. La *Bicyclus* non è un camaleonte, non può cambiare colore da un giorno (o un'ora) all'altro. La sua colorazione si determina invece durante il processo di sviluppo. Un semplice SE-ALLORA (o forse diversi) guida la farfalla ai diversi esiti sulla base di una variabile prontamente misurabile: la temperatura ambientale. Se allevate una *Bicyclus* in un laboratorio caldo otterrete la ver-



*Funghi allucinogeni (Psilocybe cubensis). Le sostanze capaci di alterare il funzionamento del cervello sono una delle prove più evidenti della base organica della mente.*



*Gli scopritori della struttura del DNA. James Watson (1928) a sinistra e Francis Crick (1916) nel 1953, con il loro modello di parte di una molecola di DNA. Crick e Wilkins, che scoprirono la struttura a doppia elica del DNA, ricevettero il Nobel per la Fisiologia nel 1962 insieme a Wilkins.*

sione colorata, se la allevate in un laboratorio freddo otterrete la versione marrone: un genoma, due diversi fenotipi.

## LA CHIAVE DELLA COMPLESSITÀ

*Scendere dal trono della nostra presunta superiorità rispetto al resto del vivente potrebbe aiutarci a comprendere più a fondo cosa ci distingue.*

La lezione appresa negli ultimi cinque anni di ricerca dalla neuroscienza evolutiva – un settore che combina genetica e neuroscienza – è che i SE-ALLORA sono cruciali e onnipresenti nello sviluppo cerebrale quanto lo sono altrove. Prendiamo uno degli esempi recentemente elaborati: ratti, topi e altri roditori dedicano una particolare regione della corteccia cerebrale, nota come *barrel fields* (corteccia striata), al proble-

ma di analizzare la stimolazione delle loro vibrisse. L'esatto posizionamento di questa *barrel fields* (corteccia striata) sembra essere guidato da un gene o da una serie di geni la cui regione SE risponde alla quantità di una particolare molecola: il Fattore di Crescita dei Fibroblasti 8 (FGF8). Alterando la distribuzione di quella molecola, i ricercatori sono stati capaci di alterare lo sviluppo della corteccia striata: incrementando la concentrazione del FGF8 si sono ottenuti topi con *barrel fields* in posizione insolitamente avanzata, mentre riducendo la concentrazione si sono ottenuti topi con *barrel fields* in posizione insolitamente arretrata. In pratica, la quantità del FGF8 funge da faro, guidando le cellule in crescita al loro destino, azionando i SE regolatori dei numerosi geni che sono presumibilmente coinvolti nella formazione della corteccia striata.

Altri SE-ALLORA contribuiscono alla funzionalità del cervello durante la vita. Per esempio, supervisionando il controllo dei neurotrasmettitori e partecipando (come sarà successivamente illustrato) al processo che permette di stabilire tracce di memoria. Dato che ciascun gene possiede un SE, ogni aspetto dello sviluppo cerebrale è di principio collegato a un qualche aspetto ambientale; le sostanze chimiche come l'alcol, se ingerite durante la gravidanza, esercitano effetti così devastanti perché ingannano i SE che regolano i geni preposti alla guida delle cellule, stimolandole a dividersi troppo o troppo poco, a spostarsi troppo lontano o troppo poco, e così via. **Il cervello è il prodotto delle azioni delle sue cellule componenti, e queste azioni sono il prodotto dei geni in esse contenuti**, ogni cellula essendo guidata da 25.000 SE accoppiati a 25.000 ALLORA – tante

Il cervello, come altri organi, è composto di cellule, e il suo funzionamento è il prodotto dei cicli vitali di queste cellule. Un neurone nasce, intraprende una carriera (diciamo un neurone motorio o un neurone sensoriale), trasloca forse in una nuova casa, e alla fine può morire. Le scelte di vita delle cellule – siano neuroni o cellule epatiche – costituiscono la struttura del cervello e dell'organismo. Tutte le successive approssimazioni che formulano un cervello o un cuore sono guidate dall'attività delle singole cellule, che a loro volta sono guidate in non piccola parte dai geni contenuti all'interno dei loro nuclei.

Negli ultimi due anni, i neuroscienziati evolutivi hanno iniziato a comprendere questo processo in dettaglio, fino al punto di poterlo direttamente alterare premendo gli interruttori genetici corretti. I ricercatori sono stati in grado di allevare topi con cervelli anormalmente grandi inducendo una divisione cellulare extra, differenziando con l'inganno neuroni che normalmente avrebbero indotto i neurotrasmettitori eccitatori a produrre quelli inibitori, e persuadendo i neuroni che altrimenti si sarebbero legati alla corteccia a spostarsi invece verso un'area subcorticale nota come striato. I geni indirizzano ogni passo di questo processo, con tanta precisione nel cervello come in altre regioni del corpo.

Il corretto cablaggio neurale dipende dal comportamento delle porte di uscita dei neuroni – note come assoni – e delle porte di ingresso – note come dendriti. Ed anche questo comportamento è modulato dal contenuto del genoma. Per esempio, gran parte del lavoro svolto dagli assoni è governato da protuberanze serpeggianti speciali, quasi simili a una mano, ubicate all'estremità di ciascun assone e denominate coni. I coni di crescita (e il cablaggio assonale che trascinano dietro di loro) sono come piccoli animali che scartano avanti e indietro, manovrando attorno agli ostacoli, estendendo e ritraendo antenne note come filopodi (le "dita" di un cono di crescita) mentre il cono perlustra il territorio in cerca della sua destinazione – diciamo ad esempio nella corteccia uditiva. Anziché lanciarsi semplicemente come proiettili che seguono ciecamente e in maniera impotente qualsiasi percorso inizialmente intrapreso, i coni di crescita compensano e rettificano costantemente il tragitto, assumendo nuove informazioni, mentre si aprono la strada verso i loro bersagli.

I coni di crescita quindi non vagano alla cieca; "sanno" invece cosa stanno cercando e possono cambiare direzione persino se sulla loro strada vengono sperimentalmente indotti degli ostacoli. Nello sforzo di scoprire la loro destinazione, i coni di crescita possono utilizzare tutti i trucchi di cui dispongono, dalle tracce a "breve raggio", che emanano dalla superficie di cellule vicine, alle tracce a lunga distanza, che inviano i loro segnali da millimetri lontani – miglia e miglia nella geografia di un assone. Per esempio, alcune proteine sembrano fungere da "radiolari" che possono diffondere segnali attraverso grandi distanze e servire da guida per coni di crescita distanti – a patto che siano sintonizzati sulla corretta stazione. Quali stazioni sceglie un cono di crescita – e se trova attraente o repellente un particolare segnale – dipende dai recettori proteici presenti sulla sua superficie, a sua volta una funzione dei geni espressi dalla cellula.

In sostanza, dal punto di vista della psicologia, siamo di fronte a un sistema sorprendentemente potente per il cablaggio della mente. Invece di stimolare vagamente gli assoni e i dendriti a inviare e accettare i segnali vicini, lasciando

perciò tutto il fardello dello sviluppo mentale all'esperienza, la natura mette in costruzione il cavo: equipaggia i cavi del cervello – assoni e dendriti – con strumenti elaborati per trovare da soli la propria strada. Anziché attendere l'esperienza, il cervello può sfruttare il complesso costituito da geni e proteine per creare un punto di partenza riccamente intricato per il cervello e per la mente.

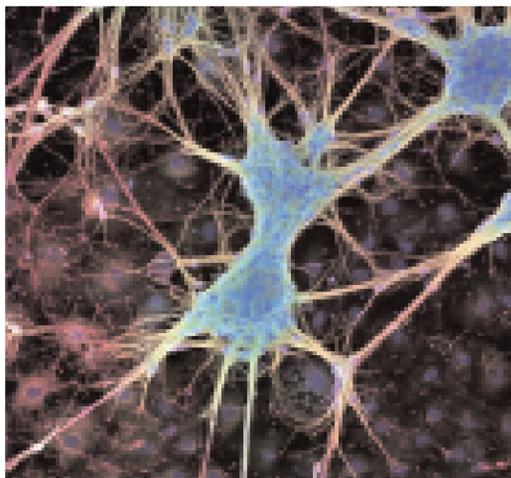


Foto di un neurone (cellula nervosa). Queste cellule sono cresciute in coltura. Sottili filamenti, assoni o dendriti, collegano fra loro i corpi di diverse cellule. Quelli corti sono colorati in verde, quelli lunghi in rosa, mentre i corpi delle cellule sono blu, come i loro nuclei. Queste cellule sono state fatte crescere nell'ambito della ricerca sulle possibili cure delle paralisi spinali e dei disordini nervosi.

possibilità quanti sono i geni (per motivi sconosciuti la situazione reale è ancor più complicata; si è visto che numerosi geni hanno SE multipli, e che i geni possono spesso agire in associazione).

Pensare ai geni come a un complesso di "SE-ALLORA" anziché come a un insieme di "DEVE" ha profonde conseguenze sul modo in cui valutiamo i ruoli complessi della natura e dell'educazione. Per fare solo un esempio, consideriamo il gene che produce l'enzima noto come monoammina ossidasi-A, o MAO-A, una proteina che aiuta a metabolizzare i neurotrasmettitori, come serotonina e dopamina. Questo gene era inizialmente considerato un gene "per" la violenza; statisticamente parlando, le persone che presentano una versione "corta" sono maggiormente predisposte alla violenza rispetto alle persone che presentano una versione "lunga" del gene. Ma una ricerca più accurata ha dimostrato che il gene non porta inevitabilmente alla violenza e, di fatto, tra i bambini allevati in ambienti normali, i portatori della versione corta del gene non appaiono più predisposti alla violenza rispetto ai portatori della versione lunga del gene. La vera storia che sta alla base di questo gene sembra invece più complessa: il SE del gene della MAO-A sembra essere governato da un qualcosa di simile allo stress. Tra i bambini allevati in famiglie che *commettono abusi*, i portatori della versione corta del gene appaiono correlati alla violenza. Il MAO-A non sembra quindi essere di per sé un gene che induce alla violenza, ma (e anche questo è probabilmente eccessivamente semplificato) che induce una tendenza alla violenza in un certo tipo di ambiente fortemente stressante.

Sulla più antica visione dei "geni come predestinazione" noi, come



Cesare Lombroso nasce a Verona il 6 novembre 1835 da un'agiata famiglia ebraica. Nel 1852 si iscrive alla facoltà di medicina dell'Università di Pavia, dove si laurea nel 1858.

La fama di Lombroso è legata soprattutto alla teoria dell'uomo delinquente nato o atavico, individuo che reca nella struttura fisica i caratteri degenerativi che lo differenziano dall'uomo normale e socialmente inserito.

società, potremmo essere impotenti, senza alcuna possibilità (mancanza di eugenetica) di gestire la variazione del gene della MAO-A. Una volta compresa la vera natura condizionante (IF-THEN = SE-ALLORA) dei geni, si spalancano invece nuove prospettive. Per esempio, potremmo utilizzare tecniche genetiche per scoprire quali bambini corrono i maggiori rischi, e affidare questi bambini a servizi sociali specifici affinché possano crescere nell'ambiente corretto di cui necessitano. Proprio come il nuovo settore della farmacogenetica mira ad abbinare i farmaci alla peculiare fisiologia genetica, un nuovo settore della terapeutico-genetica potrebbe sfruttare la genetica individuale per prescrivere interventi sociali personalizzati. Considerando i geni non come copie cianografiche ma come

interruttori complessi che interagiscono a ogni livello con l'ambiente potremo un giorno essere in grado di sfruttare le nostre crescenti conoscenze della natura come uno strumento con cui estrapolare il meglio dall'educazione.

## CONCILIARE GENI E EDUCAZIONE

*Indagare l'interrelazione tra genoma e ambiente può avere risvolti significativi nel campo dell'educazione.*

Dalla divisione cellulare alla differenziazione cellulare, qualsiasi processo utilizzato nello sviluppo del corpo viene anche utilizzato nello sviluppo del cervello. I geni agiscono nel cervello nello stesso modo in cui agiscono nel resto del corpo: guidano il destino delle cellule indirizzando la produzione delle proteine all'interno di quelle cellule stesse. **L'unico aspetto che caratterizza veramente lo sviluppo del cervello – la base fisica della mente – è il suo "cablaggio", le connessioni fondamentali fra i neuroni, ma anche in questo caso, come vedremo nel successivo capitolo, i geni svolgono un ruolo essenziale.**

L'idea che il cervello possa essere assemblato in maniera simile al resto del corpo – in base all'azione di migliaia di geni autonomi ma interagenti (plasmati dalla selezione naturale) – è un anatema contro il nostro sentimento più profondo, secondo il quale le nostre menti sono speciali, in qualche modo distinte dal mondo materiale. Ma al tempo stesso, è una continuazione, e forse il cul-

## DA UN PICCOLO NUMERO DI GENI A UN CERVELLO COMPLESSO

La riflessione sul rapporto tra cervello e corpo invalida immediatamente la tesi della scarsità dei geni: se 25.000 geni non fossero sufficienti ad esercitare un'influenza significativa sui 20 miliardi di cellule del cervello, sicuramente non avrebbero molto impatto neanche sui trilioni di cellule che si trovano nell'intero organismo. La confusione, ancora una volta, può essere riconducibile all'idea errata del genoma come copia cianografica, all'aspettativa fuorviante della mappatura tra singoli geni e singoli neuroni; in realtà, il genoma descrive i processi per la costruzione dei prodotti anziché le immagini dei prodotti finiti: meglio pensare al genoma come a uno schema di compressione anziché ad una copia cianografica.

Gli scienziati informatici utilizzano schemi di compressione quando vogliono immagazzinare e trasmettere efficientemente delle informazioni. Tutti gli schemi di compressione si basano in un modo o nell'altro sulla scoperta della ridondanza. Per esempio, i programmi che utilizzano il formato GIF cercano modelli di pixel ripetuti (i punti colorati di cui sono composte le immagini digitali). Se una intera serie di pixel ha esattamente lo stesso colore, il software che crea un file GIF assegnerà un codice che rappresenta il colore di quei pixel, seguito da un numero per indicare quanti pixel in una fila hanno lo stesso colore. Pertanto, invece di avere un elenco di ogni singolo pixel blu, il formato GIF risparmia spazio immagazzinando solo due numeri: il codice per il blu e il numero di pixel blu ripetuti. Quando si "apre" un file GIF, il computer riconverte questi codici nelle stringhe apposite di bit identici; nel frattempo, il computer ha risparmiato una considerevole quantità di memoria. Gli scienziati informatici hanno elaborato dozzine di schemi di compressione diversi, dal JPEG per le fotografie all'MP3 per la musica, ciascuno progettato per sfruttare un diverso tipo di ridondanza. La procedura generale è sempre la stessa: un prodotto finale viene convertito in una descrizione compattata su come ricostruire quel prodotto stesso; un "decompressore" ricostruisce il prodotto finale desiderato partendo da quella descrizione compattata.

Sebbene la natura non disponga di alcun omologo di un programma capace di stipare una immagine in una codificazione compressa, offre invece un omologo del programma che effettua la decompressione: la cellula. Entra genoma, esce organismo. Attraverso la logica dell'espressione dei geni, le cellule sono fabbriche auto-regolanti che traducono il genoma in una struttura biologica.

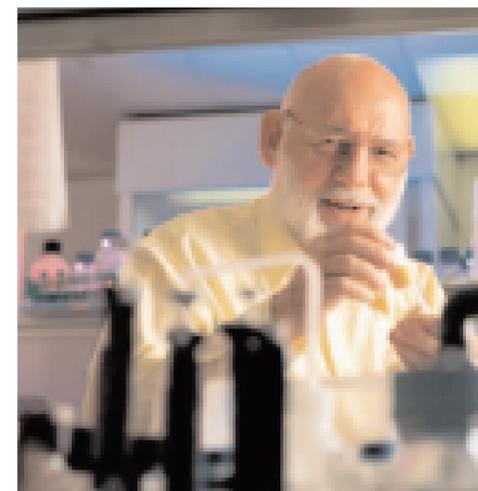
Al cuore di questo processo di decompressione vi è l'idea di una cascata genetica, un gene che ne influenza un altro, che ne influenza un altro, e così via. Anziché agire in assoluto isolamento, la gran parte dei geni opera come parte integrante di reti elaborate in cui l'espressione di un gene è una precondizione per l'espressione del gene successivo. L'ALLORA di un gene può soddisfare il SE di un altro e così indurlo ad attivarsi. Le *proteine di regolazione* sono proteine (esse stesse il prodotto dei geni) che controllano l'espressione di altri geni e così legano insieme l'intero sistema genetico. Un singolo gene di regolazione che sovrintende una rete complessa può indirettamente innescare una cascata di centinaia o migliaia di altri geni che portano, per esempio, allo sviluppo di un occhio o di un arto. Secondo le parole del biologo svizzero Walter Gehring, tali geni possono fungere da "geni di controllo principali".

Le proteine di regolazione, che rappresentano il punto di partenza delle cascate genetiche, fungono da stenografia, che può essere costantemente riutilizzata, come le *subroutine* riutilizzabili da un progettista di software. Per esempio, il genoma di un millepiedi non specifica probabilmente una serie di centinaia o migliaia di geni per ciascuno degli arti del millepiedi; sembra invece che la *subroutine* "costruzione dell'arto" – una cascata di forse centinaia o migliaia di geni – venga invocata diverse volte, una per ciascuna nuova coppia di arti. Qualcosa di simile sta alla base della costruzione delle costole dei vertebrati. E in questi ultimi anni è diventato chiaro che il cervello embrionale si basa sullo stesso tipo di riciclaggio genetico, utilizzando all'infinito gli stessi motivi ripetuti - per esempio, una serie di connessioni note come mappe topografiche – per supervisionare lo sviluppo di migliaia o persino milioni di neuroni con l'impiego ciascuno di una data *subroutine* genetica. Non esiste affatto una scarsità di geni, perché ogni cascata rappresenta la stenografia di una diversa *subroutine* riutilizzabile: un modo diverso per creare il più dal meno.



*Il millepiedi è un buon esempio di animale avente una struttura corporea nella quale un unico modulo viene ripetuto numerose volte. Come tale può essere usato per rappresentare il modus operandi di molti dei nostri geni, che si comportano come subroutine di un sofisticato software. La sequenza di geni del millepiedi responsabile della crescita di un modulo viene probabilmente "richiamata" più volte fino a formare tutte le coppie di zampe previste.*

mine, di una lunga tendenza, una crescita per la specie umana che da troppo tempo ha sovrastimato la sua centralità nell'universo. Copernico ci dimostrò che il nostro pianeta non è al centro dell'universo. William Harvey dimostrò che il nostro cuore è una pompa meccanica. John Dalton e i chimici del XIX secolo dimostrarono che i nostri corpi, e tutta la materia, sono composti da atomi. Watson e Crick dimostrarono che i geni erano composti da catene di carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto e fosforo. Negli anni '90, la Decade del Cervello, i neuroscienziati cognitivi hanno dimostrato che la nostra mente è il prodotto del nostro cervello. I primi anni di questo secolo dimostrano che i meccanismi che costruiscono il nostro cervello sono soltanto un aspetto particolare dei meccanismi che costruiscono il



*Il biologo svizzero Walter Jakob Gebring, nato nel 1939, individuò nel 1984 l'omeobox, un tratto di DNA che accomuna i geni-architetti che dirigono l'ordinata disposizione delle parti del corpo. Nel 1995 identifica il gene che controlla lo sviluppo dell'occhio in tutti gli organismi del regno animale.*

resto del corpo. La struttura iniziale della mente, come la struttura iniziale del resto del nostro corpo, è un prodotto dei nostri geni.

Il cervello umano, presumibilmente, è più complesso rispetto a quello di qualsiasi altra specie, ma vi sono poche ragioni per credere che il processo del suo sviluppo sia interamente o anche significativamente diverso dal processo attraverso cui si sviluppa il cervello di altri animali. La grande

maggioranza delle componenti del cervello umano sono correlate alle componenti degli altri cervelli e crescono in maniera simile. Dal punto di vista del kit strumentale di cui dispone la biologia evolutiva, il cervello è solo una ulteriore disposizione di molecole. **Se accettiamo il fatto che le nostre menti sono i prodotti dei nostri cervelli, dobbiamo accettare il fatto che i processi di base mediante i quali vengono costruite le nostre menti sono identici a quelli che costruiscono i cervelli e i sistemi mentali di altri organismi.**

**Sebbene alcuni potrebbero considerare l'idea che siamo soltanto un ammasso di molecole, cresciute nello stesso modo, come una rinuncia completa di tutto ciò che vi è di speciale nell'umanità, io considero invece la riproposizione moderna ed eccitante di una vecchia idea: l'esistenza di un legame che unifica tutte le cose viventi.** Si afferma che San Francesco abbia chiamato tutte le creature, non importa quanto piccole, con il nome di fratello e sorella, poiché sapeva che esse avevano la sua stessa identica origine. Laddove gli antichi potevano ricorrere al soprannaturale, noi oggi possiamo parlare di fisicità. Grazie ai progressi compiuti dalla biologia molecolare e dalla neuroscienza possiamo oggi comprendere, meglio che mai, quanto profondamente condividiamo la nostra eredità – fisica e mentale – con tutte le creature che popolano il nostro pianeta.

## L'AUTORE

Gary Marcus è un esperto di genetica comportamentale. Dopo aver conseguito il dottorato di ricerca nel 1993 presso il MIT's Department of Brain, in Cognitive Sciences, ha insegnato all'Università del Massachusetts fino al 1997. Autore di due libri sulle origini e la natura della mente umana, ha pubblicato alcune ricerche sullo sviluppo cognitivo e sull'evoluzione del linguaggio articolato nella specie umana, in importanti giornali scientifici come *Science*, *Nature*, *Cognition*, *Cognitive Psychology*, e *Monographs of the Society for Research in Child Development*. Nel 1996 ha ottenuto il premio Robert L. Fantz per nuovi ricercatori nel campo dello sviluppo cognitivo. Attualmente è Direttore del NYU Infant Language Learning Center e Professore Associato presso il Dipartimento di Psicologia della New York University.

